

**Министерство высшего и среднего специального образования  
Республики Узбекистан**

**Ташкентский автомобильно-дорожный институт**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ КОЛЕСНЫХ  
МАШИН**

**Ташкент - 2007**



# ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
<b>Оглавление</b>	4
<b>Часть 1. Вопросы теории надёжности машин.</b>	
1.1. Значение проблемы надёжности для машин.	9
1.2. Основные понятия и показатели надёжности машин.	18
1.3. Источники информации о надёжности колесных машин	30
1.3.1. Три основных источника информации	31
1.3.2. Статистическая информация из сферы эксплуатации	36
1.3.3. Статистическая информация из сферы восстановления работоспособности	39
1.3.4. Требование к информации о надёжности	42
1.4. Сбор информации о надёжности	45
1.4.1. Общие положения, организация	45
1.4.2. Методы сбора информации при эксплуатации автомобилей	49
1.4.3. Определение числа объектов наблюдений	52
1.5. Показатели надёжности, получаемые по статистическим данным	58
1.6. Характер эксплуатационных отказов автомобиля	64
1.6.1. Особенности автомобиля как изделия	64
1.6.2. Анализ эксплуатационной надёжности автомобилей	68
1.6.3. Использование результатов эксплуатационных исследований для повышения надёжности автомобилей.	90
1.7. Пути повышения надёжности машин.	93
1.7.1. Факторы, влияющие на надёжность машин.	93
1.7.2. Повышение надёжности автомобиля с учетом различных факторов.	97
1.7.3. Конструктивные мероприятия повышения надёжности	100

1.7.4.	Технологические мероприятия повышения надёжности	102
1.8.	Обеспечение заданного уровня надёжности машин	108
1.8.1.	Состояние вопроса	108
1.8.2.	О конструктивной надёжности автомобиля	118
1.8.3.	Анализ методов обоснования и расчета нормативов надёжности сложных технических систем	133
1.8.3.1.	Метод равномерного распределения	134
1.8.3.2.	Метод распределения с учетом значимости элементов	135
1.8.3.3.	Метод распределения требований к безотказности элементов системы пропорционально затратам на их ремонт	137
1.8.3.4.	Метод чувствительности	138
1.8.3.5.	Метод множителей Лагранжа	139
1.8.3.6.	Метод распределения требований по безотказности с учетом важности элемента	143
1.8.3.7.	Метод распределения требований по безотказности с учетом относительной уязвимости элементов	145
1.8.3.8.	Способ определения нормативных значений показателей безотказности составных частей изделия с учетом использования априорной информации об изменении их выходных параметров	146
1.8.3.9.	Распределение безотказности с учетом коэффициента весомости	148
1.8.3.10.	Подход к определению требований по безотказности комплектующих изделий исходя из достигнутого уровня их надежности и трудоемкости устранения отказов	151
1.8.3.11.	Распределение требований безотказности с использованием принципа равенства возможных потерь в эксплуатации по каждой составной части с учетом сложности и доли его работы (машиной)	152

1.8.3.12.	Метод распределения требований к средним наработкам на отказ составных частей изделия при отсутствии априорной информации	154
1.8.3.13.	Требования к безотказности составных частей, с учетом данных эксплуатационных испытаний машин или их аналогов	156
1.8.3.14.	Применение теории полезности при распределении требований к безотказности составных элементов системы на основе учет их сложности	158
1.9.	Разработка методов распределения требований по безотказности между составными частями модернизируемого или проектируемого автомобиля	160
1.9.1.	Методика распределения требований по безотказности с использованием коэффициентов предпочтений.	160
1.10.	Организация и статистическая обработка результатов экспертиз.	164
1.10.1.	Экспертная оценка при проектировании сложных технических систем	164
1.10.2.	Обоснование выбора методов сравнительного анализа системы поддержки принятия решения (СППР).	173
1.10.3.	Основные задачи экспертных методов	181
1.10.3.1.	Классификация экспертных методов	181
1.10.3.2.	Общие принципы организации экспертных процедур	183
1.10.3.3.	Процедура опроса экспертов и статистическая обработка результатов экспертиз	185
1.11.	Разработка графического метода расчета средних наработок на отказ элементов конструкции проектируемого автомобиля.	188

**Часть 2. Решение практических задач по теории надёжности и методам обеспечения требуемого уровня надёжности модернизируемой или проектируемой колесной машины.**

2.1.	Задачи по теории надёжности.	191
2.1.1.	Критерии и количественные характеристики надёжности.	191
2.1.2.	Критерии надёжности невосстанавливаемых изделий.	193
2.1.3.	Критерии надёжности восстанавливаемых изделий	200
2.1.4	Типовые примеры и их решения	207
2.1.5.	Задачи для самостоятельного решения.	231
2.2.	Задачи по теории массового обслуживания	252
2.2.1.	Краткие теоретические сведения по теории массового обслуживания.	252
2.2.2	Примеры по теории массового обслуживания	260
2.2.3.	Применение метода Монте-Карло при расчёте систем массового обслуживания.	264
2.3.	Задачи по экспертным методам ранжировки факторов, влияющих на значения нормативов надёжности. Организация и результаты опроса экспертов о влиянии объективных факторов на значения нормативов безотказности элементов конструкции модернизируемого или проектируемого автомобиля	272
2.4.	Задачи по распределению требований по надёжности между составными частями модернизируемого или проектируемого автомобиля.	280
2.4.1.	Применение теории полезности при распределении требований к безотказности составных элементов автомобиля на основе учёта их сложности.	280
2.4.2.	Примеры обоснования и расчёта нормативов безотказности	

основных составных частей проектируемого автомобиля.	282
<b>Приложение</b>	327
<b>Литература</b>	337

# **Часть 1. Вопросы теории надёжности машин.**

## **1.1. Значение проблемы надёжности для машин.**

В большинстве случаев о надёжности продукции упоминают, говоря о ее качестве. Тожественны ли эти понятия, а если нет, то какая между ними взаимосвязь? Что такое качество? Под качеством продукции мы понимаем совокупность свойств, определяющих степень ее пригодности для использования по назначению. Каждой вещи, изделию, виду продукции, в зависимости от ее назначения, свойственны свои особые, присущие только ей показатели качества.

Когда мы покупаем продукты питания, для нас важно, чтобы они были свежими, питательными, вкусными. Приобретая ткань, мы интересуемся не только ее внешним видом, но и ее плотностью, узнаем, сильно ли она мнется, садится ли после стирки. Качество обуви определяется ее прочностью, эластичностью кожи, удобством колодки, ее соответствием моде.

Мы видим, что пригодность каждой вещи, изделия определяется не каким-либо одним свойством, а совокупностью свойств. Обувь, например, может быть очень прочной, но если она не соответствует моде, она уже менее пригодна для использования и, следовательно, качество ее ниже.

Наоборот, чем лучше данное изделие может быть использовано по своему прямому назначению, чем больше оно удовлетворяет нас по всем своим признакам и свойствам, тем выше и его качество.

Когда мы говорим о необходимости неуклонного повышения качества, то, естественно, мы имеем в виду не только товары широкого потребления, но и машины, аппараты, приборы и другие технические устройства и изделия производственного назначения. Каждому из них присущи свои особые свойства, определяющие их качество. Например, для станка важны точность, производительность, степень автоматизации, для автомобиля – скорость, грузоподъемность, расход горючего.

Но свойства машины или другого технического изделия проявляются лишь в процессе работы. Поэтому, какими бы отличными начальными характеристиками ни обладал станок, как бы высоки ни были паспортные данные его точности, производительности, они еще не могут полностью характеризовать качество станка. Они характеризуют лишь его технические возможности. А чтобы полностью оценить его качество, нужно знать не только показатели точности, мощности, производительности и т.д., но и способность станка сохранять эти показатели в процессе работы в течении возможно более длительного времени.

Недостаточная надежность снижает достоинства любого изделия, что в свою очередь влияет на его цену и конкурентоспособность на рынке.

Надежность должна быть обязательным свойством любой машины, технического изделия. Но, являясь лишь одним из свойств машины, надежность существенно отличается от всех ее других свойств.

Большинство других свойств изделия могут быть не связаны друг с другом. Например, высокопроизводительный станок может обладать низкой точностью, автомобиль – иметь высокую скорость, но в то же время и большой расход горючего и т.д.

В отличие от этого надежность связана со всеми свойствами изделия, характеризует проявление всех показателей качества машины в процессе ее работы.

Конечно, сама по себе надежность еще не означает высокого качества изделия. Машина может быть очень надежна, но обладать весьма низкими техническими характеристиками.

Но зато, если машина не обладает необходимой надежностью, то все ее высокие технические данные, все остальные показатели теряют свое практическое значение, ибо они не могут быть полностью использованы в работе.

Предположим, создан новый пассажирский самолет, который по своим техническим характеристикам значительно превосходит все ранее выпускавшиеся. Удачно выбранная конструкция, большая мощность его моторов обеспечивают исключительно высокую скорость и дальность его беспосадочного полета, в салоне предусмотрены все удобства и комфорт для пассажиров. Но кто согласится лететь на таком самолете, если нет уверенности, что какой-либо узел или агрегат самолета не выйдет в полете из строя? Многим памятна гибель первого реактивного пассажирского самолета «Комета». Авария произошла над Средиземным морем в начале 50-х годов. Причиной аварии, как выяснилось, послужила неправильно выбранная форма иллюминаторов. В «Комете» они были четырехугольными, а в углах деталей бывают большие местные напряжения. Под воздействием этих напряжений на большой высоте по обшивке самолета побежали трещины, и самолет начал разваливаться в воздухе.

Ненадежная машина не сможет эффективно функционировать, так как каждая ее остановка из-за повреждения отдельных элементов или снижения технических характеристик ниже допустимого уровня, как правило, влечет за собой большие материальные убытки, а в отдельных случаях может иметь катастрофические последствия.

В настоящее время промышленность даже передовых стран несет огромные потери из-за недостаточной надежности и долговечности выпускаемых машин. Так, за весь период эксплуатации затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в связи с их износом в несколько раз превышают стоимость новой машины, например, для автомобилей – до 6 раз, для самолетов – до 5 раз, для станков – до 8 раз, для радиотехнической аппаратуры – до 12 раз. Из-за коррозии ежегодно теряется до 10% выплавляемого металла.

Существенное недоиспользование потенциальных возможностей имеет место для машин и агрегатов, к которым предъявляются высокие требования

безотказности. Они, как правило, снимаются с эксплуатации намного раньше того срока службы, который могло бы отработать большинство данных изделий.

Особенностью проблемы надежности является ее связь со всеми этапами проектирования, изготовления и использования машин, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея создания новой машины и кончая принятием решения о ее списании. Каждый из этапов вносит свою лепту в решение трудной задачи создания машины требуемого уровня надежности с наименьшими затратами времени и средств. Основные решения по надежности, принятые на стадии проектирования или изготовления машины, непосредственно сказываются на ее эксплуатационных и экономических показателях, которые нередко вступают между собой в противоречие. Поэтому необходимо выявление связей между показателями надежности и возможностями по их повышению на каждом из этапов проектирования, изготовления и эксплуатации машины.

При проектировании и расчете машины закладывается ее надежность. Она зависит от конструкции машины и ее узлов, применяемых материалов, методов защиты от различных вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к ремонту и обслуживанию и других конструктивных особенностей.

При изготовлении (производстве) машины обеспечивается ее надежность, она зависит от качества изготовленных деталей, методов контроля выпускаемой продукции, возможностей управления ходом технологического процесса, от качества сборки машины и ее узлов, методов испытания готовой продукции, и других показателей технологического процесса.

При эксплуатации машины реализуется ее надежность. Показатели безотказности и долговечности проявляются только в процессе использования машины и зависят от методов и условий эксплуатации

машины, принятой системы ее ремонта, методов технического обслуживания, режимов работы и других эксплуатационных факторов.

Проблема надежности – комплексная. Она вторгается в сферы производства и эксплуатации машин, для ее решения привлекаются различные отрасли знаний, она требует принятия новых организационно-технических решений. Вместе с тем, надежность – это отрасль науки и техники со своей методологией и философией, позволяющая обеспечить требуемый уровень качества машины на всех этапах ее жизненного цикла.

Наука о надежности изучает закономерности изменения показателей качества технических устройств и систем и на основании этого разрабатывает методы, обеспечивающие с наименьшей затратой времени и средств необходимую продолжительность и безотказность их работы.

Эта наука на основании прогноза поведения системы разрабатывает теорию принятия оптимальных решений для обеспечения требуемого уровня надежности.

Специфическими особенностями вопросов надежности являются:

- а) фактор времени, поскольку оценивается изменение начальных параметров в процессе эксплуатации машины;
- б) прогнозирование поведения объекта с точки зрения сохранения ее выходных параметров (показателей качества) .

Изменение показателей качества машины во времени может быть абсолютным и относительным.

Абсолютное изменение качества связано с различными процессами, действующими на машину и изменяющими свойства или состояние материалов, из которых она выполнена, за счет чего и понижаются показатели машины и происходит ее физическое старение.

Относительное изменение качества связано с появлением новых машин с более совершенными характеристиками, и ее показатели становятся более

низкими по сравнению со средним уровнем, хотя в абсолютных значениях они могут и не измениться, т.е. происходит моральный износ машины.

Наука о надежности изучает изменения показателей качества машины под влиянием тех причин, которые приводят только к абсолютным изменениям ее свойств.

Как всякая прикладная отрасль знаний наука о надежности базируется на фундаментальные математические и естественные науки, на те их разделы и теоретические разработки, которые способствуют решению поставленных задач.

Особое значение для науки о надежности имеет вопрос о применении математического аппарата и привлечении уже разработанных или созданных по запросам практики новых методов, позволяющих осуществлять оценку и прогнозирование надежности изделий и сложных систем.

Однако в настоящее время в инженерной практике, как правило, не применяют расчеты на надежность и долговечность машин, нет даже общей схемы такого расчета, а имеются отдельные виды расчетов, представляющих собой по существу разрозненные этапы комплексного решения.

Такое положение объясняется чрезвычайной сложностью проблемы расчета машин на надежность. Это связано не только с объемом расчетов. Поскольку каждая машина имеет большое число элементов с потенциальной возможностью отказа, но и с разработкой принципиальной схемы расчета машины на безотказность и долговечность.

Кроме того, должны быть разработаны методы расчета на долговечность и безотказность различных элементов машины с учетом характера действующих сил и скоростей, размеров и конфигурации сопряжения, условий эксплуатации, служебного назначения данного узла и требований, предъявляемых к его выходным параметрам.

Любая машина, выполняя определенные функции, находится во взаимодействии с окружающей средой, с человеком, управляющим машиной,

с объектом, для которого она предназначена (технологические машины с обрабатываемым материалом, транспортные – с перевозимым грузом и т.п.).

При этом возникают разнообразные причинно-следственные связи как формы проявления всеобщей универсальной связи явлений в природе. Накопление количества различных воздействий на машину приводит к эволюции ее качественных показателей и в соответствии с законом диалектики к возможности перехода в иное качественное состояние.

Поэтому изменения, которые происходят в машине при эксплуатации, являются закономерным проявлением важнейшего и неотъемлемого свойства всех материальных объектов – движения, в его философском понимании, ибо ничего неизменного в природе нет.

Мы можем замедлить нежелательное для нас изменение, сделать так, чтобы отклонение качественных показателей машины находились в течении необходимого времени в доступных пределах, но исключить их полностью нельзя. Машину нельзя изолировать от влияния среды, в которой она работает, от влияния процессов, которые протекают в ней самой при осуществлении рабочих функций, от действия остаточных явлений, являющихся следствием технологических процессов, применявшихся при изготовлении машины. Все виды энергии – механическая, тепловая, химическая, электромагнитная – воздействуют на машину и вызывают в ней обратимые и необратимые процессы, снижающие ее начальные свойства.

Поэтому необходимо изучать источники и причины вредных воздействий на машину, исследовать физическую сущность процессов, снижающих работоспособность машины, изучать реакцию машины на различные воздействия и на основании этого создавать такие системы, которые могли бы в течении необходимого периода времени выполнять заданные функции, не опасаясь воздействия с внешней средой.

Оценка достигнутого уровня надежности и необходимость его повышения должна решаться в первую очередь с экономических позиций,

ибо экономика является основным критерием для решения большинства практических вопросов надежности. Ведь современный уровень развития техники позволяет достичь практически любых показателей качества и надежности изделия и все дело заключается в затратах на достижении поставленной цели.

Эти затраты могут быть столь высоки, что эффект от повышенной надежности объекта не возместит их, и суммарный результат от проведенных мероприятий будет отрицательным.

Конечно, очень многое зависит от характера принимаемых решений. Часто мероприятия по повышению надежности могут и не требовать существенных затрат, поскольку наука и практика подсказывают рациональные решения. Однако всегда имеется широкий диапазон самых разнообразных возможностей по повышению начального качества машины и изменению ее конструкции, по применению более качественных материалов, по выбору различных вариантов технологического процесса и использованию специальных методов, повышающих надежность изделий, по применению той или иной системы ремонта и технического обслуживания машины и т.п.

Сравнение различных вариантов достижения требуемого уровня надежности должно исходить из условия получения наибольшего суммарного экономического эффекта с учетом затрат в сферах производства и эксплуатации машины и того положительного экономического эффекта, который дает использование машины по назначению. В общем случае изменение во времени суммарного экономического эффекта при эксплуатации машины складывается под влиянием двух основных факторов (рис.1.1). С одной стороны необходимо учитывать затраты на изготовление машины  $Q_u$ , включая ее проектирование, изготовление, испытание, отладку, транспортировку к месту работы и другие затраты, а также затраты на эксплуатацию  $Q_e$ , включая техническое обслуживание, ремонт,

профилактические мероприятия – все то, что связано с поддержанием и восстановлением работоспособности машины. Эти затраты  $Q_u+Q_3$ , являются отрицательными в балансе эффективности.

С другой стороны, работа машины дает положительный экономический эффект  $Q_p$  (прибыль) в зависимости от ее целевого назначения, например, для технологического оборудования, в результате выпуска продукции, для транспортных машин при перевозке грузов, для двигателей как следствие преобразования энергии и т.п.

Изменение  $Q_3$  в функции времени имеет тенденции к возрастанию, так как старение отдельных элементов машины приводит к необходимости вкладывать все большие средства для восстановления утрачиваемых свойств.

Изменение  $Q_p$  во времени, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению интенсивности роста, поскольку более частые простои машины в ремонте и техническом обслуживании снижают ее производительность. Поэтому кривая суммарной эффективности  $Q(t)=Q_u+Q_3(t)+Q_p(t)$  имеет максимум и два раза пересекает ось абсцисс  $t$ .

При возрастании  $Q$  период времени  $t=T_{ok}$ , при котором  $Q_u+Q_3=Q_p$  будет являться сроком окупаемости, когда машина при эксплуатации возвратила затраты, которые были в нее вложены при изготовлении. Начиная с этого момента при  $t=T_{ok}$  машина начинает приносить прибыль. Однако прирост полученного эффекта постепенно снижается из-за возрастания эксплуатационных затрат до  $t=T_{np}$ , когда снова  $Q_u+Q_3=Q_p$ . При  $t<T_{np}$  затраты на эксплуатацию больше того экономического эффекта, который может обеспечить машина. Длительность экономически целесообразной эксплуатации машины  $T_3$  находится в диапазоне между  $T_{max}$  и предельным сроком службы машины  $T_{np}$ :  $T_{max}<T_3<T_{np}$ .

Выбор варианта машины с позиции надежности должен исходить из сравнения затрат на изготовление и эксплуатацию машины с тем экономическим эффектом, который она сможет обеспечить. Например, как

это видно из рисунка 1.1, начальная стоимость машины № 2 выше, но за счет показателей производительности, качества и надежности она дает больший экономический эффект и ее целесообразно эксплуатировать более длительное время. При оценке разнообразных возможностей по повышению и обеспечению надежности машин экономический критерий является важнейшим для выбора оптимальных решений.

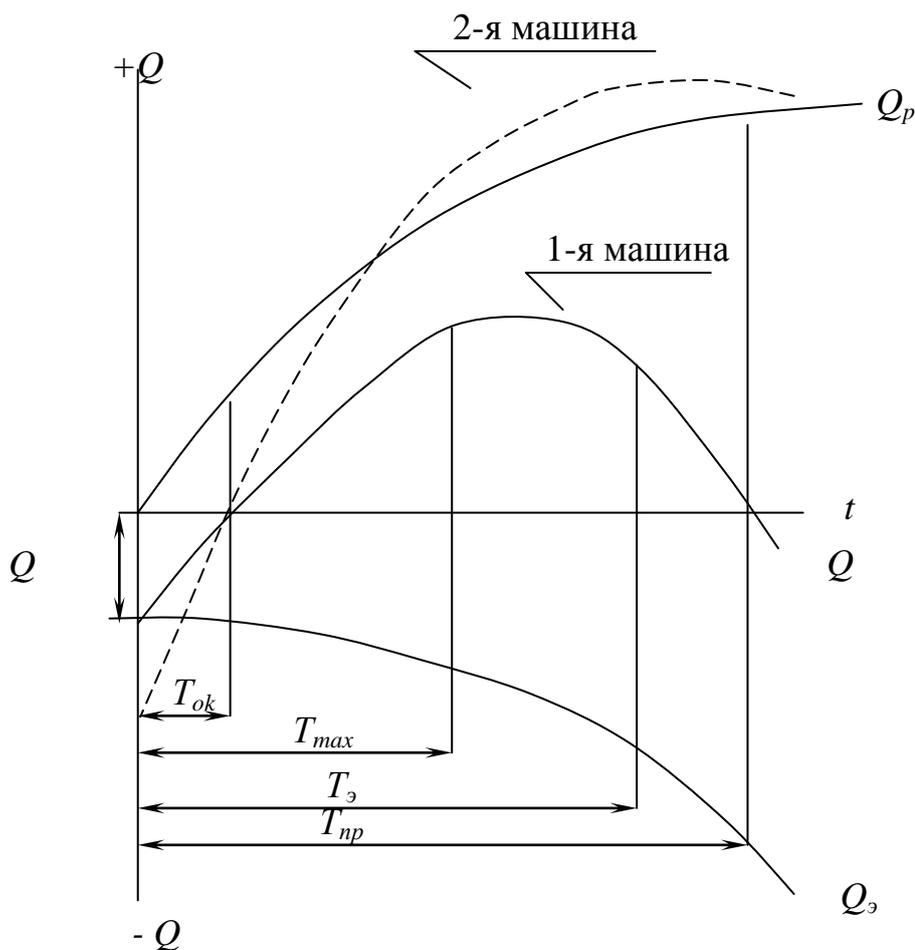


Рис.1.1. Изменение экономической эффективности машины во времени.

## 1.2. Основные понятия и показатели надежности машин.

Надежность машины отражает изменения их свойств во времени в процессе эксплуатации.

Исходные служебные свойства машин закладываются при проектировании и обеспечиваются при изготовлении (производстве). В процессе эксплуатации машины подвергаются влиянию различных воздействий, а их служебные свойства изменяются.

Выделяют три источника воздействия:

действие энергии окружающей среды, включая человека – оператора, управляющего машиной и производящего техническое обслуживание и ремонт;

внутренние источники энергии связанные с рабочими процессами, протекающими в машине и сопряжениях деталей;

потенциальная энергия, накопленная в материале и элементах машин в процессе изготовления и ремонта;

Все источники воздействия проявляются в виде механической, тепловой, химической энергии, вызывают в материале элементов машины необратимые процессы, приводят к повреждению и изменению начальных параметров машины (рис. 1.2).

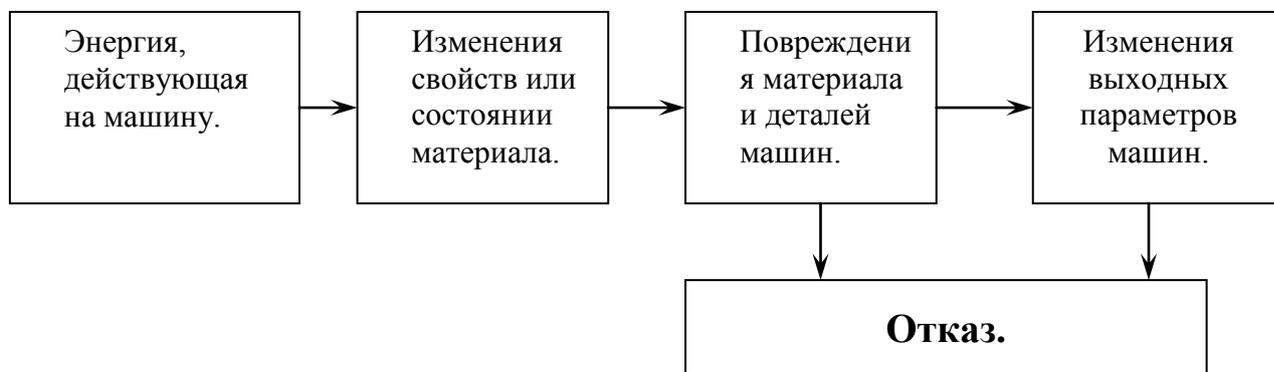


Рис.1.2. Процесс возникновения отказа.

В эксплуатации машина может находиться в различных состояниях.

Исправное состояние – объект соответствует всем требованиям, установленным нормативно – технической и конструируемой документацией.

При неисправном состоянии объект не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической или конструируемой документацией.

Работоспособное состояние – значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

При неработоспособном состоянии значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не отвечает требованиям нормативно-технической или конструкторской документации.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называется отказом. Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния, называется повреждением.

Отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта, называется внезапным. При постепенном изменении значений одного или нескольких заданных параметров объекта отказ называется постепенным.

Независимый отказ не обусловлен отказом другого объекта, зависимый обусловлен.

Объект, для которого в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации, называется восстанавливаемым, в противном случае – невосстанавливаемым.

Время эксплуатации объектов определяется наступление предельного состояния, при котором дальнейшее применение объекта по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения характеризуется безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность показывает возможность объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течении некоторого времени или наработки.

Способность объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния (при установленной системе технического обслуживания и ремонта) называется долговечностью.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Под сохраняемостью понимается свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течении хранения и после него и (или) транспортирования.

Показателем надежности называется количественная характеристика одного или нескольких свойств составляющих надежность объекта. Единичный показатель относится к одному из свойств, составляющих надежность объекта, количественный к нескольким.

Показатели надежности определяются на основе параметров, характеризующих работу объектов во времени. Эти параметры являются случайными величинами, что объясняется как рассеиванием характеристик при изготовлении новых машин, так и многообразием условий эксплуатации. Поэтому их обработку можно произвести только методами математической статистики и теории вероятностей. Рассмотрим некоторые основные моменты этих фундаментальных дисциплин, которые используются в теории надежности машин.

Решая задачи надежности машин, приходится иметь дело только со случайными событиями – отказами. Изучение закономерностей появления отказов машин является важнейшим вопросом проблемы надежности.

Однако решение задач эксплуатационной надежности машин связано не только с изучением и анализом физической сущности и закономерностей

возникновения отказов, но и определением случайных величин, которыми характеризуется случайность появления отказов.

Непрерывные случайные величины имеют одну общую характерную особенность, заключающуюся в том, что они могут принимать любые численные значения в данном интервале, какие именно, до проведения опыта предсказать невозможно. Однако, знание только возможных значений, которые может принять случайная величина, не позволяет полностью ее описать. Для этого требуется знать математическую модель описания случайной величины – закон распределения.

Законом распределения случайной величины, называется всякое соотношение, устанавливающее связь между всеми возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Во многих практических задачах надежности вместо вероятности того, что случайная величина  $T$  принимает вполне определенное значение  $t$ , достаточно знать вероятность того, что случайная величина  $T$  меньше или равна  $t$ . Эта вероятность задается интегральной функцией распределения

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Наглядное представление о характере распределения непрерывной случайной величины в окрестностях различных точек дает особая функция, называемая плотностью распределения вероятности, или плотностью распределения  $f(t)$ .

Предел отношения вероятности показания непрерывной случайной величины на элементарном участке от  $t$  к  $t + \Delta t$  его длине  $\Delta t$ , при  $\Delta t$  стремящемся к нулю, называется плотностью распределения случайной величины  $T$  в точке  $t$ .

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta F(t)}{\Delta t},$$

$$m.e. \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

Следовательно, плотность распределения равна производной от функции распределения непрерывной случайной величины.

При решении практических задач не всегда возникает необходимость характеризовать случайную величину законом распределения. Часто инженеру достаточно представить информацию о распределении случайной величины через параметры, описывающие её.

Числовыми характеристиками (параметрами) случайной величины называются характеристики наиболее существенных особенностей закона распределения. Параметры характеризуют центр распределения, масштаб и форму кривой распределения.

Наиболее часто числовыми характеристиками случайной величины, используемыми в теории надежности, являются:

математическое ожидание (среднее значение)  $M(T) = a_0$ ;

дисперсия или среднее квадратическое отклонение  $D(T)$  и  $\delta$ ;

коэффициент вариации  $V(T)$ ;

медиана  $M_e$  и мода  $M_o$ ;

моменты различных порядков.

Математическим ожиданием случайной величины называется постоянное число, около которого с ростом числа испытаний устойчиво колеблется среднее арифметическое значение.

Если  $T$  – непрерывная случайная величина с плотностью распределения  $f(t)$ , то ее математическое ожидание определяется

$$a_0 = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t) dt$$

Дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации случайной величины – эти характеристики показывают насколько тесно сгруппированы возможные значения случайной величины около ее математического ожидания т.е.

$$D(T) = \int_{-\infty}^{\infty} (t - a_0)^2 f(t) dt$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, что не всегда удобно. Поэтому часто на практике используется характеристика, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Эта характеристика называется средним квадратическим отклонением случайной величины и представляет собой квадратный корень из дисперсии

$$\delta = \sqrt{D(T)}$$

В относительных единицах рассеивание выражается коэффициентом вариации

$$V(t) = \frac{\delta}{a_0}$$

Медиана  $Me$  случайной величины  $T$  есть ее значение, которое делит площадь под кривой плотности распределения пополам  $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 0,5$ .

Модой  $Mo$  непрерывной случайной величины  $T$  является такое ее значение, которому соответствует наибольшее значение плотности распределения, т.е.

$$f(Mo) = \max$$

Случайная величина исчерпывающе описана с вероятностной точки зрения, если известна ее математическая модель – закон распределения.

Знания математических моделей отказов имеют большое значение для теории и практики обеспечения надежности объектов. Они позволяют: выполнить контроль уровня надежности в эксплуатационных условиях; выявить возможности дальнейшего увеличения ресурса; определить необходимость выполнения работ по совершенствованию конструкций и повышению уровня их надежности.

Для описания случайных величин в теории вероятностей разработаны разнообразные законы распределения. Наибольшее распространение для

исследования эксплуатационной надежности машин имеют следующие: экспоненциальный, нормальный, логарифмически – нормальный, Вейбулла.

Экспоненциальное распределение имеет большое практическое применение. Оно используется для описания отказов агрегатов и систем машин, работающих в тяжелых условиях под воздействием механических и температурных нагрузок, а также при рассмотрении внезапных отказов, когда явление износа и старения настолько слабо выражены, что ими можно пренебречь.

Непрерывная случайная величина  $T$  называется распределенной по экспоненциальному закону, если ее плотность вероятности может быть определена соотношением

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  - параметр закона распределения. Этот параметр связан с математическим ожиданием  $a_0$  равенством

$$\lambda = \frac{1}{a_0}$$

Для экспоненциального распределения математическое ожидание равно среднему квадратическому отклонению, т.е.  $a_0 = \delta$ .

Вероятность безотказной работы до первого отказа на интервале от 0 до  $t$  вычисляется по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{a_0}} \quad (1.2)$$

связь основных характеристик для любого закона распределения выражается соотношением

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$$

На практике широко применяется нормальный закон распределения. Чаще всего он проявляется тогда, когда случайная величина  $T$  является результатом действия достаточно большого числа различных факторов, но

все они оказывают относительно малое влияние. Нормальный закон распределения используется для описания постепенных изменений технических параметров агрегатов и систем машин, когда доля внезапных отказов мала. Такие объекты работают, как правило, в благоприятных условиях эксплуатации. Этот закон распределения характерен для постепенных (износных) отказов.

Непрерывная случайная величина  $T$  называется нормально распределенной, если ее плотность распределения вероятности имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-a_0)^2}{2\delta^2}} \quad (1.3)$$

для любого значения  $t$  от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

где  $a_0, \delta$  - параметры нормального распределения.

Вероятность безотказной работы до первого отказа вычисляется с помощью уравнения вида

$$P(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t-a_0}{\delta}\right), \quad (1.4)$$

где  $\Phi(x)$  - функция Лапласа, значения которой приведены в таблицах математической статистики.

Логарифмически – нормальное распределение описывает случайную величину, значения которой могут быть получены в результате перемножения большого количества незначительных ошибок. Это распределение применяется для обработки результатов ускоренных испытаний некоторых объектов.

Непрерывная случайная величина  $T$  называется распределенной по логарифмически – нормальному закону, если логарифм этой величины распределен по нормальному закону.

Плотность распределения случайной величины  $T$  имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{t \delta_{\Lambda} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - Y_0)^2}{2\delta_{\Lambda}^2}} \quad (1.5)$$

где  $Y_0$  - математическое ожидание логарифма случайной величины;  
 $\delta_{\Lambda}$  - среднее квадратическое отклонение логарифма случайной величины.

Вероятность безотказной работы до первого отказа определяется

$$P(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\ln t - Y_0}{\delta_{\Lambda}}\right), \quad (1.6)$$

где функция  $\Phi(X)$  табулирована.

Распределение Вейбулла занимает центральное место при исследовании характеристик надежности машин. Этому распределению подчиняется наработка до отказа многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, у которых отказ наступает по причине усталостного разрушения.

Непрерывная случайная величина  $T$  называется распределенной по закону Вейбулла, если ее плотность распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t-c}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t-c}{a}\right)^b\right] \quad (1.7)$$

где  $a$  – параметр масштаба;

$b$  – параметр формы;

$c$  – параметр сдвига.

Вероятность безотказной работы до наработки  $t$  находится по уравнению

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-c}{a}\right)^b\right] \quad (1.8)$$

При аппроксимации эмпирических данных возможны случаи, когда одни и те же данные могут быть одинаково успешно описаны несколькими распределениями. Поэтому необходима проверка согласия между распределением случайной величины, полученной по результатам

наблюдений с предполагаемым теоретическим распределением этой величины. Всегда предпочтительнее выбирать то распределение, которое дает наибольшую вероятность согласия.

Решение этой задачи основано на использовании фундаментального положения математической статистики, согласно которому эмпирическая функция распределения сходится по вероятности к теоретической при неограниченном увеличении размера выборки, если выборка принадлежит рассматриваемому теоретическому распределению. Эмпирическая функция распределения при конечном размере выборки  $t_1, t_2, \dots, t_n$  отличается от теоретической, поэтому используется числовая мера расхождения (критерий согласия)  $\Delta_n(F_n(t), F(t))$ . Если  $\Delta_n(F_n(t), F(t)) > C^*$ , то гипотеза о том, что эмпирическое распределение, которому принадлежит выборка  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ , равно  $F(t)$ , не может быть принята. Установление некоторой допустимой вероятности  $\alpha$  отклонения гипотезы о том, что выборка принадлежит распределению  $F(t)$ , позволяет установить пороговое значение  $C^*$  критерия согласия. Вероятность  $\alpha$  называется уровнем значимости, т.е. вероятностью отвергнуть правильную гипотезу. Тогда

$$\alpha = \beta \{ \Delta_n(F_n(t), F(t)) > \Delta \alpha \},$$

т.е.  $\alpha$  - процентная точка распределения  $\Delta_n$  определяет пороговое значение критерия согласия.

Существует несколько разновидностей критериев согласия:

- критерий согласия  $\chi^2$  (хи - квадрат);
- критерий согласия  $\lambda$  (лямбда) Колмогорова - Смирнова;
- критерий согласия Романовского;
- критерий согласия  $\omega$  Мизеса;
- критерий согласия W Шапиро – Уилки.

Рассмотрим более подробно критерий согласия  $\lambda$  (лямбда) Колмогорова – Смирнова, используемый нами в дальнейших расчетах.

Критерий  $\lambda$  (лямбда) Колмогорова – Смирнова используется для проверки гипотезы о нормальности распределения. Максимальное отклонение функции эмпирического распределения от функции теоретического распределения обозначается  $D_n$ .

$$D_n = \max |F_n(t) - F(t)|$$

Вычисляется величина  $\lambda_n = D_n \sqrt{n}$ . Задается доверительная вероятность

$$\gamma = \text{Вер} \{ \lambda_n \leq \lambda_n^* \}$$

того, что отклонение  $F_n(t)$  и  $F(t)$  будет меньше табличной величины  $\lambda_n^*$ , установленной для доверительной вероятности  $\gamma$ . Если уравнение переписать в виде

$$1 - \gamma = \text{Вер} \{ \lambda_n \leq \lambda_n^* \}$$

и вычисленная вероятность  $1 - \gamma$  получается незначительной (меньше  $0,05 \div 0,10$ ), то отклонение эмпирической функции распределения от теоретической неслучайно. Иначе говоря,  $F_n(t)$  плохо согласуется с  $F(t)$ . Если же разность  $1 - \gamma$  велика (больше  $0,3 \div 0,4$ ), то расхождение между  $F_n(t)$  и  $F(t)$  считается несущественным и гипотеза о функции распределения считается согласованной с эмпирическими данными.

Критерий Колмогорова намного проще других критериев, поэтому он чаще используется на практике. Однако его применение осложняется несколькими обстоятельствами. Для сопоставления функции опытного и теоретического распределений необходимо знать значения математического ожидания  $a_0$  и среднего квадратического отклонения  $\delta$  наблюдаемой случайной величины. Но, в лучшем случае, может быть известен только общий вид функции  $F(t)$ , а входящие в нее числовые параметры определяются на основе эмпирических данных [1, 2, 5, 7, 12,13, 14, 15, 27, 29].

### **1.3. Источники информации о надёжности колесных машин**

Надёжность колесных машин оценивают для определения их соответствия установленным требованиям путём сопоставления показателей долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости исследуемого изделия. На основании результатов оценки надёжности разрабатывают мероприятия по совершенствованию конструкции, технологии изготовления или технической эксплуатации автомобилей.

Основной целью сбора информации является своевременное обеспечение полных, объективных и достоверных данных о надёжности дорожных машин и их элементов в эксплуатации. Необходимым условием достижения поставленной цели является организация чёткой системы сбора и обработки информации о надёжности. Эта система должна схватывать организации и предприятия-разработчики, на которых проектируют, машины и разрабатывают техническую документацию; заводы-изготовители; ремонтные предприятия и эксплуатационные организации.

Система сбора и обработки информации о надёжности должна обеспечить своевременное получения полных, сопоставимых и объективных данных о надёжности автомобилей, работающих в различных условиях эксплуатации; оперативную обработку статистических данных и представление результатов в форме, наиболее удобной для анализа надёжности автомобилей; учет и координацию мероприятий по повышению надёжности, проводимых разработчиками, заводами-изготовителями и эксплуатационными организациями.

Характерной чертой эксплуатации автомобилей является их использование в различных климатических зонах, грунтовых условиях и при производстве работ различных видов. Срок службы основных элементов автомобилей достаточно велик. Поэтому, если собирать и обрабатывать информацию, пассивно, без строгого научного обоснования и планирования,

то исследования затянутся на многие годы и в результате не позволят определить показатели надежности с требуемой точностью из-за неоднородности статистических данных.

### **1.3.1. Три основных источника информации.**

Для расчета и прогнозирования надежности необходимо иметь источники информации об изменении показателей работоспособности автомобилей.

Эта информация должна относиться либо к конечным результатам протекающих процессов старения, т.е. к отказам автомобиля и его элементов, либо к оценке процессов повреждения. Последняя является более ценной, так как позволяет осуществлять прогноз поведения изделия в то время как сведения об отказах дают лишь констатацию того или иного уровня надежности.

Прежде чем говорить о содержании информации и достоверности тех сведений, которые должны быть использованы для оценки надежности, рассмотрим источники получения необходимой информации. Основная трудность определения показателей надежности заключается в том, что они оценивают работу автомобилей за длительный промежуток времени, в то время как эти показатели должны быть заложены и во вновь проектируемом автомобиле.

Именно это обстоятельство является «камнем преткновения» для всех исследований в области надежности и заставляет искать пути и методы для прогнозирования поведения изделия, не дожидаясь окончания длительного периода его эксплуатации.

Рассмотрим схему возможных источников информации о надежности машины. Начиная с этапа ее проектирования и до окончания ее эксплуатации (рис. 1.3) при проектировании машины и на основании данных

готового проекта информацию о надежности изделия можно получить лишь расчетным путем включая прогнозирование. Именно качество и достоверность расчетов позволит уже на стадии проектирования заложить в конструкцию необходимый уровень надежности машины.



Рис 1.3.Схема получения информации о надежности машины.

Когда создан опытный образец машины. Становится возможным его испытание на стенде или в эксплуатационных условиях.

Для оценки надежности эти испытания, как правило, должны быть ускоренными, так как их результаты необходимо использовать для внесения соответствующих исправлений в проект серийной машины. То же можно сказать и об испытании серийного образца машины перед ее запуском в производство.

Далее, после некоторого периода эксплуатации серийных машин, начинает поступать информация о возникающих отказах, которые являются, как правило, следствием недостатков конструкции, допущенных из-за различия между реальными условиями ускоренных испытаний и из-за несовершенства методов расчета.

Когда машина проходит запланированные виды ремонта, то содержание ремонтных работ - степень повреждения отдельных узлов,

трудоемкость их ремонта, мероприятия, связанные с контролем и восстановлением выходных параметров машины и др., является тем источником информации, который позволяет судить о надежности машины и ее элементов.

Статистические данные о сроках службы элементов и узлов машины в процессе ее эксплуатации и ремонта позволяет судить о показателях надежности для машин данной модели с учетом различных режимов работы и условий ее эксплуатации, и могут быть использованы при проектировании новых машин.

Сбор и анализ информации о надежности должны проводиться высококвалифицированными специалистами, знакомыми с основами теории надежности и математической статистики, конструкцией. Технологией изготовления дорожных машин и правилами их технической эксплуатации.

Результаты сбора и обработки информации о надежности автомобилей должны обеспечить возможность решения следующих задач:

- 1) нахождение причин возникновения отказов и неисправностей;
- 2) выявление деталей, сборочных единиц и комплектующих изделий, лимитирующих надёжность автомобиля;
- 3) установление и корректировку нормируемых показателей надёжности автомобилей его элементов;
- 4) обоснование норм расхода запасных частей, структуры ремонтного цикла и периодичности проведения технического обслуживания и ремонтов автомобилей
- 5) выявление влияний условий и режимов эксплуатации на надёжность автомобиля;
- 6) определение экономической эффективности мероприятий по повышению надежности автомобилей и его элементов;

Основным источником информации о надежности автомобилей является специально организуемая подконтрольная эксплуатация или

испытания и максимально приближенных к эксплуатационным условиям, оговоренных в “нормативно-технической” документации.

Подконтрольной эксплуатацией называют эксплуатацию заданного числа автомобилей при соответствии с требованиями технической документации, сопровождаемую контролем технического состояния основных элементов каждого автомобиля специально подготовленным персоналом. Организуют и проводят подконтрольную эксплуатацию и эксплуатационные испытания на образцовых эксплуатационных предприятиях, называемых опорными пунктами.

Для всесторонней оценки надежности автомобилей используют различные источники и методы получения информации, основные из которых приведены на рис.1.4



Рис.1.4. Источники информации о надежности автомобиля.

Таким образом, на практике обычно используются три основных источника информации для суждения и возможной потере работоспособности в процессе эксплуатации автомобилей:

Статистическая обработка данных по эксплуатации и ремонту автомобилей;

испытания и надежность, в том числе и ускоренные;

аналитические расчеты и прогнозирование надежности.

Статистические данные о потере автомобильной работоспособности при правильной методике сбора и обработки информации дают достоверные сведения о надежности и долговечности автомобилей данного типа с учетом реальных условий эксплуатации.

Однако накопление достаточного объема информации происходит обычно тогда, когда данная модель автомобиля уже устаревает и не выпускается заводом-изготовителем.

Поэтому эти сведения лишь в весьма ограниченном объеме могут быть использованы для прогнозирования проведения новых автомобилей.

Результаты эксплуатационных исследований нужны в основном для внесения исправлений в слабые места конструкции, но не для суждения о надежности выпускаемых автомобилей.

Ускоренные испытания на безотказность и долговечность дают информацию о новых автомобилях и позволяют сделать определенные суждения о показателях их надежности уже на стадии создания опытных образцов. Однако всякое форсирование процесса потери работоспособности, как правило, искажает реальную картину. Хотя имеется немало методик, позволяющих делать пересчеты с форсированного режима работы автомобилей на обычные, ускоренные испытания дают лишь приблизительную, часто весьма условную картину тех процессов, которые будут протекать в автомобиле при нормальных условиях эксплуатации.

Чем сложнее автомобиль или испытываемый узел, тем труднее сделать пересчет на нормальный процесс ее работы, так как для разных элементов автомобилей форсирование испытаний оказывает неодинаковое влияние на их работоспособность. Обычно, чем меньше степень форсирования

испытаний, тем достовернее результаты, т.е. сводится на «нет» сама идея ускорения получения информации о надежности. Кроме того, эти возможности появляются лишь при создании опытного образца автомобиля. А прогнозировать проведение автомобилей и получить основные показатели надежности желательно уже на стадии ее проектирования.

Аналитические расчеты (включая статистическое прогнозирование) являются тем источником информации о будущем проведение автомобилей, которые по своим возможностям лишены недостатков предыдущих. Только расчетным путем можно судить о надежности будущей автомобиля на стадии ее проектирования, до минимума свести время, необходимое для определения показателей надежности и долговечности изделий и выявить основные взаимосвязи между показателями надежности и параметрами, характеризующими конструкцию, технологию и методы эксплуатации автомобиля.

Законы, полученные на основе рассмотрения физических процессов старения, обладают большой универсальностью. Однако и те закономерности, которые получены эмпирическим путем для более узкого диапазона условий, но представленные в виде аналитических зависимостей, связывающих степень повреждения с параметрами процесса и временем, несут информацию, достаточную для их использования при расчете и прогнозировании надежности изделия [2, 7].

### **1.3.2. Статистическая информация из сферы эксплуатации.**

Если эксплуатационные испытания или наблюдения позволили получить закон распределения времени безотказной работы данного изделия, то определение параметров безотказности не представляет трудностей.

Для этого на основе полученной информации об отказах изделия за период его эксплуатации строится гистограмма (рис.1.5,а), показывающая число возникших отказов в данном интервале времени для большого числа однотипных изделий, работающих в оговоренных условиях. По полученной гистограмме, которая является экспериментальной оценкой плотности вероятности, может быть подобран теоретический закон распределения.

Для проверки соответствия экспериментальных данных высказанной гипотезе о теоретическом распределении, в математической статистике разработаны специальные критерии согласия (критерий хи-квадрат Пирсона, критерий Колмогорова и др.), позволяющие ответить на этот вопрос.

Кроме того, в зависимости от объема экспериментальных данных (объема имеющейся информации) можно оценить точность прогноза. Однако такая схема не является типичной для большинства изделий машиностроения, как это обычно полагают. Она пригодна обычно для ограниченного числа малоответственных элементов машины, для которых допускается работа до их отказа, т. Е. полностью используется их работоспособность. Конечно, полная информация может быть получена при стендовых испытаниях отдельных узлов машины, если их число достаточна для построения гистограммы. Однако такие возможности встречаются в машиностроении достаточно редко и могут иметь место лишь при испытании стандартных и унифицированных узлов (например, подшипников качения).

Типичный случай получения информации об отказах машины в процессе ее эксплуатации показан на рис. 1.5, б.

Если рассматриваются отказы определенного типа для генеральной совокупности из  $N$  работающих изделий, то все сроки службы можно представить в виде вариационного ряда (сроки службы располагаются в порядке возрастания)  $T_1; T_2; \dots; T_n$ .

Однако через некоторый промежуток времени  $t=T_r$  назначается ремонт изделия и поэтому изделий со сроком службы  $T_i > T_r$  их значение не известно.

Таким образом, для  $n$  изделий из данной генеральной совокупности, которые отказали раньше, чем наступил их ремонт, известны сроки службы  $T_1; T_2; \dots; T_n$  и для них можно построить гистограмму (рис.1.5,б). Для остальных ( $N-n$ ) изделий известно лишь, что их сроки службы больше данного значения  $T_r$ .

Часто для оценки надежности по полноценной информации подбирают теоретический закон, который описывает распределения сроков службы в пределах  $0 < t < T_r$ , а параметры закона учитывают и наличные изделия с более высокой долговечностью.

Например, когда статистические данные аппроксимируются экспоненциальным законом распределения, средний срок службы  $T_{ср}$  подсчитывается по формуле.

Второй член учитывает наличие изделий в количестве ( $N-n$ ), о сроке службы которых известно лишь, что  $T_i > T_r$ .

Зная закон распределения, можно рассчитать вероятность безотказной работы для любого периода времени  $0 < t < T_r$ .

Дело заключается в том, что информация об отказах изделий относится обычно к незначительной части (2-5 %) от полного распределения времени безотказной работы изделия. Этой информации недостаточно для суждения

о действительном законе распределения  $f(T)$ . Например, при эксплуатации изделия с более длительным периодом до ремонта сроки службы могут подчиняться и экспоненциальному (кривая 1 на рис. 1.5,б) и нормальному (кривая 2) законам распределения. Поэтому суждение о законе распределения  $T$  по части  $n \ll N$  вышедших из строя изделий (которые не являются репрезентативной выборкой из генеральной совокупности) неправомерно и такие его параметры, которые определяют средний срок службы или значение  $P(t)$  за пределами  $t \gg T_r$ , не отражают объективной действительности.

Полученный закон распределения можно использовать лишь для оценки безотказности изделия за рассматриваемый период времени. Поэтому статистические источники информации о надежности изделий, полученные из сферы эксплуатации, не обладают, как правило, необходимым объемом для их использования при прогнозировании надежности [1, 2].

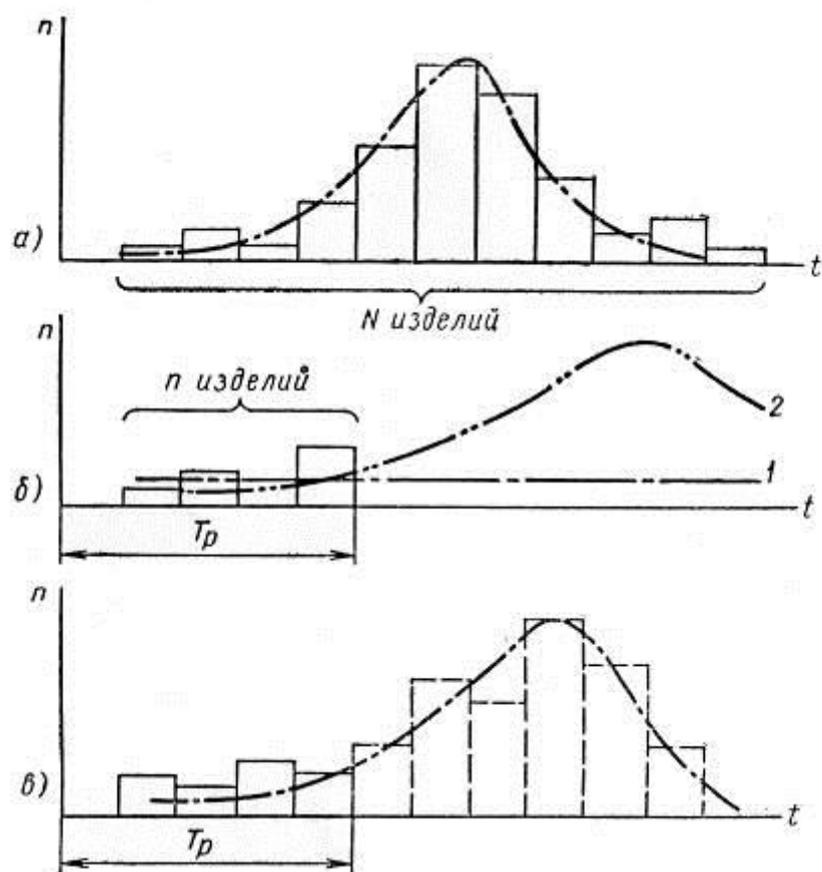


Рис. 1.5. Получение статистической информации об отказах изделий.

### 1.3.3. Статистическая информация из сферы восстановления работоспособности.

Более полная информация о действительном законе распределения сроков службы отдельных элементов может быть получена из сферы ремонта автомобиля.

Для этого необходимо, чтобы при производстве ремонтных работ была бы получена информация, оценивающая степень повреждения (износа), и по

ней потенциальные сроки службы (наработку) отдельных изделий или их элементов (рис.1.5, в). Различные процессы старения приводят к постепенной потере изделием и его элементами работоспособности.

Лишь на определенной стадии развития данное повреждение приводит к отказу. Обычно ремонт изделия производится тогда, когда отказ еще не наступил, но имеется определенная степень повреждения (износа), по которой можно судить о возможном времени наступления отказа. Поэтому схема получения более полной информации о безотказности ремонтируемого изделия выглядит следующим образом (рис.1.6).

Здесь небольшая часть информации  $I_1$  - это данные о сроках службы изделий, отказавших за период  $0 < t < T_p$ , основная часть информации  $I_2$  – это показатели степени повреждения (износа)  $U_i$  изделий, не достигших предельного состояния к моменту  $t = T_p$ .

Вариационный ряд  $U_1; U_2; \dots; U_{N-n}$  дает возможность оценить распределение этих величин  $f(U)$  с достаточно большой точностью и по нему сделать суждение о сопряженном (т. Е. связанном определенной функциональной зависимостью) распределении времени безотказной работы  $f(T)$ . В этом случае параметры данного распределения позволят осуществить прогнозирование надежности изделия, т. Е. судить об изменении вероятности безотказной работы за период времени  $t > T_p$  и оценить правильность выбора данного значения  $T_p$ .

Из сказанного можно сделать выводы о том, что, во-первых, не всякая статистическая информация о надежности изделия достаточна для осуществления прогнозов его работоспособности. Наиболее полная информация может быть получена при использовании сведений о состоянии изделий к моменту их ремонта. Во-вторых, назначенные периоды ремонта (в соответствии с принятой для данного изделия системой ремонта и технического обслуживания) оказывают существенное влияние на показатели безотказности. В-третьих, для построения модели отказа можно на основании

данных о степени повреждения (износа) изделий сделать вывод о характере протекания данного процесса во времени, т.е. оценить функцию  $U(t)$ .

Однако основная информация о функции  $U(t)$  может быть получена на основании исследования физической сущности отказов и представлена в виде аналитических или экспериментальных зависимостей.

Если все исходные данные, необходимые для определения закона  $f(T)$  выражены аналитически, т. е. имеются закономерности для  $U(t)$  с учетом случайного характера данной функции и рассчитано значение  $U_{max}$ , то для оценки потери машиной работоспособности можно применить аналитические методы расчета в прогнозировании [1, 2].

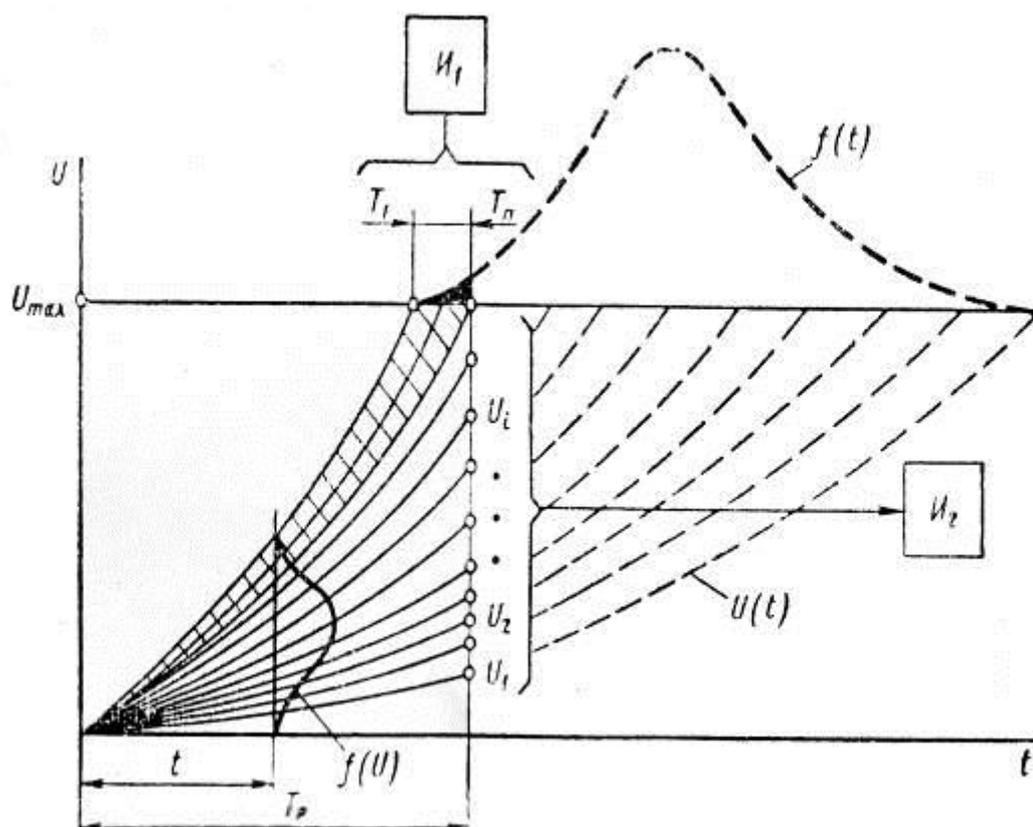


Рис.1.6. Источники статистической информации при эксплуатации И1 и ремонте И2 изделия.

### **1.3.4. Требование к информации о надежности.**

Основными задачами, для решения которых используется информация о надежности изделий, являются:

определение количественных показателей надежности и долговечности изделий;

изучение закономерностей возникновения неисправностей ненадежно работающих деталей и узлов в изделиях и разработка рациональных методов их устранения;

разработка мероприятий по устранению конструктивных и технологических недостатков в процессе проектирования и изготовления изделий;

разработка и совершенствование методов технической эксплуатации изделий;

определение номенклатуры и количества запасных деталей, инструмента и расходуемых материалов;

уточнение технической документации;

разработка методов испытаний изделий на надежность;

разработка методов контроля надежности изделий;

обоснование режима рационального использования и хранения изделий.

Кроме того, информация о надежности должна нести ответы на следующие вопросы:

когда в процессе эксплуатации можно ожидать появления первой неисправности изделия?

во что обойдется ремонт изделия и какова цена простоя из-за неисправностей?

При исследованиях надежности изделий оценивается их работоспособность во времени. В связи с тем, что не представляется возможным

предусмотреть заранее все обстоятельства, приводящие к нарушению работоспособности изделия, нельзя предсказать заранее ни момента, ни места, при которых в изделии может появиться неисправность.

Поэтому сбор, обработка и анализ информации надежности изделий связаны с необходимостью фиксировать и исследовать случайные события: моменты появления неисправностей, причины и обстоятельства потери изделиями работоспособного состояния. Сообщение об одной неисправности не всегда позволяет выявить причины ее возникновения и определить меры, необходимые для устранения подобных случаев в будущем. В результате этого при оценке и анализе надежности приходится иметь дело с большим количеством сообщений о случайных явлениях, для изучения которых используется теория вероятностей и математическая статистика.

Учитывая особенности информации о надежности изделий, можно определить и общие требования к ней, к которым относятся полнота информации, достоверность, однородность, дискретность, своевременность и непрерывность.

**Полнота информации.** Под полнотой информации понимают наличие всех сведений, необходимых для проведения оценки и анализа надежности как изделия в целом, так и всех его узлов и деталей. В первую очередь, это сведения о количестве изделий, во вторую — о количестве наблюдений за каждым событием, существенным для оценки и анализа надежности исследуемого изделия. Информация о работе и неисправностях должна быть полной настолько, чтобы обеспечить решение всех задач, возникающих при разработке, изготовлении и эксплуатации изделия.

**Достоверность.** Совершенно очевидно, что информация о надежности может быть эффективно использована только при строгой достоверности всех сообщаемых сведений, т. е. при правильном отображении объективной действительности. Поэтому в необходимых случаях должны быть

использованы эталонированные датчики объективной информации типа счетчиков, тензометров и других автоматических устройств. Это избавит от излишних затрат времени при сборе информации о надежности изделий и даст уверенность в ее объективности при проведении анализа. Кроме того, достоверность информации зависит от продуманности системы ее сбора и обработки, а также от квалификации лиц, занимающихся сбором сведений о работе и неисправностях изделий.

**Однородность.** Однородность информации предполагает разделение признаков (событий), при которых происходят неисправности в изделиях, на группы, обладающие одним и тем же свойством. Сопоставления, на которых строятся заключения о взаимосвязях между причинами неисправностей и их проявлениями, можно провести только тогда, когда все изучаемые признаки могут быть последовательно разделены на две взаимоисключающие группы. Однородность информации обеспечивается в том случае, если собираемые сведения отражают режимы работы изделия, условия его эксплуатации, правила хранения, транспортирования, качество используемых при ремонте инструментов и материалов, подготовленность обслуживающего персонала и др. При этом необходимо заботиться о том, чтобы она не была избыточной. Излишние, не вызываемые необходимостью сведения, только затрудняют работу по сбору информации, снижают оперативность ее обработки и уменьшают эффективность ее использования.

**Дискретность.** Существенным требованием к информации о надежности изделий является дискретность, т. е. разделение сообщений по отдельным признакам. Это требование необходимо в связи с тем, что надежность изделия характеризуется набором показателей, и для их расчета необходимо подчас использовать одно и то же сообщение, но связанное с разными признаками, при которых происходит неисправность. Так, оценка показателей надежности элементов, составляющих изделие, и

изделия в целом может быть проведена по информации о надежности элементов.

При несоблюдении требований дискретности информация может быть использована только однократно, а для определения других показателей должна собираться заново.

**Своевременность.** Поскольку информация должна использоваться в первую очередь для корректировки процесса изготовления или для принятия мер по устранению недостатков, выявленных на образцах опытной партии при переходе к серийному производству изделий, она не сможет выполнять свое назначение, если не будет своевременной.

**Непрерывность.** Создание непрерывного потока достоверной информации о работе и неисправностях изделий в процессе их испытаний, изготовления серийного образца и эксплуатации - одно из основных требований к системе организации учета и сбора данных о надежности. Это объясняется тем, что сведения, полученные при испытаниях макетного образца и опытной партии, с одной стороны, и при эксплуатации серийно выпускаемых изделий - с другой, должны сопоставляться, чтобы избежать потери значительной части информации, полученной на ранних этапах разработки изделия [1, 2, 7].

## **1.4. Сбор информации о надежности**

### **1.4.1. Общие положения, организация.**

Определение показателей надежности и их анализ связаны с необходимостью проведения сбора информации о работе и неисправностях как в период разработки и проведения испытания изделий, так и в период эксплуатации. Проведение этих работ требует самой тщательной

организации. Особенно это относится к сбору информации о надежности без применения специальных устройств, автоматизирующих процесс сбора.

Большое значение при организации сбора информации имеет разработка форм учета (карточка, паспорт отказа), которые должны отвечать конкретным целям сбора и обработки информации с надежности каждого типа изделий.

Карточки (паспорта) должны включать вопросы, ответы на которые обеспечивали бы получение всех необходимых сведений для полной оценки надежности исследуемого изделия. Но как бы тщательно ни была продумана форма учета, при заполнении ее всегда может возникнуть ряд вопросов, требующих разъяснения. Поэтому одновременно с разработкой формы карточки (паспорта) составляют подробную инструкцию для персонала, ведущего работы по учету информации.

Большинство организаций, проводящих сбор информации о надежности из сферы эксплуатации, используют карточки или паспорта, подобные приведенным на рис.1.7 и 1.8. Карточки применяют при ручной обработке, при машинной обработке более удобны паспорта. Карточки обычно сшивают в блокноты. На карточках блокнота обычно помещают подробную инструкцию по заполнению карточек. По мере заполнения карточки отделяют от блокнота и высылают на место обработки.

В карточке-паспорте о работе и неисправностях изделий отражаются сведения, которые должны дать ответ на следующие вопросы:

Способ применения изделия (временной график работы, количество отработанных станко - часов, характер обрабатываемых материалов и др):

- условия, в которых эксплуатируется (испытывается) изделие;
- пределы изменения характеристик элементов, составляющих изделие;
- возможные причины возникновения неисправностей;
- виды неисправностей;
- условия, при которых возникают неисправности;

- наработка изделия до появления неисправности;
- количество циклов (включений) на момент обнаружения неисправности;
- продолжительность поиска и устранения неисправного элемента;
- типы и количество замененных элементов;
- трудозатраты, необходимые для устранения неисправности.

Наименование организации		
<b>КАРТОЧКА ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ</b>		
Объект испытаний	..... (наименование и марка изделия)	
Вид испытаний	.....	
Условия испытаний	.....	
Количество испытываемых изделий:	.....	
в начале испытаний	.....	
в конце испытаний	.....	
Суммарная продолжительность работы за весь период испытаний	.....	
Шифр отказов:	.....	
а)	.....	
б)	.....	
в)	.....	
Дополнительная информация	.....	
Начало испытаний	Конец испытаний	Испытания проводил
.....	.....	..... (подпись)

Рис.1.7

При механизированном способе обработки, данные, сосредоточенные в таблицах, необходимо представить в цифровой форме. Для этого каждому признаку присваивается условное цифровое обозначение. Это относится в основном к признакам, имеющим описательный характер (причина: внешнее проявление, неисправности, условия эксплуатации, внешние воздействия и др.).

Для представления их в цифровой форме создаются шифры, для чего проводят специальное исследование, которое сводится к выделению существенных признаков и представления их в виде табл. 1.1. Вся информация, используемая для получения характеристик надежности,

подвергается шифрованию. Шифрование может проводиться как на месте учета сведений, так и на месте их обработки. Совокупность всех шифров составляет код.

ДАННЫЕ ОБ ОТКАЗАХ									
Паспорт отказов № _____				Шифр изделия	Децимальный № изделия	Заводской № изделия	Год изготовления	Количество листов	Номер листа
№ п/п.	Дата	Время, ч	Наработка, г	Содержание отказа	Обстоятельства возникновения отказа	Время восстановления, мин	Вид отказа		
1	2	3	4	5	6	7	8		
								1.	
								2.	
								3.	
			(число, месяц, год)					(должность, подпись)	
								(фамилия)	

Рис.1.8

Таблица 1.1

Наименование устройства (системы, узла)	Вид отказа	Код	Вид отказов, исключаемых из расчетов	Код
Механическое оборудование	1. Шум в редукторе выше нормы	01	1. Неисправность вспомогательного оборудования	10
	2. Поломка станины	02		20
	3. Нарушены геометрические размеры	03		
Электрическое оборудование	1. Износ магнитных муфт	04	1. Отказ из-за другой системы	30

Инструмент	2. Замыкание	05	2. Неисправность вспомогательных средств	40
	3. Не включается	06		
	1. Износ инструмента	07	1. Отказ произошел из-за неправильной установки обрабатываемой детали	50
	2. Поломка инструмента	08		

### **1.4.2. Методы сбора информации при эксплуатации автомобилей.**

Сбор информации о надежности автомобилей и выбор метода получения информации зависят от характера поставленных задач и условий эксплуатации. Под условиями эксплуатации подразумевают совокупность факторов, действующих на автомобиль в процессе работы. К условиям эксплуатации относят климатические и дорожные условия, квалификацию обслуживающего персонала, обеспеченность горюче-смазочными материалами и запасными частями и др. Влияние условий эксплуатации на надежность автомобилей довольно существенно. В связи с этим, для объективной оценки уровня надежности автомобиля необходима информация о ее работе в различных климатических зонах, на работах различных видов и в различных режимах использования.

В зависимости от организации использования автомобилей и ухода за их техническим состоянием различают подконтрольную, нормальную и рядовую эксплуатацию. Нормальной эксплуатацией называют эксплуатацию, при которой соблюдают правила использования автомобилей и ухода за ними, отворенные в технической документации. Рядовой эксплуатацией называют эксплуатацию, проводимую с отклонениями от требований технической документации, вызванными, например, необходимостью проведения работ в сжатые сроки или в особо сложных условиях.

Основными методами сбора информации о надежности автомобилей в эксплуатации являются инструментальный метод, метод хронометража; метод периодических наблюдений; метод, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации.

Инструментальный метод позволяет получить объективную информацию в наиболее полном объеме. Информацию этим методом собирают, как правило, в условиях подконтрольной эксплуатации при испытаниях автомобилей. В качестве технических средств сбора информации используют контрольно-измерительную аппаратуру и самопишущие приборы, устанавливаемые на исследуемой машине. Надежность элементов автомобиля в этом случае оценивают по изменению их технического состояния. Основными недостатками этого метода сбора информации являются необходимость оснащения автомобиля дорогостоящей измерительной аппаратурой, высокая стоимость исследований, ограниченный объем выборки наблюдаемых автомобилей и организационные трудности, связанные с установкой аппаратуры и поддержанием ее в исправном состоянии, при проведении исследований в условиях рядовой эксплуатации.

Метод хронометража используют для определения чистого времени работы элементов автомобиля, составляющих рабочего цикла автомобиля и оценки интенсивности использования автомобиля в течение смены, а также таких показателей безотказности и ремонтпригодности, как наработка на отказ, средняя наработка, до отказа, продолжительность операций ТО и ремонта и др. Суть метода заключается в том, что специалист-хронометрист с помощью секундомера фиксирует моменты начала и окончания работы автомобиля или отдельных ее элементов. Для этого можно также использовать приборы, автоматически регистрирующие наработку исследуемых элементов машины. При сборе

информации этот метод широко применяют в сочетании с другими методами.

Метод периодических наблюдений применяют в тех случаях, когда установить постоянные наблюдения за автомобилем (или группой автомобилей) невозможно из-за удаленности объекта. Собирают информацию в этом случае на основании опроса и результатов технической экспертизы, проводимой на объекте. Контролируют техническое состояние автомобиля и опрашивают машинистов периодически с интервалом, который зависит от типа автомобиля, уровня их надежности и характера использования. При планировании периодических наблюдений интервал устанавливают не более средней наработки на отказ машины. Основным недостатком этого метода является низкая достоверность получаемых результатов.

Последний метод сбора информации, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации, применяют весьма широко. При условии добросовестного заполнения технической документации и содержания ее в образцовом порядке с помощью этого метода можно получить исходные данные для определения всех основных нормируемых показателей и надежности. Так, например, по данным нарядов можно определить наработку, технический ресурс или срок службы до капитального ремонта автомобиля. Основным недостатком этого метода, как и предыдущего, является низкая достоверность получаемых результатов.

Для повышения достоверности получаемых результатов при сборе информации целесообразно комбинировать приведенные и методы. Это позволяет получить необходимую информацию в более короткие сроки в более полном объеме. Объединяют информацию, полученную из различных источников и разными способами, с помощью методов математической статистики.

### 1.4.3. Определение числа объектов наблюдений

Случайный характер показателей надежности обуславливает приближенную оценку значений и необходимость достаточного объема информации для их определения. Большое число объектов наблюдений усложняет и удорожает исследование надежности. В связи с этим стремятся, особенно при проведении специальных испытаний, предельно сократить число наблюдаемых машин.

Степень приближения результатов наблюдений группой машин к истинным значениям определяют объемом выборки и оценивают относительной ошибкой и доверительной вероятностью (достоверностью) рассматриваемых величин.

Относительная ошибка  $\delta$  характеризует степень точности определения среднего значения. Ее подсчитывают из соотношения (рис.1.9)

$$\delta = \frac{t_B - t_{cp}}{t_{cp}},$$

где  $t_B$  — верхняя односторонняя доверительная граница;  $t_{cp}$  — среднее значение рассматриваемой величины (наработки до отказа, срока службы и др.).

Аналогично можно определить значение  $B$  с учетом нижнего значения доверительной границы:

$$\delta = \frac{|t_H - t_{cp}|}{t_{cp}}$$

Устанавливая границы значений рассматриваемого параметра ( $t_B$ — $t_H$ ), нельзя исключать возможность получения результата, выходящего за пределы этого интервала. В результате наряду с оценкой точности необходимо указать вероятность получения результата в пределах установленного интервала - доверительную вероятность.

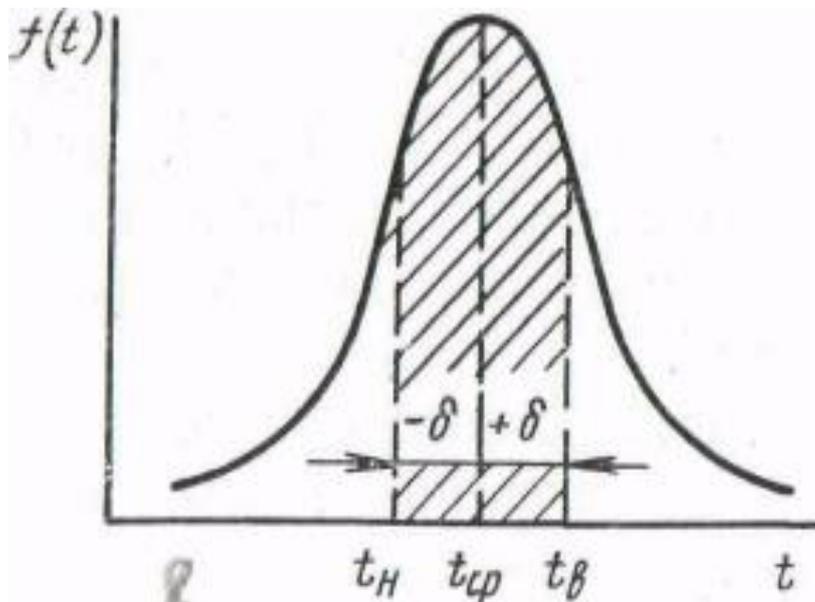


Рис.1.9. Доверительные границы случайной величины.

Различают односторонние и двусторонние доверительные вероятности;

для односторонней вероятности:

$$\beta_n = P(t_{cp} < t_n) \quad \text{и} \quad \beta_n = P(t_{cp} \geq t_n);$$

для двусторонней вероятности:

$$\beta = P(t_n < t_{cp} < t_B).$$

Таким образом, значение доверительной вероятности характеризует точность оценки вероятностного параметра, а доверительная вероятность достоверность его появления в пределах заданной точности.

Связь между  $\delta$ ,  $\beta$  и числом  $N$  наблюдаемых объектов рассмотрим при распределении отказов по нормальному закону.

По теореме о сумме случайных величин дисперсия суммы равна сумме дисперсий выборок:

$$\sigma_t^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_N^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2$$

Для одинаково распределенной величины  $\sigma_t^2 = N\sigma_i^2$  или  $\sigma_t = \sigma_i\sqrt{N}$ . В единицах  $\sigma$  рассеяния средних (нормированное отклонение среднего)

$$t_{\beta} = \frac{t_{cp} - t}{\sigma_t} = \frac{t_{cp} - t}{\sigma_t / \sqrt{N}}$$

Отсюда

$$\frac{t_{\beta}}{\sqrt{N}} = \frac{t_{cp} - t}{\sigma_t}$$

Учитывая, что  $(t_{cp} - t)/t_{cp} = \delta$ , а  $\sigma_t/t_{cp} = V$  (коэффициенту вариации), получим окончательно:

$$\frac{t_{\beta}}{\sqrt{N}} = \frac{\delta}{V}$$

Порядок определения числа  $N$  объектов наблюдений следующий:

1) задают относительную ошибку  $\delta$  среднего значения  $t_{cp}$ , с доверительной вероятностью;

задают ожидаемое значение коэффициента вариации  $V$ ;

2) определяют отношение  $\delta/V$ ;

3) по отношению  $\delta/V$  и выбранной доверительной вероятности в табл. 1 находят соответствующее число  $N$ .

Для решения практических задач следует использовать одно-сторонние доверительные вероятности  $v$ , равные 0,80; 0,90; 0,95; 0,99. При этом значения  $\beta = 0,8$  :- 0,9 выбирают для машин, неожиданный выход из строя которых не влечет за собой тяжелых последствий: человеческих жертв, больших материальных затрат на устранение отказа или потерь от вынужденных простоев. Для высокопроизводительных машин, таких как роторные экскаваторы, самоходные скреперы с вместимостью ковша 25 м<sup>3</sup> и др. значения доверительной вероятности  $v$  принимают в пределах 0,90—0,99.

При неизвестном виде закона распределения значений показателя надежности минимальное число объектов наблюдений определяют по формуле

$$N = \frac{\ln(1 - \beta)}{\ln P(t)}$$

Для этого можно также использовать табличные данные (табл.1.2)

Порядок определения числа объектов наблюдения при неизвестном законе распределения следующий:

1) задаются установленной в нормативной документации минимальной величиной вероятности безотказной работы машины  $P(t)$  в течение времени  $t$ ;

2) выбирают так же, как и в предыдущем случае, значения доверительной вероятности  $\beta$ ;

3) находят (по табл.1.3) для заданных значений  $P(t)$  и в соответствующее число  $N$  объектов наблюдений.

Таблица 1.2

N	Значение $\delta/V$				N	Значение $\delta/V$			
	0,80	0,90	0,95	0,99		0,80	0,90	0,95	0,99
5	0,421	0,686	0,953	1,676	21	0,188	0,289	0,376	0,552
7	0,342	0,544	0,734	1,188	23	0,179	0,275	0,358	0,523
9	0,296	0,466	0,620	0,965	25	0,171	0,264	0,342	0,498
11	0,265	0,414	0,546	0,833	27	0,165	0,253	0,328	0,477
13	0,242	0,376	0,494	0,744	29	0,159	0,244	0,316	0,458
15	0,224	0,347	0,455	0,678	31	0,153	0,235	0,305	0,441
17	0,210	0,324	0,423	0,626	41	0,133	0,203	0,263	0,378
19	0,198	0,305	0,398	0,585	61	0,109	0,116	0,214	0,306

Таблица 1.3

Таблица для определения числа объектов наблюдения.

P(t)	Значение N при $\beta$			
	0,80	0,90	0,95	0,99
0,8	8	10	13	20
0,9	15	21	30	44
0,95	30	40	60	85
0,98	75	120	140	230
0,99	150	220	280	430

**Пример 1.** Определить необходимое число наблюдений тормозных устройств, распределение наработки до отказа которых подчиняется нормальному закону, чтобы получить результаты с доверительной вероятностью  $\beta=0,95$ , относительной ошибкой  $\delta = 0,1$  и коэффициентом вариации  $V=0,2$ .

Определяем соотношение 
$$\frac{\sigma}{V} = \frac{0,1}{0,2} = 0,5.$$

По табл. 1.3. для этого значения и  $\beta = 0,95$  получим  $N=13$ .

После того как по формулам или таблицам определено минимальное число объектов наблюдений, необходимо решить вопрос, какие именно машины должны быть включены в состав выборки. Задача заключается в том, чтобы из общего числа изделий выделить необходимое число машин, близких между собой по наработке, техническому состоянию и условиям эксплуатации. Это необходимо для обеспечения однородности результатов наблюдений.

Если за машинами наблюдают с начала их эксплуатации, задача обеспечения однородности упрощается и сводится к подбору машин, используемых в одной климатической зоне, в сходных грунтовых условиях, на работах одних и тех же видов при одинаковой системе проведения технического обслуживания и ремонтов.

Варианты табличных методов определения числа объектов наблюдений, в том числе автомобилей, агрегатов и их элементов представлены в приложении: табл.1.3, число объектов наблюдения  $N$  при нормальном распределении при односторонней доверительной вероятности.

**Пример 2.** Определить число объектов наблюдения  $N$  для логарифмически нормального распределения при  $\beta=0,90$ ,  $\delta=0,15$  и  $V=0,75$ .

Решение. На рис. 1.10, соответствующем  $\beta = 0,90$ , через ординату со значением  $\delta=0,15$  проводится горизонталь до пересечения с кривой, соответствующей  $V=0,75$ . Из точки пересечения опускается вертикаль на ось абсцисс,  $N=40$ .

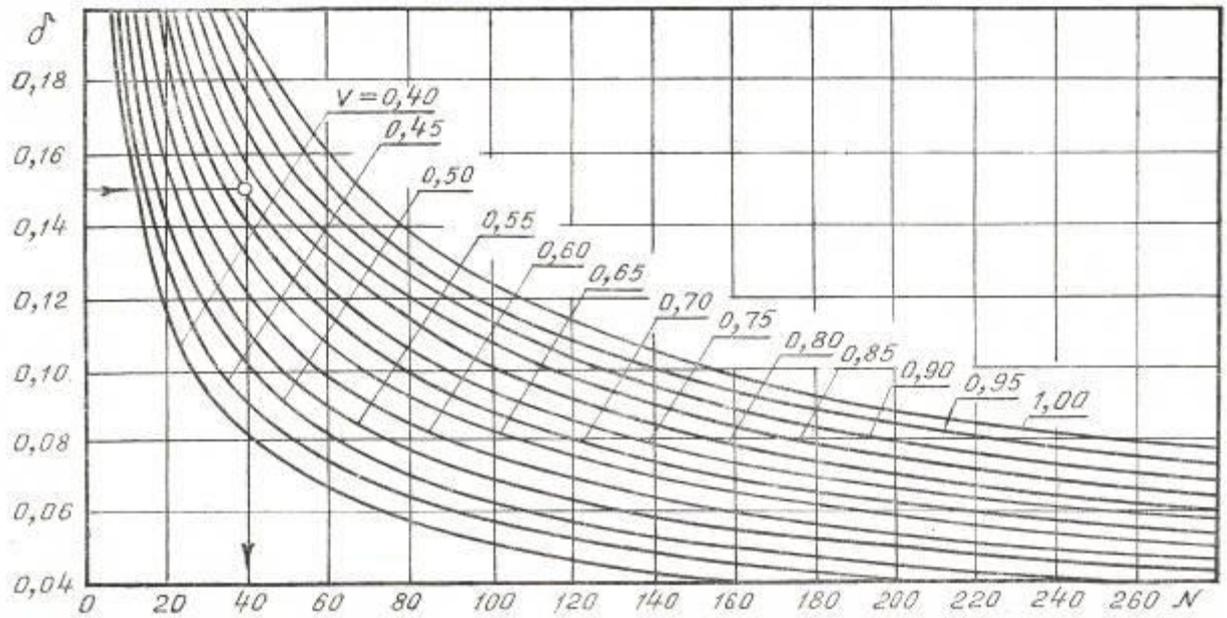


Рис.1.10.

**Пример 3.** Определить число объектов наблюдения  $N$  для распределения Вейбулла при  $\beta=0,80$ ,  $\delta=0,10$ ,  $V=0,50$

Решение. На рис.1.11, соответствующем  $\beta=0,80$ , через ординату со значением  $\delta=0,10$  проводится горизонталь до пересечения с кривой, соответствующей  $V=0,50$ . Из точки пересечения опускается вертикаль до пересечения с осью абсцисс,  $N=23$ .

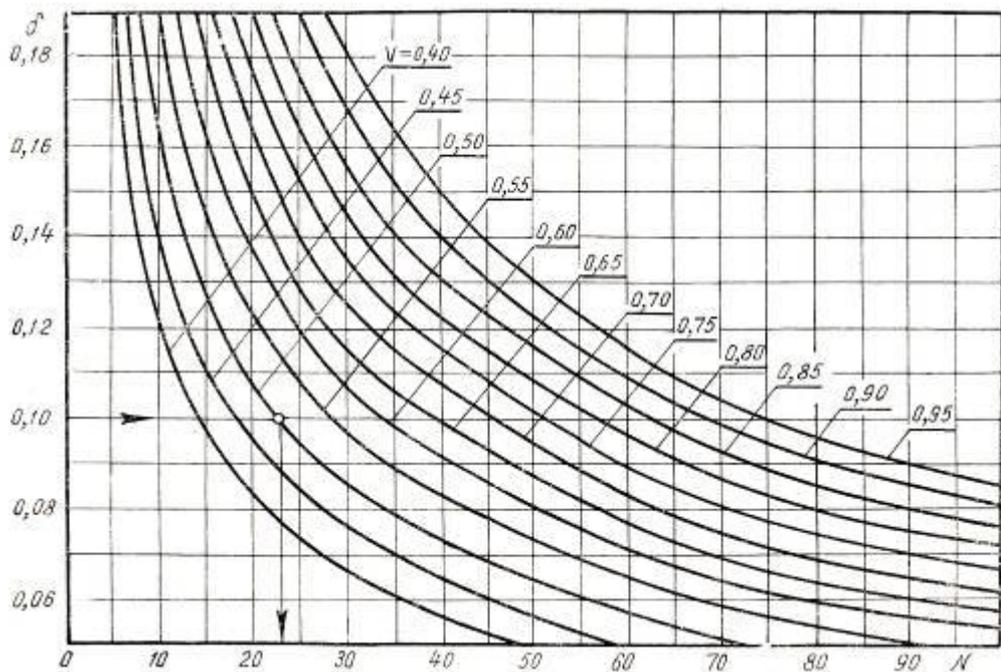


Рис.1.11.

**Пример 4.** Определить число объектов наблюдения  $N$  для экспоненциального распределения при  $\delta=0,15$  и  $\beta=0,90$

Решение. На рис.1.12, через ординату со значением  $\delta=0,15$  проводится горизонталь до пересечения с кривой, соответствующей  $\beta=0,90$ . Из точки пересечения опускается вертикаль на ось абсцисс,  $N=90$ .

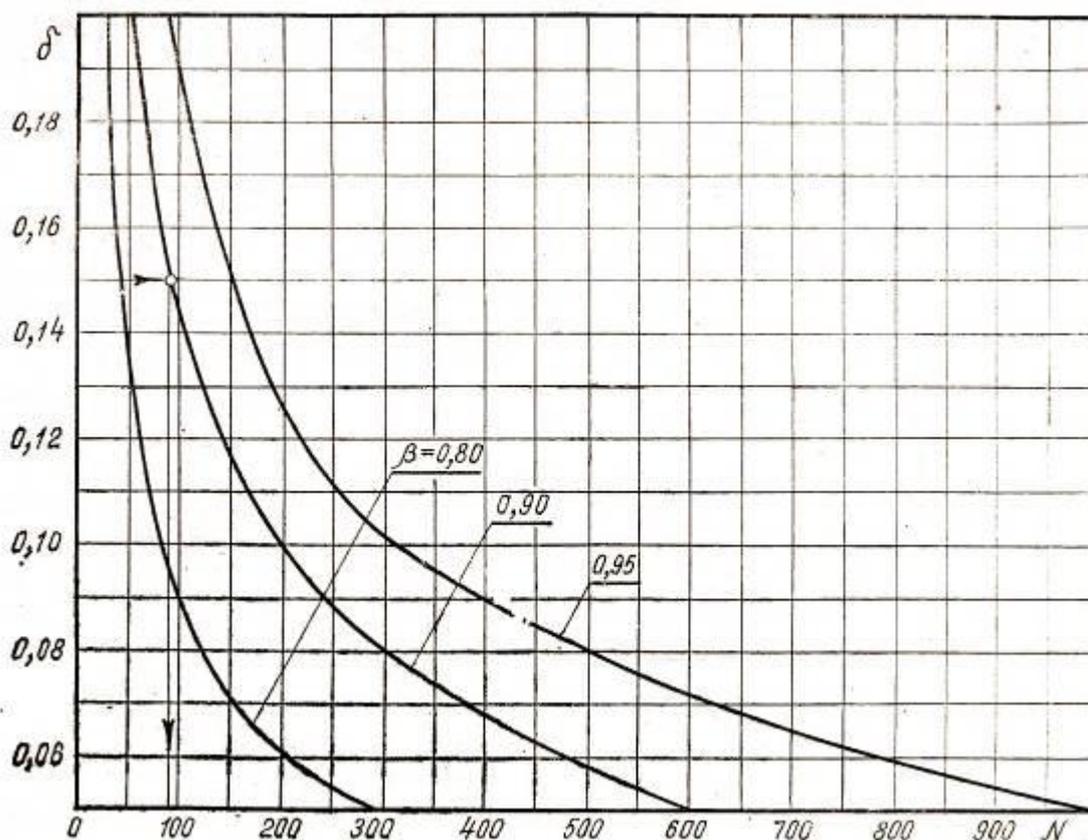


Рис.1.12

## 1.5. Показатели надежности, получаемые по статистическим данным

Практическое решение вопроса выпуска изделий высокого качества базируется на выявлении фактического уровня надежности, оценка которого производится с помощью показателей, получаемых по определенным математическим зависимостям. Следует отметить, что применение тех или иных математических зависимостей для оценки показателей

надежности изделий имеет свои особенности. К числу таких особенностей относится необходимость четкого разделения исследуемых изделий на два класса: ремонтируемые и неремонтируемые.

К ремонтируемым относятся такие изделия, которые в случае возникновения в них неисправности могут быть восстановлены в процессе эксплуатации, к неремонтируемым - изделия, которые в случае возникновения неисправности не могут быть восстановлены в процессе эксплуатации или не подлежат ремонту.

Примером ремонтируемых изделий являются станки, тракторы, буровые установки, электронно-вычислительные машины, примером неремонтируемых изделий - подшипники, поршневые кольца, полупроводниковые приборы.

При оценке количественных показателей надежности основными величинами, участвующими в расчетах, являются число отказов и величина наработки.

Показатели надежности изделия не могут быть измерены непосредственно. Показатели, полученные по статистическим данным, являются величинами случайными. Поэтому возникает необходимость, на основании значений, которые принимают случайные величины, найти статистические оценки некоторых параметров. Оценки должны обладать определенными свойствами: несмещенности, состоятельности и эффективности. Указанными свойствами обладают средние арифметические величины. Рассмотрим некоторые из показателей надежности.

Одним из основных показателей надежности неремонтируемых изделий является средняя наработка до отказа ( $T_{ср}$ ), т. е. среднее значение наработки одного изделия в партии от начала учета до первого отказа. Этот показатель определяется по формуле

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где  $t_i$  - значение наработки до первого отказа;

$i$  - номер изделия в партии;

$n$  - количество всех изделий в партии.

Другим показателем надежности неремонтируемых изделий является интенсивность отказов  $\lambda(t)$ —неремонтируемых изделия, отказавших в единицу времени, при условии, что отказавшие изделия не заменяются исправными.

Интенсивность отказов определяется для малых промежутков времени по формуле

$$\lambda_i = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i)\Delta t_i},$$

где  $\Delta n_i$  -число отказов за промежуток времени  $\Delta t_i$  ;

$N$  -начальное число изделий;

$n_i$  - общее число отказавших изделий к началу рассматриваемого промежутка времени.

Построенная по этим значениям плавная кривая даст функцию интенсивности отказов  $\lambda(t)$  в зависимости от времени наработки. Для ремонтируемых изделий одним из основных показателей надежности является наработка на отказ  $T$ , т. е. среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами:

$$T = \frac{T_n}{n}$$

где  $T_n$  - наработка от начала сбора данных до первого отказа, между отказами и от последнего отказа до момента поступления сведений на обработку (для многих видов изделий величина  $T_n$  может быть определена как разность между значением наработки к моменту

окончания сбора статистических данных и значением наработки на начало сбора);  $n$  - число отказов за время сбора данных.

Другим показателем надежности ремонтируемых изделий является параметр потока отказов с одной из простейших формул его определения имеет вид:

$$\omega = \frac{1}{T}$$

Вероятность безотказной работы неремонтируемых изделий  $P(t)$ , т.е. вероятность того, что при тех же условиях эксплуатации, при которых получены данные, и за такой же период времени не произойдет отказ, можно определить по формуле

$$P(t) \approx \frac{N(t)}{N_0}$$

где  $N(t)$  - число изделий, работоспособных к моменту времени  $t$ ;  $N_0$  - число новых изделий, одновременно поставленных на испытания.

Для ремонтируемых изделий вероятность безотказной работы от начала сбора данных до интересующего нас момента времени  $t$  можно рассчитать по формуле

$$P(t) \approx 1 - \frac{n(t)}{N}$$

где  $n(t)$  - число изделий, имевших хотя бы один отказ за период времени от 0 до  $t$ ;

$N$  - число изделий, по которым собрана информация. Если изделие состоит из нескольких устройств, по которым определены параметры потока отказов, общий параметр потока отказов определяется по формуле

$$\omega_N = \sum_{i=1}^N \omega_i$$

где  $N$  — число устройств в изделии;

$\omega$  — параметр потока отказов  $i$ -го устройства.

При наличии информации о надежности нескольких однотипных изделий наработку на отказ можно определить по формуле

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

где  $N$ ;— суммарная наработка  $i$ -го изделия;

$n_i$ - суммарное число отказов  $i$ -го изделия;

$N$  - количество однотипных изделий.

Показателем надежности ремонтируемого изделия, получаемым по статистическим данным, является также среднее время, затраченное на отыскание и устранение одного отказа. Обычно этот показатель определяют без учета времени, затраченного на устранение отказов при проведении профилактических работ. Его называют средним временем восстановления  $T_{\text{в}}$  и определяют по формуле

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{в}i}}{n}$$

где  $n$  - количество отказов;

$t_{\text{в}i}$  - время восстановления изделия после  $i$ -го отказа;

$$t_{\text{в}i} = t_{\text{о}i} + t_{\text{у}i}$$

$t_{\text{о}i}$  - время на отыскание  $i$ -го отказа;

$t_{\text{у}i}$  - время на устранение  $i$ -го отказа.

При наличии в ремонтируемом изделии нескольких устройств среднее время восстановления может быть рассчитано следующим образом:

$$T_{\text{в}} = T \sum \omega_i T_{\text{в}i}$$

Вероятность того, что ремонтируемое изделие будет работоспособным в любой момент времени, определяют по формуле

$$K_{\text{г}} = \frac{T}{T + T_{\text{в}}}$$

где  $K_{\text{г}}$  - коэффициент готовности;  $T$  - наработка на отказ;

$T_{\text{в}}$  — общее время, затраченное на отыскание и устранение отказов и неисправностей.

Коэффициент готовности ( $K_{\text{г}}$ ) означает вероятность того, что изделие будет работоспособным в произвольный момент времени в промежутке между плановыми техническими обслуживаниями.

По статистической информации можно определить также коэффициент восстановления ресурса ( $C_{\text{р}}$ ) как отношение ресурса капитально отремонтированного изделия к среднему ресурсу того же изделия до капитального ремонта.

Для ремонтируемых изделий рассчитывается коэффициент технического использования (т.и), который представляет собой долю наработки изделия (в час) за период сбора данных к сумме наработки и времени всех простоев, использованных на техническое обслуживание и текущие ремонты за тот же период. Коэффициент технического использования определяют из выражения

$$T_{\text{т.и.}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{и}}}{\sum_{i=1}^n T_{\text{и}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{т.о.и}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{р}}}$$

где  $T_{\text{т.и}}$  - количество изделий, по которым собиралась информация;

$T_{\text{би}}$  — время наработки с  $i$ -го изделия;  $T_{\text{т.о.и}}$  - время технического обслуживания  $i$ -го изделия;  $T_{\text{р}}$  - время ремонта  $i$ -го изделия [1, 2, 7, 13, 27, 29].

## **1.6. Характер эксплуатационных отказов автомобиля**

### **1.6.1. Особенности автомобиля как изделия.**

При проектировании многих машин приходится учитывать их особенности, важные для обеспечения надежности. Некоторые из них являются достаточно общими. Например, чем производительнее машина, тем важнее её безотказность и долговечность; если машина является неотъемлемой частью при обеспечении сложного технологического процесса и её отказ нарушает ход этого процесса, то безотказность проектируемой машины – одно из важнейших требований. Кроме того, существуют и частные особенности, которые также важно учитывать конструктору.

Одни особенности облегчают обеспечение надежности, другие обуславливают повышение к ней требований. Ниже указаны особенности, облегчающие обеспечение надежности.

1. Если автомобиль – машина единообразного назначения и массового использования, то отказ отдельных автомобилей обычно не вызывает отказа транспортного процесса в целом.

2. В тех случаях когда автомобиль выполняет специальные функции и не попадает под условия предыдущего пункта, различные условия его использования, могут положительно влиять на показатели надежности, повышая их. Например, специализированные автомобили могут иметь меньшие суточные и годовые пробеги (пожарные автомобили). То же относится к автомобилям, находящимся в индивидуальном пользовании.

3. Возможность обеспечивать повышенную надежность созданием резерва специализированных автомобилей (скорой помощи) или тем более общего назначения.

4. Автомобиль – ремонтируемое изделие, которое может восстанавливаться по агрегатам, узлам или деталям в различных условиях – от ремонтных мастерских до специализированных заводов. Это позволяет

поддерживать значительные ресурсы агрегатов, а для автомобиля обеспечивать необходимые ресурсы.

5. Автомобиль – изделие, которое проектируется, как правило, в условиях четкой преемственности: по прототипам и их агрегатам имеются материалы и опыт конструирования, испытаний макетов и образцов, исследовательских работ.

6. Автомобили включаются, как правило, в систему планово предупредительного обслуживания. Это создает условия накопления достоверной и разносторонней информации об их эксплуатационной надёжности.

Приведённые ниже особенности автомобиля затрудняют обеспечение его надёжности.

1. Автомобиль – сложное изделие, насчитывающее тысячи деталей не только механических, но также гидравлических, пневматических и электрических систем и агрегатов.

2. Автомобиль – это машина с ярко выраженными динамическими процессами, сопровождающимися значительными (механическим, тепловым, электрическим и т.п.) нагрузками деталей и рабочих поверхностей.

3. Сложность конструкции автомобиля приводит к тому, что в его изготовлении участвует большое число заводов – сотни смежных предприятий поставляют заводу – изготовителю металл и другие материалы, комплектующие детали, узлы и агрегаты, неисправности и отказы которых увеличивают число причин возможной утраты исправного состояния и работоспособности выпускаемых автомобилей.

4. Обычно автомобиль – машина массового производства, что налагает свои ограничения, например: необходимость в высокой производственной стабильности, поскольку любая ошибка в проектировании, изготовлении, повторяется сотни и тысячи раз ежедневно; требование ограничения стоимости, в частности применяемых материалов и технологий;

необходимость контроля (управления) организации производства не только на основном заводе, но и на заводах – поставщиках; зависимость производственной надёжности выпускаемых автомобилей от большого числа рабочих различной квалификации.

5. Условия эксплуатации автомобиля носят случайный характер и имеют вероятностные характеристики дорожных условий, скоростей движения, массы перевозимого груза, режима движения.

6. Особенности нагружения автомобиля состоят в том, что меняющиеся режимы и условия движения определяют для разных агрегатов и систем автомобиля различные режимы работы. Причем надёжность различных агрегатов и систем зависит от условий эксплуатации.

7. При достаточно интенсивной эксплуатации (грузовые автомобили, автобусы, такси и т.п.) автомобиль, вследствие замен агрегатов, превращается в машину без определенного возраста, состоящую из стареющих агрегатов и узлов.

Качество конструкции автомобилей и их элементов (агрегатов, узлов, деталей) определяется сопоставлением присущих им свойств с качественными требованиями, предъявляемыми к этим свойствам. Эти свойства автомобилей и их элементов во многом закладываются в процессе проектирования, а проявляются затем и в производстве и в эксплуатации автомобилей.

Основные требования, предъявляемые к конструкции автомобиля органами стандартизации, предприятиями-изготовителями, эксплуатирующими организациями, ремонтными предприятиями, показаны в таблице 1.4.

Учитывая широкую сферу применения автомобилей, долговременность использования, самые различные условия эксплуатации, широкую гамму требований, предъявляемых различными организациями, новые конструкции

автомобилей должны обладать характеристиками, которые в максимальной степени удовлетворяли бы этим требованиям.

В техническом отношении автомобиль должен отвечать функциональному назначению и иметь требуемые параметры мощности, грузоподъёмности, скорости и т.д., обладая при этом необходимой надёжностью.

Процесс конструирования – процесс поиска компромиссных решений. Стремясь удовлетворить одни требования, неизбежно приходится поступиться другими. Так, стремление снизить массу конструкции для повышения показателей использования собственной массы, топливной экономичности и других важных эксплуатационных показателей может привести к снижению безотказности и долговечности конструкции.

Таблица 1.4

<b>Предъявитель требований</b>	<b>Основные требования</b>
Органы стандартизации	Соответствие конструкции разработанным параметрическим рядам. Соответствие конструкции государственным, отраслевым стандартам. Соответствие конструкции дорожным ограничениям. Конструкторская унификация агрегатов, узлов, деталей.
Эксплуатирующие организации	Повышение эксплуатационной скорости. Повышение топливной экономичности. Повышение коэффициента использования грузоподъёмности. Повышение безотказности и долговечности конструкции. Сокращение трудоёмкости ухода и обслуживания. Обеспечение безотказности и комфорта водителя и пассажиров. Приспособленность к климатическим условиям.
Ремонтные предприятия	Обеспечение ремонтпригодности конструкции. Блочность конструкции. Сокращение номенклатуры запасных частей.
Предприятия изготовители	Соответствие конструкции объёмам выпуска, применяемой технике и организационным условиям.

	<p>Сокращение материалоемкости, трудоёмкости и себестоимости изготавливаемой машины. Конструкторская и технологическая приемственность</p>
--	--

Включение в конструкцию, например, гидроусилителя рулевого управления, оборудования для обогрева кабины, травмобезопасности руля и др., приводя к улучшению условий работы водителя, повышению комфортабельности, неизбежно повышает себестоимость автомобиля и в то же время понижает его безотказность [1, 2, 6, 7, 27].

### **1.6.2. Анализ эксплуатационной надежности автомобилей**

В зависимости от физической сущности явлений и внешнего характера проявления отказы деталей автомобиля делятся на постепенные и внезапные. Следует отметить, что внешний признак характера отказа в одних случаях можно сравнительно легко контролировать (изнашивание, потеря упругости), а в других случаях для контроля требуются сложные приборы (усталостная поломка, коррозионное разрушение) или вообще контроль невозможен. Поэтому деление отказов на постепенные и внезапные часто носит условный характер. Однако такое деление позволяет организовать целенаправленное изучение закономерностей появления постепенных отказов и на этой основе разрабатывать и осуществлять систему технического обслуживания и предупредительных ремонтов с использованием средств и методов диагностирования состояния узлов и агрегатов автомобиля. Возможность разработки этих методов определяется тем, что постепенный отказ характеризуется закономерным изменением параметра, определяющего работоспособность узла или агрегата за время, предшествующее отказу.

По причинам появления отказы целесообразно делить на конструкционные, технологические или производственные и эксплуатационные, что дает возможность осуществлять мероприятия на

соответствующих этапах создания автомобиля: конструирование, производство и эксплуатация. Однако нередко возникает ситуация, когда трудно однозначно ответить на вопрос, по какой причине произошел отказ изделия, так как нарушение работоспособности вызвано рядом обстоятельств, например, недостатками конструкции и технического обслуживания. В таких случаях отказы относят к той группе, причина которой превалирует, либо такие отказы учитывают отдельно.

В ряде случаев оправданно деление на группы в зависимости от последствий, вызываемых отказами (трудоемкость работ по восстановлению, расход запасных частей, простой автомобиля и др.), а также в зависимости от влияния на безопасность движения. Такое деление отказов позволяет обосновать необходимость внедрения средств механизации с целью снижения трудоемкости ремонтных работ, организация снабжения запасными частями и введение предупредительных ремонтов для деталей, влияющих на безопасность движения.

Рассмотрим в качестве примера виды отказов деталей грузовых автомобилей грузоподъемностью 8 т, полученные при эксплуатационных испытаниях на пробеге 200 тыс. км с начала эксплуатации (табл.1.5) [6].

Таблица 1.5

Виды отказов деталей автомобилей грузоподъемностью 8т.

Характер отказа	Кол-во отказа %	Характер отказа	Кол-во отказов %
Износ	49,4	Проседание (потеря упругости)	0,8
Обрыв, срыв, разрыв	11,3	Прокол	0,7
Закоксовывание	8,3	Нарушение изоляции (электрооборудование)	0,6
Трещины	7,8	Вытягивание	0,4
Поломки	5,8	Заклинивание, заедание	0,4
Прогар, подгорание, перегорание	5,7	Погнутость, изгиб	0,4
Замыкание(электрооборудование)	2,6	Смятение, скручивание	0,4

Выкрашивание, задиры	1,9	Коррозионное разрушение	0,3
Ослабление крепления	1,6	Перетирание	0,3
Срез, срывы резьбы	1,2	Засорение (отложение накипи, смол и др.)	0,1
		Итого	100

По данным, приведенным в табл. 1.5, видно, что в рассматриваемых условиях основное количество отказов (49%) вызвано износом рабочих поверхностей деталей. Много также отказов (17,1%) связано с повреждениями (обрывы, срывы, разрывы, поломки), закоксовыванием (8,3%), трещинами (7,8%) . Такое соотношение различных видов отказов вызвано тем, что детали автомобиля как сложного изделия работают в различных условиях и неодинаково нагружены. Это можно проследить по характеру отказов агрегатов и систем автомобиля (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Виды отказов деталей по агрегатам и системам автомобиля.

Характер отказа	Двигатель	Сцепление	Коробка передач	Карданная передача	Задний мост	Передний мост, подвеска	Рулевое управление	Тормозные системы	Электрооборудование	Карбина, платформа
Износ	47,2	83	65,3	97,6	72,9	58,2	79,3	49,8	6,2	46,8
Прогорание, подгорание	18,8								48,2	
Закоксовывание	13,5									
Поломка	2,6	4		2,4		34,5	2,6	9	13,1	48,2
Потеря упругости	2,8					1,3		1,7		1,5
Трещина	4,2	1	9,3		2,4	1,6		2,1		
Выкрашивание, задиры	1,7		21,3		22,4					
Вытягиван	9,1	11					9,1	35,3		

ие, разрыв										
Коробле- ние погну- тость		1					6,5			
Срез,смят ие,срыв			4,1		2,3	4,4	2,5			
Коррозия	0,1							2,1	2,8	3,5
Нарушени е изоляции									17,4	
Выпала- ние актив- ной массы									12,3	
Итого	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Рассматривая отказы агрегатов и систем автомобиля, приведенные в табл. 1.6 следует отметить, что, например, для двигателя характерно изнашивание (45% отказов), а также подгорание и прогорание деталей (39% отказов) Отказы из-за износа вызваны недостаточной износостойкостью таких деталей как вкладыши подшипников и шейки коленчатого вала, гильзы и поршни цилиндров, поршневые кольца, пальцы и др. Прогоранию подвержены, в основном, прокладка головки цилиндров и поршни, а подгоранию – клапаны. Эти отказы возникают из-за различных причин: недостатков конструкции газового стыка блока и головки цилиндров; низкого качества материала прокладки; низкого качества изготовления и сборки (несоблюдение размеров выступающей части гильз над плоскостью разъема блока, коробление, головки, блока, не параллельность плоскостей разъема); несоблюдения правил технического обслуживания и ремонта (несвоевременная подтяжка крепления, неравномерность затяжки, несоблюдение моментов затяжки). Другие виды отказов (потеря упругости, трещины, поломки и т.д.) связаны в большинстве случаев с отдельными нарушениями технологии изготовления деталей.

Так, выкраивание антифрикционного слоя вкладыша подшипника коленчатого вала (рис.1.13) происходит в результате слабого сцепления стальной ленты с алюминиевым слоем.

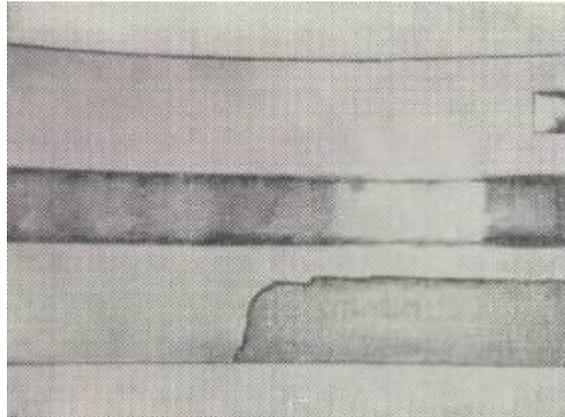


Рис.1.13.Выкрашивание антифрикционного слоя вкладыша подшипника коленчатого вала двигателя.

По системе питания характерными отказами являются износ и закоксовывание деталей. Последний вид отказа относится к распылителям форсунок и связан с высокой температурной загруженностью деталей, неудовлетворительным качеством топлива, нарушением регулировок топливной аппаратуры. Остальные отказы, как и по двигателю, носят случайный характер.

Отказы системы выпуска газов вызваны, как правило, прогоранием выпускных труб, глушителя, прокладок фланцев выпускных труб из-за постоянного действия во время работы двигателя высокой температуры выхлопных газов.

В системе охлаждения из-за износа отказывают детали насоса (подшипники, сальниковое уплотнение), а из-за вытягивания – ремни привода насоса и тросики управления шторкой радиатора. Другие отказы встречаются значительно реже и имеют случайный характер.

Для узлов и деталей трансмиссии основным видом отказов является износ: 83% отказов сцепления, 65,3% отказов коробки передач, 97,6% отказов карданной передачи и 72,9 % отказов заднего моста. Однако характер износа этих деталей различный. Так, изнашивание деталей сцепления, нажимного диска, маховика, сопровождающееся трением скольжения с выделением большого количества тепла, приводит не только к изменению

размеров детали, но и к появлению трещин (рис.1.14) Несвоевременное выявление таких трещин иногда приводит к разрывам нажимного диска (аналогичное явление свойственно и для маховика коленчатого вала), что может вызвать тяжелые последствия – имели место случаи травмы людей при движении автомобиля. Аналогично ведомый диск сцепления из-за теплового воздействия при трении подвергается не только изнашиванию, но и короблению.

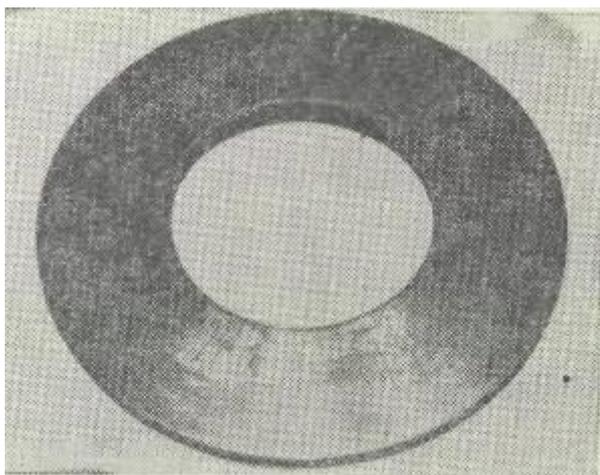


Рис.1.14. Трещины нажимного диска сцепления.

Для зубчатых зацеплении коробки передач и заднего моста имеет место иной вид изнашивания - постепенное уменьшение размера зубьев и выкрашивание при усталостном изнашивании (рис. 1.15) а также поломки зубьев при ударах во время переключения передач (рис. 1.16).



Рис.1.15. Износ и выкрашивание зубьев шестерни.

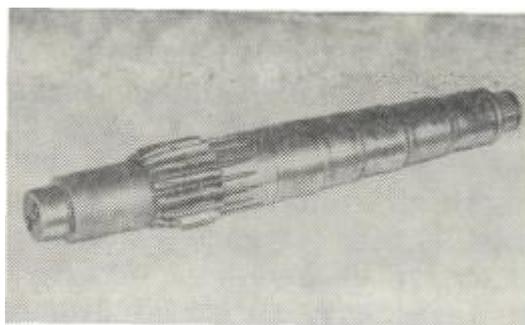


Рис.1.16. Поломка зубьев шестерни вала.

Изнашивание крестовин карданного вала, протекающее при больших нагрузках и малых перемещениях, сопровождается появлением на поверхности трения углублений – следов вдавливания иголок подшипника, а также характерных «поясков» в местах контакта сальниковых уплотнений (рис. 1.17) .

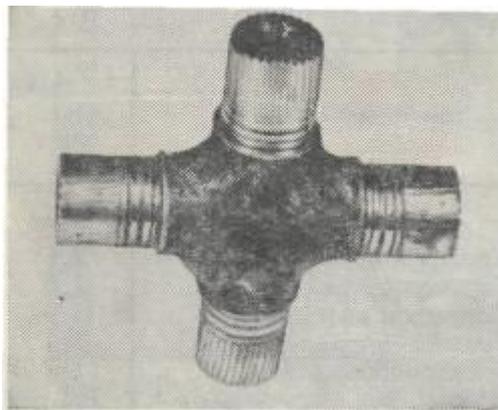


Рис.1.17. Характер износа шипов крестовины карданного вала.

Для деталей подвески автомобиля в отличие от трансмиссии преобладают отказы из-за поломок (65,6%). Этот вид отказа относится в основном к рессорам, поломки которых чаще всего имеют усталостный характер, а также связаны с такими случайными факторами, как превышение допустимой нагрузки и движение на высоких скоростях по неровным дорогам.

Основным видом отказа переднего моста, колес и ступиц является износ деталей (98,6 %). Этот отказ характерен для деталей шкворневых соединений, подшипников ступиц колес (рис.1.18) и шин. Отказы других деталей переднего моста носят случайный характер.

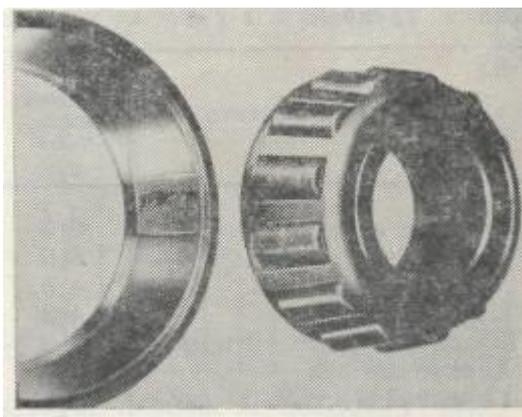


Рис.1.18. Износ наружного кольца и роликов подшипника.

Износ является основным видом отказа для деталей рулевого управления (шаровые пальцы, сухари, рулевой механизм, гидроусилитель) и тормозов (накладки, барабаны, детали компрессора). Много отказов также связано с вытягиванием и разрывами – это отказы ремней привода насоса гидроусилителя рулевого привода, компрессора и тросов стояночных тормозных механизмов.

По электрооборудованию преобладают отказы из-за подгорания контактов и перегорания ламп, катушек. Нарушение изоляции и замыкание связано в основном с электропроводкой, а выпадение активной массы относится к аккумулятору.

Более половины (56,4%) отказов кабины вызвано износом деталей. Это связано с тем, что из-за износа часто менялись детали опоры кабины: втулки кронштейнов кабины, детали запорного механизма. Остальные отказы (прогнут ось, трещины, поломки, коррозия) являются типичными для кабины и связаны со случайными факторами, в основном повреждениями при эксплуатации. По этой же причине произошли поломки деталей платформы (преобладают поломки из-за небрежной погрузки груза).

Агрегаты и системы автомобиля имеют существенное различие не только по характеру отказов и причинам их появления, но и по их числу (рис.1.19).

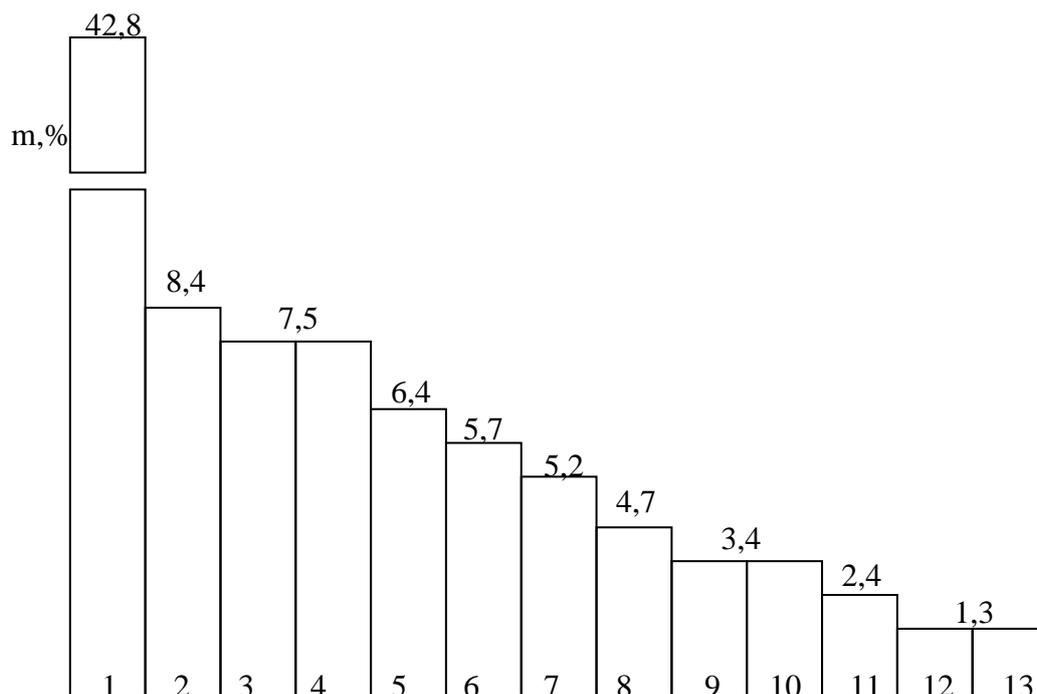


Рис.1.19. Распределение числа отказов по агрегатам автомобиля; % :

1- двигатель; 2- тормозные механизмы; 3- коробка передач;  
 4-электрооборудование; 5- сцепление; 6- колеса и ступицы; 7- задний мост; 8- подвеска автомобиля; 9- карданный вал; 10- рулевое управление; 11- платформа; 12- кабина; 13- передний мост.

Как видно на рисунке имеется существенная разница в безотказности агрегатов и систем автомобиля.

Так, тормозные механизмы, занимающие второе место по числу отказов, имеют в 5,1 раза меньше отказов, чем двигатель, а передний мост - в 33,7 раза меньше, чем двигатель. Такое различие в безотказности агрегатов автомобиля вызывает необходимость проведения целенаправленной работы по снижению числа отказов, в первую очередь, двигателя и его систем. Однако при окончательном выборе первоочередного объекта для осуществления мероприятий по повышению безотказности недостаточно еще такого показателя, как число отказов. Для этого необходимо рассмотреть влияние отказов на трудовые и стоимостные затраты, идущие на их устранение. Очевидно, что определенная функциональным назначением

связь различных агрегатов, систем, узлов и деталей автомобиля создает объективные трудности при обнаружении и устранении отказов.

Это является причиной того, что трудоемкость работ по устранению отказов существенно отличается по агрегатам (табл.1.7).

Таблица 1.7

Средняя трудоемкость работ по устранению одного отказа.

Наименование агрегата	Трудоемкость чел-ч	Наименование агрегата	Трудоемкость чел-ч
Коробка передач	6,3	Кабина	2,8
Сцепление	5,6	Колеса и ступицы	2,2
Задний мост	4,3	Тормозные механизмы	1,8
Платформа	4,3	Подвеска автомобиля	1,6
Двигатель и его системы	3,9	Рулевое управление	1,4
Карданный вал	3,3	Электрооборудование и приборы	1,2
Передний мост	2,9		
		В среднем по автомобилю	3,2

Наибольшую среднюю трудоемкость работ по устранению одного отказа имеют агрегаты трансмиссии - коробка передач, сцепление, задний мост, а наименьшую – электрооборудование (в 5,3 раз меньше, чем у коробки передач ). Такое различие в трудоемкости работ по устранению одного отказа оказывает влияние на перераспределение мест агрегатов по суммарной трудоемкости работ (рис.1.20).

По этому показателю, как и по числу отказов. Двигатель занимает первое место, хотя при этом средняя трудоемкость работ по устранению одного отказа у него в 1,6 раза ниже, чем у коробки передач. Коробка передач с третьего места по числу отказов переместилось на второе место по трудоемкости, а электрооборудование – с четвертого на десятое и т.д. При характеристике последствий, вызываемых отказами, существенную роль играет расход запасных частей на устранение отказов.

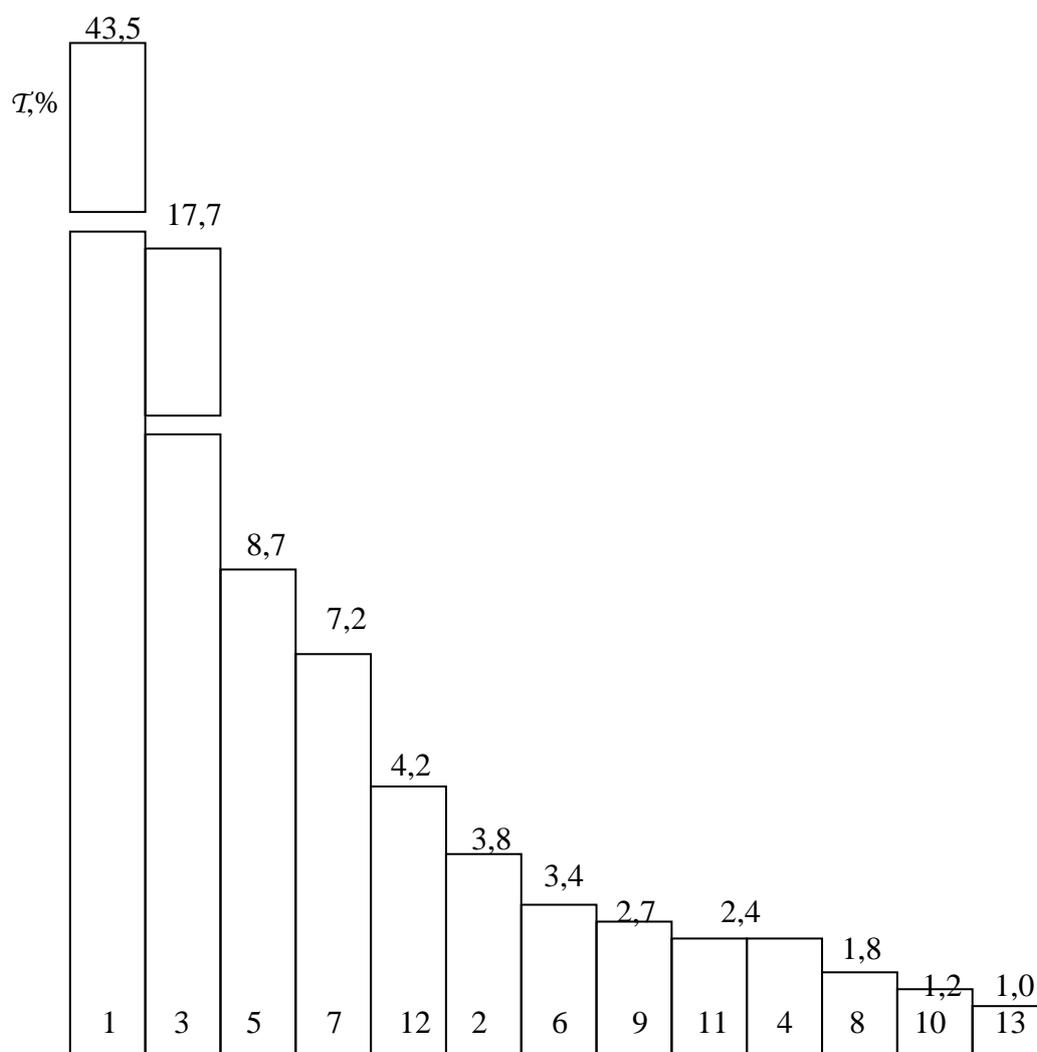


Рис.1.20. Распределение трудоемкости устранения отказов по агрегатам автомобиля (обозначения см. на рис. 1.19.)

Наибольший расход запасных частей (рис.1.21) приходится на колеса и ступицы автомобиля, хотя по числу отказов и трудоемкости работ они занимали соответственно шестое и седьмое место. Это связано с тем, что по этой группе основную сумму расходов на запасные части составляют затраты на шины (62,1% от расхода запасных частей по автомобилю).

Второе место после шин занимает по расходу запасных частей двигатель и его системы.

Таким образом, рассмотренный пример показывает, что повышение эффективности использования грузового автомобиля может быть достигнуто

за счет повышения его надежности и снижения затрат на устранение отказов..

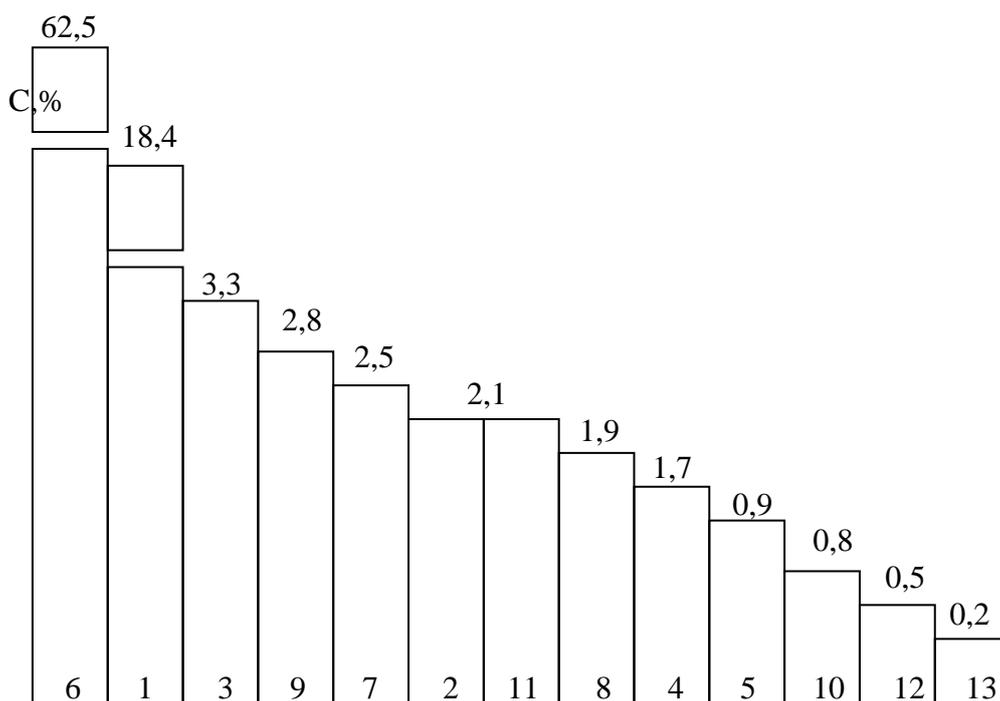


Рис.1.21. Распределение расхода запасных частей по агрегатам автомобиля (обозначения см. на рис.1.19)

Решение этой задачи зависит, прежде всего, от выяснения причин отказов. Для этого при исследовании используются все возможности, способствующие выявлению прямых и косвенных причин, вызывающих отказ, так как в конечном итоге целью такого исследования является разработка мероприятий по предупреждению отказов в будущем

Определение причин отказов автомобилей начинается с осмотра свежих следов, характеризующих внешнее проявление отказа. Затем составляется план действия исследователя по определенной схеме: уточнение обстоятельств возникновения отказа, использование статистической информации о частоте повторения и месте отказов на изделии, макроскопический анализ, фотографирование и измерение размеров деталей выдвижение гипотезы о причине отказа, проведение лабораторных исследований и специальных испытаний.

Уточнение обстоятельств возникновения отказа производится путем опроса водителя и по возможности большого числа специалистов, знающих что-либо о данном отказе. При таких опросах накапливается много фактов, часто не связанных между собой, и поэтому необходимо тщательно проанализировать все «за» и «против». После этого целесообразно произвести повторный, более тщательный осмотр следов отказа, что нередко дает возможность по-новому оценить обстоятельства вызвавшие отказ.

Для определения механических свойств материала отказавшей детали вырезают образцы установленных размеров и формы и производят испытания по той же методике, что и на поставку материалов при изготовлении детали. При испытании определяют такие характеристики, как предел прочности при растяжении, предел текучести, предел пропорциональности, ударная вязкость, предел выносливости, твердость. Материал деталей, работающих при высоких температурах, например клапанов двигателя, при необходимости подвергают испытаниям при высоких температурах (600 –700 градусов С) для определения прочности в зависимости от длительности работы детали.

Металлографическим анализом материала отказавшей детали выявляют микропорки, нарушающие прочность детали (микротрещины, поры, неметаллические включения); зернистость микроструктуры (балльность зерна); глубину слоя и микроструктуру химико-термической обработки (азотирование, цианирование, цементация, закалка); микроструктуру деталей, восстановленных наплавкой, сваркой, металлизацией. Анализ микроструктуры позволяет определить качество термообработки, объяснить причину и характер разрушения деталей автомобилей. Для проведения металлографического анализа изготавливают шлифы, место вырезки, форму и размеры которых определяют исходя из поставленной задачи исследования, вида разрушения и предполагаемой причины. Вырезку образцов при изготовлении шлифов производят в

холодном состоянии при обильном охлаждении с тем, чтобы не нарушить исходное состояние материала детали.

Воспроизведение характера излома детали в лабораторных условиях, аналогичного полученному в условиях эксплуатации, осуществляют в тех случаях, когда по внешним признакам нельзя достоверно установить характер излом. В таких случаях при испытании создают схему нагружения, подобную той, при которой деталь или узел нагружались в условиях эксплуатации, и ведут испытания до их разрушения. По результатам испытаний производится оценка условий зарождения и развития разрушения и определяется причина разрушения.

Кроме указанных выше лабораторных испытаний, нередко возникает необходимость при выявлении причин отказов производить анализ химического состава материала детали. Такой анализ позволяет определить соответствие марки материала требованиям документации и по количественному подержанию элементов сделать заключение об отрицательном влиянии отдельных элементов на качество материала.

После проведения перечисленных выше исследований по выяснению причин отказов, а при необходимости и других специальных исследований, производится анализ результатов и определяется причины отказа детали, узла или агрегата автомобиля. Правильность заключения о причинах появления отказа должна базироваться на достоверных фактах, полученных при исследовании. При необходимости производятся дополнительные исследования с целью уточнения отдельных результатов и расчетов, выполненных при исследовании. Тщательный и всесторонний анализ всех материалов позволяет сделать научно-обоснованные выводы о причине отказа [6].

В табл. 1.8 приведены данные по распределению отказов и связанных с их устранением затрат по агрегатам и системам автомобилей ВАЗ [21].

Таблица 1.8

Распределение отказов и связанных с их устранением затрат по агрегатам и системам автомобилей ВАЗ.

Агрегаты и системы	Удельный вес, %		
	отказов	трудоемкости устранения отказов	запасных частей стоимости
Двигатель и его системы	5,7	11,8	7,4
Сцепление	1,3	4,4	2,7
Коробка передач	0,1	0,1	0,1
Валы карданные	0,71	1,7	1,1
Задний мост	2,4	6,5	11,7
Рулевое управление	1,1	1,1	0,8
Передняя подвеска	16,9	33,8	17,1
Задняя подвеска	7,7	7,7	12,3
Тормозная система	27,2	12,4	10,7
Колеса (без учета шин)	4,0	2,4	3,8
Электрооборудование и приборы	24,7	10,4	26,6
Кузов и его детали	8,2	7,7	5,7

Установленное в результате наблюдений за автомобилями ВАЗ распределение отказов по агрегатам и системам (табл 1.8) показывает, что на пробеге 50 тыс. км свыше 90% всех отказов приходится на двигатель, переднюю и заднюю подвески, тормозную систему, электрооборудование и кузов. Затраты, связанные с устранением этих отказов, составляют около 80% от общих затрат по автомобилю.

Значительное место в потоке отказов занимают отказы узлов и деталей передней подвески, тормозной системы и оборудования.

Для передней подвески характерными отказами, охватывающими свыше 97% всех отказов и около 93% затрат по этой системе (табл. 1.9) являются износ пальцев шаровых опор (верхних и нижних), течь жидкости из амортизаторов вследствие износа сальниковых узлов, а также разрушение сайлентблоков амортизаторов и рычагов подвески.

Вместе с тем, значительное число отказов передней подвески приходится на амортизаторы и сайлент-блоки амортизаторов и рычагов

подвески. На их долю приходится свыше 65% затрат, связанных с устранением отказов по этой системе.

Таблица 1.9

Распределение отказов передней подвески и затрат на их устранение.

Узлы и детали	Удельный вес, %	
	Отказов	Затрат на их устранение
Рычаги подвески	2,5	6,9
Шаровые опоры	30,4	27,5
Амортизатор	21,8	35,6
Стабилизатор	0,3	0,3
Резинотехнические изделия	45,0	29,7

Распределение отказов механизмов, узлов и деталей тормозной системы (табл. 1.10) показывает, что свыше 91% их приходится на тормозные механизмы. Основными видами отказов тормозных механизмов являются износы накладок передних и задних тормозных колодок, составляющие 89,9% всех отказов тормозной системы. Затраты на устранение этих отказов в эксплуатации превышают 64% общих затрат по системе.

Таблица 1.10

Распределение отказов тормозной системы и затрат на их устранение.

Узлы и детали	Удельный вес, %	
	Отказов	Затрат на их устранение
Тормозные механизмы	91,2	72,1
В том числе:		
колодки передние	76,4	48,3
колодки задние	13,5	18,0
Гидравлический привод тормозов	8,2	27,4
Привод стояночного тормоза	0,6	0,5

Значительное число отказов электрооборудования автомобилей ВАЗ при пробеге 50 тыс. км приходится на одну систему зажигания, электроприборы и принадлежности (табл. 1.11) Наиболее характерными из них является обгорание и оплавление электродов свечей зажигания и подвижного контакта переключателя отопителя. На их долю приходится более 50% всех отказов по электрооборудованию, причем отказы свечей зажигания составляют 42,5%, переключателей отопителя - 11,6% . Отметим, что всего по электрооборудованию при пробеге 50 тыс. км зафиксированны отказы 38 наименований деталей.

Таблица 1.11

Распределение отказов систем электрооборудования и затрат на их устранение.

Узлы и детали	Удельный вес, %	
	Отказов	Затрат на их устранение
Система зажигания	54,4	28,1
Система пуска	0,7	4,1
Источники тока	12,1	43,0
Система освещения	8,9	6,6
Приборы и принадлежности	23,9	18,2

Из распределения отказов механизмов и систем двигателя (табл. 1.12) видно, что наиболее число отказов относится к газораспределительному механизму и резинотехническим изделиям. Самыми распространенными отказами газораспределительного механизма являются износы кулачков распределительного вала и рычагов приводов клапанов. Наиболее частыми отказами резинотехнических изделий были разрушения прокладок клапанной крышки- 37,1% и ремней вентилятора – 49,0 % от общего количества отказов этих изделий.

Перечисленные выше отказы существенно снижают надежность не

только газораспределительного механизма и резино-технических изделий, но и двигателя в целом, так как они составляют свыше 60% от общего количества отказов узлов и деталей двигателя, а затраты на их устранение – 58,8%.

Таблица 1.12

Распределение отказов механизмов и систем двигателя и затрат на их устранение.

Механизмы, системы и детали	Удельный вес, %	
	Отказов	Затрат на их устранение
Кривошипно-шатунный механизм	0,7	0,2
Газораспределительный механизм	5,1	49,2
Картер, храповик	2,3	2,1
Система питания	7,0	9,4
Система выпуска газов	6,5	7,2
Система смазки	0,5	0,9
Система охлаждения	9,7	11,9
Резинотехнические изделия	58,2	19,1

Наиболее характерные отказы задней подвески – течь жидкости из амортизаторов вследствие износа сальниковых узлов и разрушение втулок амортизаторов (табл. 1.13), составляющие более 95% всех отказов и 96,4% затрат на их устранение по задней подвеске.

Таблица 1.13

Распределение отказов задней подвески и затрат на их устранение.

Узлы и детали	Удельный вес, %	
	Отказов	Затрат на их устранение
Амортизатор	53,1	86,3
Пружина подвески	3,0	2,4
Тяги реактивные	1,6	1,1
Резинотехнические изделия	42,3	10,2
В том числе втулки амортизаторов	42,1	10,1

В табл. 1.14 приведено распределение отказов по агрегатам и системам автобусов Отойол, на пробеге 0-100 тыс. км (по 34 автобусам)

Таблица 1.14

	Показатели		
	Отказы		Наработка на отказ
	Количества	%	
Агрегаты			
Двигатель	38	4,21	89,47
Система питания	31	3,44	109,68
Система выпуска	0	0	0
Система охлаждения	53	5,88	64,15
Сцепления	87	9,65	39
Коробка передач	1	0,11	3400
Карданный вал	4	0,44	850
Задний мост	1	0,11	3400
Рама автомобиля	0	0	0
Подвеска	84	9,31	40,48
Передняя ось	0	0	0
Колесо и ступицы	65	7,21	52,31
Рулевое управление	3	0,33	1133,33
Тормозная система	382	42,35	8,9
Электрооборудование	94	10,42	36,17
Приборы	22	2,44	154,55
Кузов автомобиля	18	2	188,89
Компрессор	19	2,11	178,95
По агрегатам	902	100	0
По автомобилям	552	0	6,16

Как видно из табл. 1.14 количество отказов приходится на тормозную систему (382).

В таблицах 1.15, 1.16, 1.17 представлены виды отказов легковых автомобилей УзДЭУавто по характеру отказа, сведения об отказах систем и агрегатов автомобилей «Тико», «Нексия» и «Дамас»

Таблица 1.15.

Виды отказов легковых автомобилей УзДЭУавто по характеру отказа

№№ п/п	Характер отказа	Количество отказов, %
1	Износ (абразивный, окислительный, водородный, эрозийный, коррозионный,	49.4

2	Обрыв, разрыв, срыв	11.3
3	Закоксовывание, отложения асфальтенов, карбенов, карбоидов	8.3
4	Трещины (усталостные, от перенаклепа, от контактных нагрузок)	7.8
5	Поломки	5.8
6	Прогар, подгорание, перегорание	5.7
7	Замыкание (электрооборудования), электронных плат и приборов	2.6
8	Выкрашивание, задиры	1.9
9	Ослабление крепления	1.6
10	Срез, срывы резьбы	1.2
11	Проседание, потеря упругости	0.8
12	Прокол	0.7
13	Нарушение изоляции (электрооборудования)	0.6
14	Вытягивание	0.4
15	Заклинивание, заедание, схватывание	0.4
16	Погнутость, изгиб	0.4
17	Смятие, скручивание	0.4
18	Коррозионное разрушение	0.3
19	Перетираание	0.3
20	Засорение (отложение накипи, смол и др.)	0.1
И т о г о :		100%

Таблица 1.16

Сведения об отказах систем и агрегатов автомобилей  
«Тико», «Нексия» и «Дамас»

Наименования агрегатов и систем	Отказы и неисправности, %		
	«Тико»	«Нексия»	«Дамас»
Передняя подвеска	25,75	11,81	14,0
Электрооборудование и электроника	20,74	13,46	13,62
Двигатель	10,70	14,28	15,17
Система охлаждения	4,68	8,52	2,72
Система зажигания	4,35	6,59	5,44
Система питания	3,68	11,54	4,28
Тормозная система	10,37	2,75	1,94

Сцепление	4,01	3,57	2,72
Коробка передач	2,68	3,30	2,33
Кузов	2,67	3,02	12,06
Рулевое управление	1,66	7,97	7,78
Шины и колеса	1,34	1,92	1,94
Задняя подвеска	1,00	3,30	4,28
Задний ведомый мост	-	-	2,33
Дифференциал	-	-	0,78
Карданный вал	-	-	1,16
Другие агрегаты	6,37	7,97	7,45
Всего:	100	100	100

Таблица 1.17

Средняя трудоемкость работ по устранению одного отказа

№№ п/п	Наименование агрегата	Трудоемкость устранения отказа, чел.-ч.
1	Коробка перемены передач	6.3
2	Сцепление	5.6
3	Задний мост	4.3
4	Двигатель и его системы	4.8
5	Кузов и рама	4.5
6	Передний мост	2.9
7	Измерительные и показывающие приборы	2.4
8	Колеса, ступицы и шины	2.1
9	Тормозные механизмы	1.8
10	Подвеска автомобиля, амортизаторы	1.6
11	Рулевое управление	1.4
12	Электрооборудование и электроника (без	1.2
В среднем по автомобилю		3.242

На рис. 1.22 представлены графическое изображение данных табл.1.16

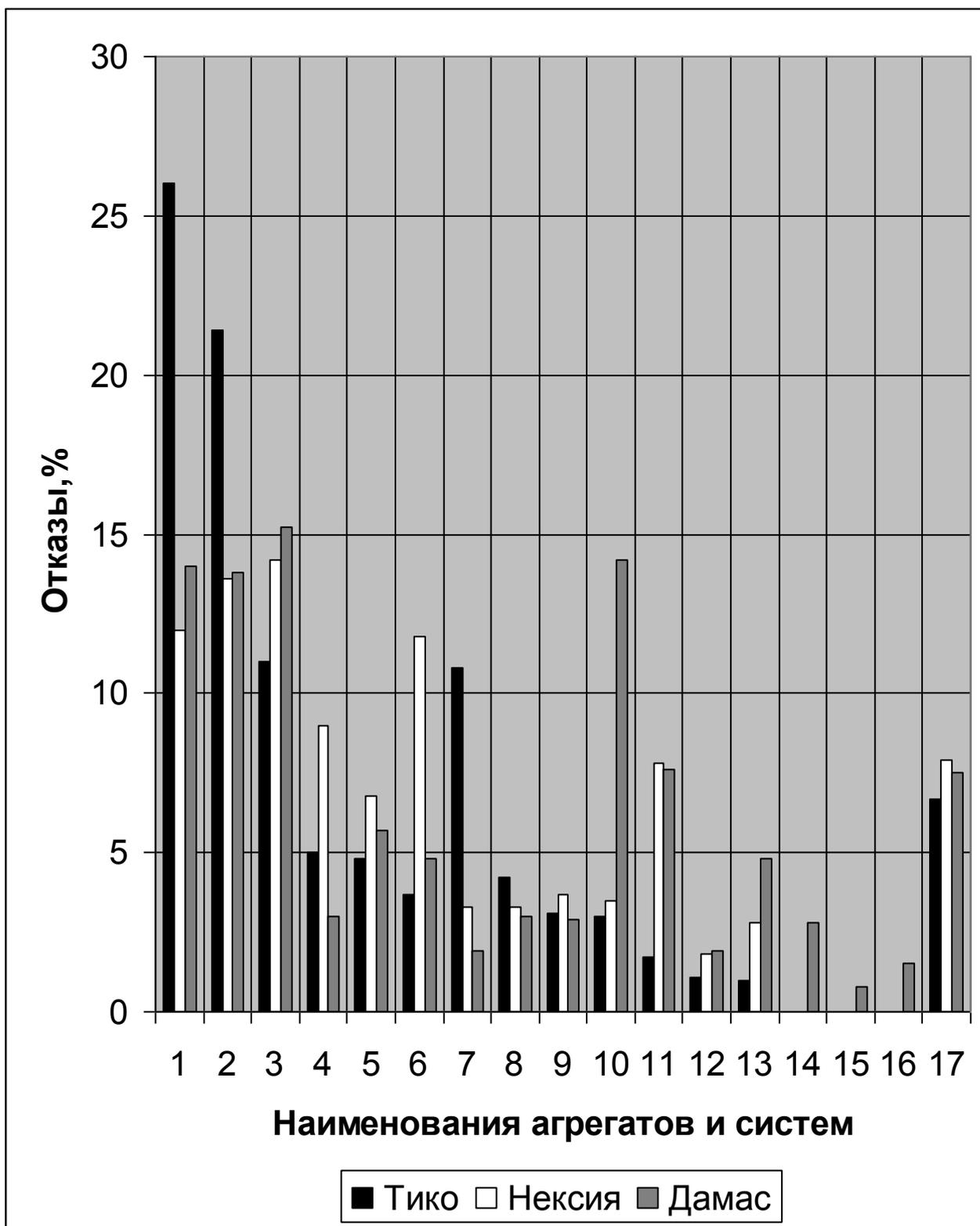


Рис.1.22. Сведения об отказах и неисправностях систем и агрегатов легковых автомобилей "Тико", "Нексия" и "Дамас":1-передняя подвеска; 2-электрооборудование и электроника; 3-двигатель; 4-система охлаждения; 5-система зажигания; 6-система питания; 7-тормозная система; 8-сцепление;

9-коробка передач; 10-кузов; 11-рулевое управление; 12-шины и колеса; 13-задняя подвеска; 14-задний ведущий мост; 15-дифференциал; 16-карданный вал; 17-другие агрегаты.

Как видно в табл. 1.16 наибольший процент отказов у автомобиля «Тико», приходится на переднюю подвеску, у автомобиля «Нексия» на систему питания, у автомобиля «Дамас» так же наибольший процент приходится на систему питания.

Таким образом, получение информации из сферы эксплуатации необходимый процесс работ, результаты которого используются при проектировании новых или для модернизации существующих автомобилей.

### **1.6.3. Использование результатов эксплуатационных исследований для повышения надежности автомобилей.**

Обеспечение надежности автомобилей осуществляется путем внедрения комплекса мероприятий, которые разрабатываются по мере накопления данных о причинах отказов при выполнении специальных исследований (стендовых и эксплуатационных). При этом результаты эксплуатационных исследований надежности автомобилей используются для разработки следующих мероприятий:

конструкционных, связанных с изменением конструкции отдельных узлов, деталей, применением новых материалов, систем смазки, изменением нагрузочных режимов;

производственных, направленных на улучшение качества обработки деталей, контроля, сборки и обкатки;

эксплуатационных, направленных на разработку и совершенствование рациональной организации технического обслуживания, ремонта, повышение квалификации водителей и ремонтных рабочих;

нормативно-снабженческих, связанных с разработкой прогрессивных норм расхода номенклатуры запасных частей и организации снабжения ими автотранспортных предприятий;

нормативно-правовых, связанных с нормированием показателей надежности (ресурса автомобиля и его агрегатов до капитального и между капитальными ремонтами, трудоемкостью технического обслуживания, удельной трудоемкостью текущего ремонта), а также с разработкой инструкций, положений, правил, стандартов, регламентирующих обеспечение надежности автомобилей в эксплуатации;

прогностических, связанных с прогнозированием показателей надежности при проектировании новых моделей автомобилей.

Для разработки конструкционных мероприятий используются сведения, содержащиеся в информационных картах, а также результаты обработки данных о надежности, включаемые в отчеты. Учитывая, что информация о причинах отказов постоянно пополняется в процессе эксплуатационных испытаний, осуществление мероприятий по улучшению конструкции автомобилей также ведется практически непрерывно при их производстве.

При осуществлении производительности мероприятий есть два этапа: период организации серийного производства новых моделей автомобилей и период налаженного серийного производства. В период организации серийного производства идет отладка технологического процесса и поэтому встречается сравнительно большее число производственных отказов. Эти отказы проявляются в начальный период эксплуатации автомобиля, поэтому в ряде случаев могут быть выявлены при проведении осмотра автомобилей перед вводом в эксплуатацию и в обкаточный период. Рассмотрим в качестве примера результаты осмотра двух партий подконтрольных грузовых автомобилей в начале, и после освоения их серийного производства.

Число неисправностей, выявленное при осмотре двух партий подконтрольных автомобилей перед вводом их в эксплуатацию

Вид неисправности	Среднее число неисправностей в расчете на один автомобиль	
	Первая партия автомобилей	Вторая партия автомобилей
Некомплектность изделия	1,20	0,31
Несипарвности деталей	1,15	0,68
Низкое качество уплотнений	1,03	0,20
Плохое качество регулировок	0,89	0,45
Нарушение соединений	0,44	0,03
Низкое качество монтажа	1,18	0,28
Неудовлетворительное качество поверхностных покрытий	0,12	0,03
ИТОГО	0,07	1,98

По приведенным в табл. 1.18 данным видно, что после осуществления мероприятий число неисправностей снизилось более чем в 3 раза. При этом снижение имело место по всем видам неисправностей: некомплектность изделий (отсутствует винт, шайба, шплинт и т. п.) - в 4 раза; дефекты деталей (трещина, литейная раковина и т. п.) - в 1,7 раза и т. д.

На втором этапе (налаженное серийное производство) число неисправностей становится значительно меньше, и они проявляются постепенно. Поэтому основным источником информации, используемым для разработки мероприятий, являются информационные карты, а также отчеты, в которых обобщаются причины отказов.

При разработке эксплуатационных, нормативно-снабженческих, нормативно-правовых и прогностических мероприятий используются в основном результаты обработки данных, получаемых при эксплуатационных испытаниях автомобилей[21, 22].

## **1.7. Пути повышения надёжности машин.**

### **1.7.1. Факторы, влияющие на надёжность машин.**

#### **А. Конструктивные факторы.**

При разработке автомобиля под конструктивными факторами, связанными с действиями конструктора и снижающими надёжность, понимаются следующие факторы:

снижение износостойкости из-за неправильного подбора пар трения, плохой защиты от пыли и влаги, неправильного выбора материалов, допусков, частоты поверхности, непредусмотренной или неправильно назначенной смазки, термообработки;

снижение прочности из-за недостаточной механической или усталостной прочности, недостаточной жёсткости конструкции, плохой защиты от вибрации, низкой термостойкости, ослабления или неправильного определения размеров детали в опасном сечении;

снижение долговечности из-за плохой защиты от окружающей среды - недостаточная защита от коррозии, малоэффективная термоизоляция, низкая стойкость поверхностных покрытий и электроизоляции;

применение ненадёжных элементов комплектующих изделий смежных производств, крепёжных деталей, не обеспечивающих стабильность соединений;

не обеспечена требуемая ремонтпригодность и эксплуатационная технологичность конструкции - затруднён доступ при ремонте или обслуживании, не обеспечена легкосъёмность, не предусмотрена или затруднена регулировка и установка сменной детали, нестабильность регулировки, применение большого числа типоразмеров резьбовых соединений.

При обеспечении надёжности автомобиля на стадии разработки конструкции необходимо учитывать факторы окружающей среды, воздействующей на автомобиль при его эксплуатации, производственные возможности и технический уровень конструирования (рис. 1.23) [1, 2, 5, 7].

### **Б. Технологические факторы, влияющие на надёжность**

На обеспечение надёжности автомобиля при его изготовлении существенное влияние оказывают многие факторы: качество материала деталей, шероховатость поверхностей трения, точность размеров и геометрической формы деталей, качество химико-термической обработки, наличие концентраторов напряжений, качество мойки и очистки, соответствие размеров сопрягаемых деталей, качество монтажа, балансировки, обкатки, испытаний и доводки.

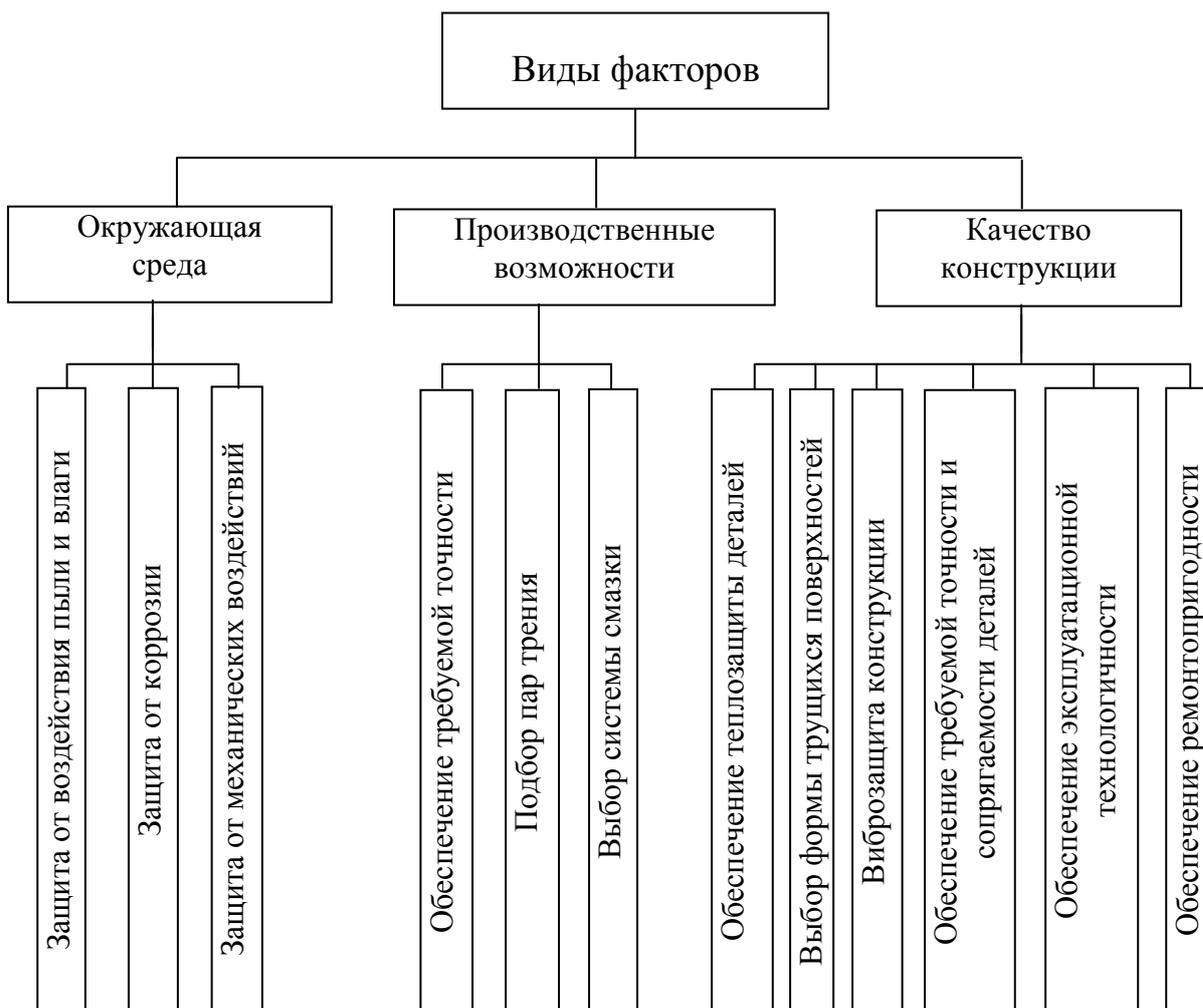


Рис. 1.23. Факторы влияющие на конструктивные меры обеспечения надёжности автомобиля

Необходимые свойства материала детали зависят, прежде всего, от технологии изготовления.

Снижению износостойкости деталей способствуют неправильный выбор исходной шероховатости (микрogeометрии) поверхностей трения.

Немаловажное значение на изнашивание деталей оказывает также точность исходных размеров и отклонения от геометрической формы (макрogeометрия), особенно овальность и конусность. Из-за неточности размеров, овальности и конусности нарушаются контакт и смазки, происходит заедание, заклинивание и задиры рабочих поверхностей деталей.

Существенное повышение ресурса узлов достигается также за счёт уменьшения исходных зазоров в сопряжениях деталей до оптимальной величины. Оптимальные зазоры в сопряжениях, могут быть обеспечены путем повышения точности при изготовлении деталей.

Для повышения износостойкости деталей автомобилей применяется химико-термическая обработка и поверхностное упрочнение путём износостойких покрытий и пластической деформации материала детали. Отдельные нарушения технологии такой обработки нередко приводят к снижению работоспособности деталей и появлению отказов.

Прочность деталей в эксплуатации нередко снижается в местах, имеющих нарушение размеров или формы поверхности - у резких переходов, выточек, отверстий, небольших закалочных трещин, пор или глубоких царапин. Такие дефекты называют концентраторами напряжений, так как они вызывают повышение (концентрацию) напряжений в детали у этих мест. Различают концентраторы конструктивные, производственные, тепловые и монтажные. К конструктивным концентраторам относятся отверстия, галтельные переходы, выточки пазы и т.п. ослабления сечения детали, предусмотренные конструкцией. Производственными концентраторами

являются закалочные трещины, подрезы, глубокие риски, вмятины, металлургические дефекты. Наличие таких концентраторов нередко приводит к поломкам деталей в эксплуатации. Тепловые концентраторы напряжений возникают в результате неравномерного местного нагрева и интенсивного охлаждения деталей при эксплуатации автомобиля. Монтажные концентраторы появляются при неправильной затяжке резьбовых соединений, установке деталей с перекосами несоосностей осей вращения. В результате таких нарушений монтажа появляются начальные очаги разрушения деталей в виде микротрещин, царапин, забоин, которые в эксплуатации служат причиной разрушения деталей.

Мойка и очистка деталей от технологических загрязнений, попадающих при изготовлении в узлы трения, является эффективным средством повышения долговечности изделий в эксплуатации.

Соответствие размеров сопрягаемых деталей является главным условием обеспечения необходимых зазоров или натягов в соединениях.

Несоблюдение установленных размеров сопрягаемых деталей приводит к снижению надёжности изделия в эксплуатации. Обеспечение требуемых размеров достигается за счёт точности и стабильности технологического процесса изготовления деталей. Под точностью процесса понимается обеспечение реальных размеров деталей, не выходящих за установленные пределы поля допуска, а под стабильностью - минимальный разброс отклонений от середины поля допуска в течение установленного времени изготовления.

Наиболее ответственными этапами изготовления автомобиля являются сборка балансировка, обкатка, испытание и доводка. Качество выполнения этих работ определяет надёжность автомобиля особенно в начальный период эксплуатации. Так, оценка надёжности автомобилей показывает, что в начальный период эксплуатации (период обкатки) число отказов бывает

больше, чем в дальнейшем. Это является результатом наличия недостатков сборки, обкатки и доводки автомобиля при изготовлении.

### **В. Эксплуатационные факторы, влияющие на надёжность**

Как показывает анализ причин отказов автомобилей, к эксплуатационным факторам, влияющим на надёжность, относятся: соответствие принятых режимов и организации технического обслуживания данным условиям эксплуатации; квалификация ремонтно-обслуживающего персонала и качество выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту; качество эксплуатационных материалов и запасных частей; соблюдение скоростных и нагрузочных режимов эксплуатации, а также рекомендуемых приёмов управления автомобилем; обеспечение автотранспортных предприятий запасными частями, инструментом, необходимым оборудованием и эксплуатационными материалами.

Характер работы машины во времени определяет период в течении которого следует оценивать ее безотказность. Так, например, для автомобиля - это время пробега между плановыми техническими обслуживаниями.

#### **1.7.2. Повышение надёжности автомобиля с учетом различных факторов.**

Надёжность работы машин и оборудования в эксплуатации зависит от ряда факторов. Эти факторы условно можно разделить на две группы: субъективные факторы, зависящие от индивидуальных особенностей исполнителя-конструктора, изготовителя, эксплуатационника и объективные, характер которых определяется эксплуатационным фоном и случайными воздействиями внешней среды. К числу наиболее существенных субъективных факторов относят выбор конструктивного решения при проектировании машины и комплектующих изделий, подбор материалов

деталей, определение рациональных рабочих режимов, организацию технического обслуживания и ремонта машин. К объективным факторам относят различные климатические, почвенные, метеорологические, биологические, механические и др. воздействия.

Основные пути повышения надёжности машин реализуются по следующим основным направлениям жизненного цикла машины:

#### **повышение сопротивляемости машин внешним воздействиям**

Методы и возможности по повышению надёжности машин весьма разнообразны и связаны со всеми этапами проектирования, изготовления и эксплуатации машин, т.е. охватывают весь жизненный цикл машины.

Проводимые в этой области мероприятия разделяются на несколько генеральных направлений.

Одно из основных направлений - это повышение стойкости изделий к внешним воздействиям. Сюда относятся методы создания прочных жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции применения материалов с высокой прочностью, износостойкостью, антикоррозионностью, теплостойкостью и др.

Это направление объединяет все новейшие достижения в области конструирования и технологии, которые позволяют увеличивать стойкость узлов и механизмов по отношению к воздействиям, которые характерны для данного типа машин.

Эти методы тесно связаны с задачами, встающими перед конструкторами, технологами и эксплуатационниками не только в связи с надёжностью, но и при необходимости обеспечивать заданные технические характеристики изделия, повышать производительность и быстроходность машин, уменьшать их габариты и металлоемкость;

#### **изоляция машин от вредных воздействий.**

Другой путь повышения надёжности работы машин и изделий, это их изоляция от вредных воздействий. Здесь характерны такие методы, как

защита поверхностей от запыления и загрязнения, создания для машин специальных условий по температуре и влажности, применение антикоррозионных покрытий и т.п.

Однако возможности по изоляции машины от внешних воздействий также, ограничены, они требуют, как правило, больших затрат, не всегда исключают основные причины, снижающие надежность машины. Кроме того всегда имеются внутренние источники возмущений (вибрации самой машины, тепловыделение в узлах и механизмах и т.п.), влияние которых трудно изолировать;

#### **создание оптимальной конструкции машины**

С позиций надежности оптимальной будет такая конструкция машины и ее элементов, когда с наименьшими затратами средств достигается требуемая продолжительность работы отдельных узлов, механизмов и машины в целом при заданной безотказности и регламентированных затратах на ремонт и техническое обслуживание.

В основу выбора рациональной конструкции должен быть положен расчет, связывающий изменение выходных параметров и изделия с процессами повреждения. Только раскрытие этих взаимосвязей позволит находить такие решения, когда износ, усталость, деформация, коррозия и т.п. будут оказывать минимальное влияние на выходные параметры изделия;

#### **применение автоматики для повышения надежности машин**

Проблема надежности машин возникла в первую очередь в связи с развитием автоматизации, с необходимостью обеспечить бесперебойную работу и взаимодействие механических, электрических, гидравлических и других устройств.

Автоматика также необходима для обеспечения качества и надежности современных сложных машин, как и для выполнения, ими рабочих функций;

#### **создание машин с регламентированными показателями надежности**

Если для машины известны основные параметры и показатели, определяющие ее надежность, то для этой машины можно предусмотреть мероприятия, не допускающие непредвиденного выхода из строя отдельных элементов и узлов, особенно тех, нарушение в работе которых может привести к тяжелым последствиям. При известных характеристиках безотказности и долговечности машины и ее элементов можно указать наиболее эффективные мероприятия для повышения ее надежности. Таким образом, информация о надежности изделия имеет не меньшую ценность, чем достижение данного уровня.

### **1.7.3. Конструктивные мероприятия повышения надёжности**

Основные конструктивные мероприятия, направленные на повышение надежности машин, могут быть сведены в такие группы:

1. Упрощение конструктивной схемы машины, уменьшение числа составляющих элементов путем ее рационализации;
2. Назначения норм надежности на составные части в зависимости от требований к надежности изделий в целом;
3. Замена элементов, лимитирующих надежность машины, более надежными;
4. Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в сопряжениях;
5. Обеспечение функциональной избыточности элементов машины повышением запасов прочности деталей. Этот путь ограничивается требованиями к снижению материалоемкости, энергоемкости, стоимости и массы машины;
6. Защиты элементов машины от разрушающих действий окружающей среды;

7. Установка различных датчиков и контрольно-измерительных устройств, сигнализирующих об изменении технического состояния и о возникновении отказов основных элементов машины;

8. Повышение уровня ремонтпригодности машины более рациональной компоновкой ее элементов, обеспечивающей свободный доступ к наименее надежным сборочным единицам. Обеспечение простоты регулировки и замены быстроизнашивающихся деталей;

9. Обеспечение благоприятных условий работы деталей и смазки трущихся поверхностей. Создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений;

10. Создание эффективных устройств для очистки воздуха, топлива и смазки;

11. Введение системы бездефектного проектирования для предотвращения ошибок при разработке конструкторской документации;

12. Проведение испытаний машин и их элементов;

13. Организация при конструкторских бюро заводов служб надежности, контролирующей уровень надёжности, контролирующей уровень надёжности изделий и разрабатывающих рекомендации по повышению долговечности и безотказности машин.

Одним из основных путей повышения надежности машин на этапе проектирования является рационализация компоновки конструктивной схемы и после этого назначение норм надежности на составные части в зависимости от требований к надежности машины в целом. После того как будут назначены нормы надежности на все основные составные части, все остальные мероприятия по повышению надежности машины будут иметь целенаправленность и эффективность.

Для осуществления систематического контроля уровня надежности выпускаемых машин и разработки мероприятий по повышению

долговечности и безотказности элементов машин на заводах создаются службы надежности.

Службы надежности заводов выполняют следующие функции:

- 1) рассчитывают надежность машин и элементов;
- 2) анализируют рекламации, поступившие на завод, и устанавливают причины отказов и неисправностей элементов машин;
- 3) исследуют влияние эксплуатационных факторов на надежность машин и элементов;
- 4) разрабатывают мероприятия по повышению надежности машин и элементов в ходе их проектирования и изготовления;
- 5) осуществляют взаимосвязь между эксплуатационниками, конструкторами и изготовителями машин [1, 2, 7].

#### **1.7.4. Технологические мероприятия повышения надёжности**

Расчетный уровень надежности, заложенный в машину на стадии проектирования в конструкторском бюро, должен быть обеспечен в процессе изготовления деталей и элементов, сборки и регулировки узлов и агрегатов машин. Нередки случаи, когда технологический процесс изготовления изделий не обеспечивает заданного уровня надежности составных элементов и машины в целом и тем самым губит оригинальное конструктивное решение.

Снижение уровня надежности машин на стадии производства может быть следствием одной из следующих причин:

- 1) детали изготовлены из материалов, имеющих дефекты, или материалов, не обеспечивающих заданную прочность;

2) принятый технологический процесс изготовления деталей и их поверхностной обработки не может обеспечить заданный уровень эксплуатационных свойств;

3) в технологическом процессе изготовления деталей допущены нарушения вследствие плохой организации производства, недостаточной « квалификации рабочих и т.д.

4) при изготовлении деталей использовано неисправное или устаревшее оборудование.

Мероприятия, связанные с обеспечением надежности машин в процессе производства, можно свести в такие группы:

1. Тщательный подбор материалов деталей в соответствии с требованиями технической документации и контроль их качества для своевременного обнаружения скрытых дефектов или несоответствия физико-механических свойств требуемым свойствам;

2. Упрочнение деталей и их рабочих поверхностей термической, химико-термической обработкой и поверхностным пластическим деформированием;

3. Повышение износостойкости и коррозионностойкости деталей нанесением покрытий;

4. Строгое соблюдение и совершенствование технологии производства;

5. Повышение требований к точности основных размеров деталей и к качеству их поверхности;

6. Применение автоматизированных станков с программным управлением, обеспечивающих высокую точность и стабильность характеристик качества изделий, для изготовления деталей машин;

7. Входной, текущий и выходной контроль качества изготовления деталей, введение системы бездефектного изготовления продукции;

8. Введение автоматизированной системы управления производством. Значительное повышение надежности машин может быть достигнуто повышением прочностных характеристик материалов с помощью механической, термической или химико-термической обработки деталей.

Надежность машин и их элементов во многом определяет строгое соблюдение технологии производства. Несоблюдение режимов обработки материалов и деталей приводит к сокращению сроков службы и к снижению надежности изделий. Технологические процессы изготовления деталей должны обеспечить тот уровень их надежности, который был определен на втором этапе конструкторских мероприятий по повышению надежности машин, т.е. должны строго соответствовать технической документации. Контроль за этим осуществляют работники технологической службы и отдела технического контроля.

Для повышения технологической дисциплины необходимо воспитывать у рабочих и инженерно-технических работников уважение к техническим документам. Необходимо постоянно совершенствовать систему технической документации и контролировать правильность документов.

Отдельные элементы конструкции, сборочные единицы и агрегаты выпускают на специализированных предприятиях и на завод-изготовитель они поступают в виде готовых изделий. При производстве этих изделий могут быть допущены отклонения от заданной технологии изготовления, а следовательно отклонение характеристик от номинального значения. Кроме того, продукция специализированных, предприятий может не сразу поступить в производство. Нарушение правил транспортировки и хранения изделий ведет к существенному изменению их свойств. По этим причинам необходимо проводить входной контроль комплектующих изделий, поступающих на завод-изготовитель машин.

Текущий контроль качества изделий проводят на различных стадиях, изготовления и сборки элементов машин. Методику текущего контроля

разрабатывают применительно к конкретным изделиям на основе статических методов контроля качества.

Значительное повышение качества и надежности элементов машин может быть достигнуто путем введения системы бездефектного изготовления продукции. При этой системе продукция или техническая документация сдается с первого предъявления. При обнаружении хотя бы одного дефекта контролер возвращает всю продукцию изготовителю для разбраковки. Контролеров освобождают от обязанностей разбраковывать продукцию, и их основной задачей является анализ причин брака и его профилактика.

Для обеспечения эффективной работы отдел технического контроля должен располагать необходимыми контрольно-измерительными приборами, инструментами.

Обкаточные (приработочные) испытания позволяют сократить продолжительность этапа приработки, характеризующегося повышенной интенсивностью отказов. При разработке программы испытаний важно правильно установить режим нагружения элементов машины. Правильно организованные обкаточные испытания позволяют значительно повысить безотказность машины в начальный период ее работы и увеличить общий срок службы машины. Кроме того, для оценки качества машин проводят приемочные испытания, а также испытания опытных образцов изделий. При разработке методики и проведения испытаний необходимо обеспечить комплексное воздействие факторов в условиях различных к эксплуатационным. В процессе испытаний опытных образцов выявляют сборочные единицы, лимитирующие надежность машины в целом.

Обеспечение уровня надежности, заданного на этапе конструирования, в значительной степени связано с организацией производства. Существенное повышение уровня организации производства достигается введением автоматизированной системы управления.

Автоматизированная система управления производствам позволяет выбрать наиболее рациональный вариант технологического процесса. [1, 2, 7, 29].

### **1.7.5. Эксплуатационные мероприятия повышения надёжности**

На надёжность машин в эксплуатации существенно влияют как объективные, так и субъективные факторы. Учитывая это, можно сформировать основные направления совершенствования системы технической эксплуатации машин:

- 1) повышения квалификации обслуживающего персонала;
- 2) строгое соблюдение рекомендаций инструкции по эксплуатации машины;
- 3) обеспечение нормальных режимов работы машины;
- 4) соблюдение правил транспортировки и хранения машин;
- 5) оптимизация режимов и периодичности технического обслуживания;
- 6) совершенствование организации технического обслуживания и ремонтов машин;
- 7) проведение диагностики;
- 8) совершенствование системы сбора, обработки и анализа информации о надёжности машин; разработка рекомендации по повышению надёжности машины и ее элементов

Квалификация обслуживающего персонала определяется- качество подготовки машины к работе, ее техническое состояние, а также качество ремонта и технического обслуживания.

Несоблюдение обслуживающим персоналом правил технической эксплуатации машин всегда приводит к отказам и неисправностям, а в ряде случаев и к авариям.

Система технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта включает мероприятия, направленные на поддержание работоспособности машин в процессе эксплуатации.

Хорошо организованная система технической эксплуатации предусматривает проведение диагностики технического состояния и прогнозирование надёжности машин.

В инструкции по эксплуатации, прилагаемой заводом – изготовителем к каждой машине, приведены основные рекомендации по технической эксплуатации машины. Эти рекомендации установлены в результате тщательных исследований, и несоблюдение их в эксплуатации значительно снижает долговечность и безотказность машины, а порой может привести к серьезным повреждениям.

Одним из основных условий обеспечения заданного уровня безотказности и долговечности машин является обеспечение нормальных режимов работы машин. Это особенно важно при эксплуатации машин в сложных климатических условиях или на особо тяжелых работах.

Характерной тенденцией развития системы технического обслуживания машин является внедрение диагностирования технического состояния машин. Диагностика служит для оценки технического состояния машины в целом и отдельных сборочных единиц безразборными методами. Целью диагностики является определение потребности в проведении запланированных регулировочных или ремонтных операций, прогнозирование изменения технического состояния машины и определение момента возникновения отказа или неисправности.

Система сбора и обработки информации от отказах и неисправностях машин косвенно влияет на их надёжность. Оперативная информация о числе и характере отказов элементов машин, работающих в различных условиях эксплуатации, должна систематически поступать на завод – изготовитель. Анализ собранной информации позволяет установить скрытые причины

отказов и быстро принять необходимые меры по улучшению конструкции и совершенствованию технологии изготовления наименее надёжных элементов машины. При эксплуатации машин необходимо не только поддерживать уровень надёжности, заложенный в машине, но и проводить мероприятия, направленные на совершенствование конструкции и повышение уровня надёжности. [1, 2, 7, 29 ]

## **1.8. Обеспечение заданного уровня надёжности машин.**

### **1.8.1. Состояние вопроса**

Надёжность отражает свойство машины сохранять требуемые показатели качества в течении всего периода эксплуатации.

Надёжность является одним из важнейших свойств технических объектов. Недостаточное внимание к надёжности на любой из стадии жизненного цикла машины может свести на нет усилия, приложенные на других стадиях.

Научно-технический прогресс в машиностроении, ассоциирующийся с понятиями высокой надёжности и безопасности техники, основывается на достижениях фундаментальных наук: математики, механики, материаловедения, химии, информатики и др.

В основе теории надёжности лежат теоретико-вероятностные и статистические методы, причем нарушение работоспособности машины – отказ трактуется как случайное событие.

Предпочтение, отдаваемое вероятностному подходу, вытекает из предположения, что показатели надёжности носят вероятностный характер.

Однако, это не является общим правилом. На основе вероятностного подхода делают выводы о невозможности безотказной работы изделий, состоящих из нескольких тысяч деталей.

Для изделий машиностроения наиболее характерен случай, когда отказ одного элемента выводит из строя всю машину, как это имеет место при последовательном соединении элементов (см. рис. 1.24).

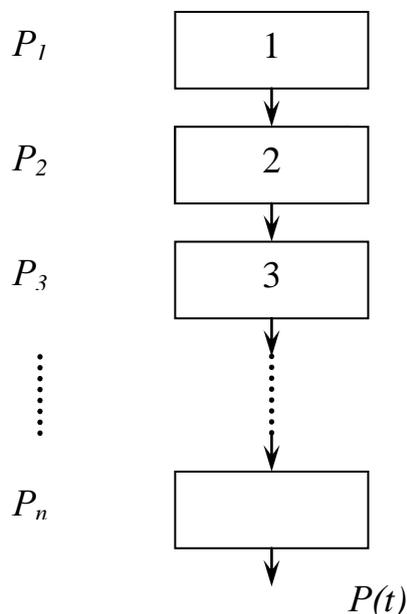


Рис.1.24

Например, большинство приводов машин и механизмы передач подчиняются этому условию. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта, рычаг управления, электродвигатель, насос смазки и т.п., то весь привод перестанет функционировать. При это отдельные элементы не обязательно должны быть соединены последовательно.

Вероятность безотказной работы такой системы равна произведению вероятностей безотказной работы элементов

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_{э_i} \quad (1.9)$$

где  $P_c(t)$  - вероятность безотказной работы системы;  $P_{э_i}$  - вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы;  $n$  - количество элементов системы.

При одинаковой надежности элементов формула (1.9) примет вид

$$P_c(t) = P_{\varrho_i}^n \quad (1.10)$$

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов. Например, если узел состоит всего из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет  $P_{\varrho_i} = 0,99$ , то вероятность безотказной работы узла будет  $P_c(t) = (0,99)^{50} \approx 0,55$ . Если же узел с аналогичной безотказностью элементов состоит из 400 деталей, то  $P_c(t) = (0,99)^{400} \approx 0,018$ , т.е. узел становится практически неработоспособным.

Из формул (1.9) и (1.10) следует одно из главных положений теории надежности – надежность (безотказность) системы всегда ниже надежности (безотказности) самого ненадежного элемента. В связи с этим по отношению к свойству безотказности не может ставиться задача обеспечения равной безотказности системы и ее элементов. Поэтому, если двигаться от системы к элементу (рис. 1.25), то чем дальше от уровня иерархии системы расположен уровень иерархии этого элемента, тем выше по отношению к системе должен быть норматив и реальный уровень его безотказности.

На рис. 1.26 показана примерная зависимость безотказности сложного изделия и его основных составных частей, безотказность которых должна обеспечить заданную безотказность изделия в целом.

Продолжительность безотказной работы зависит от большого числа трудноконтролируемых факторов, начиная от неустойчивости свойств исходного сырья и кончая неопределенности условий эксплуатации. Поэтому точный прогноз продолжительности безотказной работы или ресурса индивидуального, конкретного объекта, как правило, дать невозможно.

На первых этапах специалисты в области надежности уделяли основное внимание получению надежных характеристик отдельных элементов и разработке методов, позволяющих рассчитывать надежность сложного устройства, на основе информации о надежности входящих в него

элементов, эффективность указанных методов была подтверждена практикой создания многих объектов новой техники.

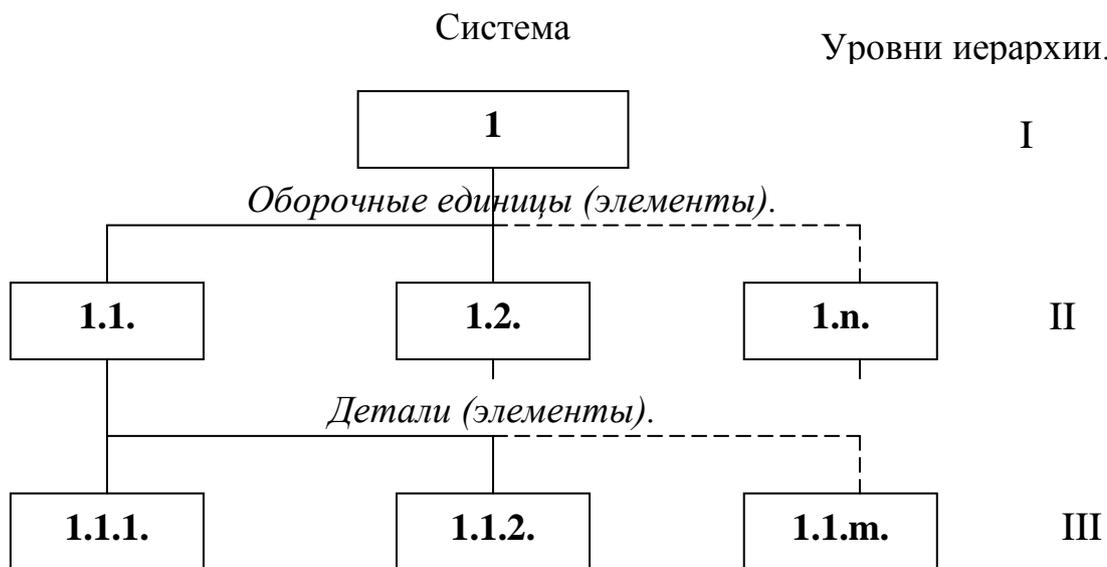


Рис. 1.25.

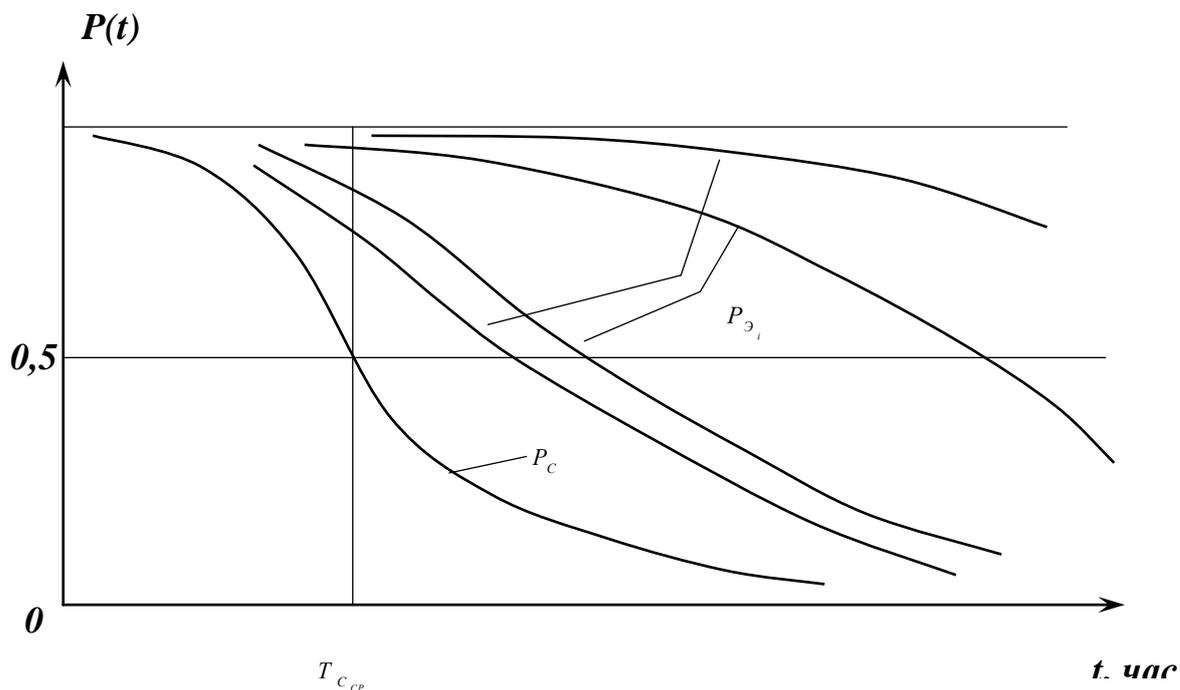


Рис. 1.26.

Дальнейшее развитие методов теории надежности было связано с расчетом все более сложных устройств и систем. Получили развитие методы экспериментального исследования механических и физико-химических

процессов, приводящих к отказу изделий. Ведутся работы в области диагностики и прогнозирования надежности, системное изучение механических, физических и химических условий как комплекса условий, влияющих на надежность.

На базе нелинейной механики деформирования и разрушения разрабатываются комплексные критерии надежности, износостойкости и материалоемкости технических систем. Эти критерии весьма важны для создания новой методологии проектирования машин и научного обоснования норм прочности и надежности, а также допустимости дефектов для различных областей машиностроения с учетом живучести и безопасности.

С учетом таких исследований, многие традиционные подходы теории надежности оправдавшие себя при рассмотрении отдельных деталей и простых систем не могут быть эффективно применены к машине в целом.

Согласно классическому подходу надежность при проектировании новой или модернизируемой машины может быть обеспечена при проведении следующих мероприятий:

- обеспечение схемной надежности машины. схема машины должна быть выбрана так, чтобы число ее элементов было по возможности, меньшим, а появление отказов, по крайней мере типовых, известных из практики, исключалось или сводилось к приемлемому минимуму;

- обеспечение высокой надежности каждого элемента. Если элементы – готовые (выпускаемые промышленностью), то надежность их обычно неодинакова. За счет отбора можно получить элементы повышенной надежности;

- обеспечение качества, в частности стабильности характеристик материалов и комплектующих изделий. Сужение пределов изменения характеристик материалов – один из путей обеспечения точности расчетов. Это относится в равной мере и к готовым изделиям, и к узлам, полученным от поставщиков по кооперации (комплектующие изделия);

- широкое использование унифицированных и стандартных элементов. Такие элементы являются обычно более надежными, особенно при их изготовлении на специализированных предприятиях;

- защита от вредных воздействий, от внешней среды. Как показывает опыт, изделия выполненные по одинаковой схеме и собранные из одинаковых элементов, могут значительно отличаться по надежности в зависимости от того, насколько они защищены, например, от вибраций, высоких или низких температур, воздействия наружной или окислительной среды;

- правильный выбор режима (условий) работы машины. Сюда относится большое число различных случаев. Например, нагруженность агрегатов трансмиссии автомобиля зависит от выбора коэффициента запаса сцепления  $\beta > 1$ . Если  $T_d$  - крутящий момент двигателя, то при включении сцепления за счет инерционных нагрузок трансмиссии передается момент  $\beta \cdot T_d$ , который и определяет нагруженность ее агрегатов и их долговечность. В конструкциях сцеплений, в которых сила пружин не регулируется коэффициент  $\beta$  выбирают со значительным запасом ( $\beta = 2,0 \div 2,3$ ), так что условие  $\beta > 1$  сохраняется, несмотря на значительный износ накладок ведомых дисков. Условие  $\beta > 1$  можно поддерживать и при уменьшенном запасе ( $\beta = 1,5 \div 1,8$ ) введением дополнительной регулировки, восстанавливающей силу пружин, т.е. компенсирующей износ фрикционных накладок. Режим работы агрегатов трансмиссии в результате облегчается;

- расширение допускаемых пределов для параметров, определяющих работоспособность машины. Например, эффективность тормозного механизма зависит от зазора между колодками и тормозным барабаном, следовательно, от степени износа тормозных накладок. Если зазор устанавливают вручную и величину его в эксплуатации не проверяют своевременно, то надежность тормозного механизма снижается. Если же предусмотрено автоматическое поддержание величины зазора в

эксплуатации, то работоспособность тормозного механизма сокращается при износе накладок до предельного состояния, т.е. надежность тормозного механизма повышается;

- резервирование. В конструкции при возможности необходимо создавать избыточность (резервы) в интересах обеспечения высокой надежности. Резервирование позволяет из менее надежных элементов создавать более надежные изделия;

- уточнение методов расчета, в частности вероятностная оценка условий внешних воздействий и параметров самого изделия.

Ряд элементов, составляющих машину, в условиях массового производства может иметь скрытые дефекты. Поэтому возможны критические комбинации воздействий (механических, тепловых, электрических и пр.) и самих дефектов, которые приведут к отказу. Чем точнее учтены эти случайные явления в процессе проектирования и, в частности, расчета, тем надежнее будет изделие, тем экономнее и быстрее будет обеспечен необходимый уровень надежности;

- совершенствование методов испытаний, уменьшение их продолжительности, объема.

Решение о выборе тех или иных путей обеспечения надежности агрегата или системы принимает конструктор, исходя из предъявляемых требований и особенностей рабочего процесс узла, агрегата. Конструктор многое может сделать для обеспечения надежности, но сначала он мало знает о надежности будущего изделия: подробная информация об изделии появится после того, как оно в будущем пройдет достаточно длительную эксплуатацию. В стадии проектирования проводят предварительные испытания сначала материалов и элементов изделия, а затем и опытных образцов, стремясь возможно точнее смоделировать реальные условия эксплуатации.

Чем раньше начинается экспериментальная и конструкторская работа по обеспечению надежности, чем больше вероятность того, что затраты не превзойдут установленного уровня, обеспечение надежности обходится тем дороже, чем дальше от чертежной доски и предварительных расчетов оно находится.

Многие ведущие зарубежные машиностроительные фирмы сознательно идут на значительные расходы по расчету надежности своих изделий, их испытанию и доводке с целью повысить их качество, надежность и конкурентоспособность. Такие расходы иногда составляют до трети себестоимости изделий.

В условиях рыночной экономики проблема создания надежной техники приобретает еще большую актуальность.

Более надежное изделие стоит дороже, однако, потребителю бывает выгодно приобрести дорогую, но надежную машину, которая окупит в процессе эксплуатации свою повышенную стоимость и даст большую прибыль.

Однако следует отметить, что в большинстве случаев конструкторы машин на стадии проектирования выполняют расчет элементов конструкции только на прочность и не производят их расчет на надежность (безотказность).

Обеспечение безотказности – задача комплексная, охватывающая широкий круг вопросов на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации машины. Основой для планирования и осуществления конкретных мероприятий должны служить научно-обоснованные нормативы безотказности основных составных элементов машины, без которых работа по обеспечению надежности машины в целом теряет ориентиры и не может быть успешно выполнена.

Если нормативы надежности (безотказности) научно не обоснованы и не распределены по составным частям, то в этом случае требования к

безотказности элементов отсутствуют (или назначаются по интуиции), и без этого работа по обеспечению требуемого уровня безотказности машины не может иметь достаточной целенаправленности и конкретности. В таком случае часто происходит ситуация, когда затрачивается много материальных и трудовых затрат по повышению отдельных элементов конструкции машины, а эффект от этого незначителен. В результате при проведении стендовых и других испытаний на надежность составных частей машины нет научно-обоснованного объема испытаний и нет должной методики оценки результатов.

Ярким примером такого положения явилась ситуация, которая сложилась вокруг хлопкоуборочных машин (навесное оборудование) выпускавшихся на заводе «Ташсельмаш». Несмотря на то, что для повышения надежности этих машин был задействован огромный научный и материальный потенциал, их безотказность в течении долгих лет выпуска оставалась на очень низком уровне.

Выпускавшаяся с 1986 г. и соответствовавшая мировому уровню четырехрядная хлопкоуборочная машина 14 ХВ – 2,4 Г имела примерно одинаковые характеристики с американской «Джон Дир». Однако цена последней на мировом рынке более чем в десять превышала цену машины, выпускавшейся в Узбекистане. Одна из главных причин такой разницы в стоимости – высокая безотказность «Джон Дир» и низкая безотказность продукции завода «Ташсельмаш».

На рис. 1.27 представлен график изменения достигнутого уровня средней наработки на отказ хлопкоуборочных машин различных модификаций за период с 1976 по 1991 гг.

Как видно из этого рисунка характер изменения кривой, отражающей изменение средней наработки на отказ, не имела тенденции к увеличению и оставалась на низком уровне (более чем на порядок ниже нормативного требуемого уровня).

В связи с этим можно сделать вывод о том, что отсутствие научно-обоснованных нормативов безотказности составных частей явилось серьезным препятствием для организации работ, направленных на решение проблемы по повышению безотказности машин.

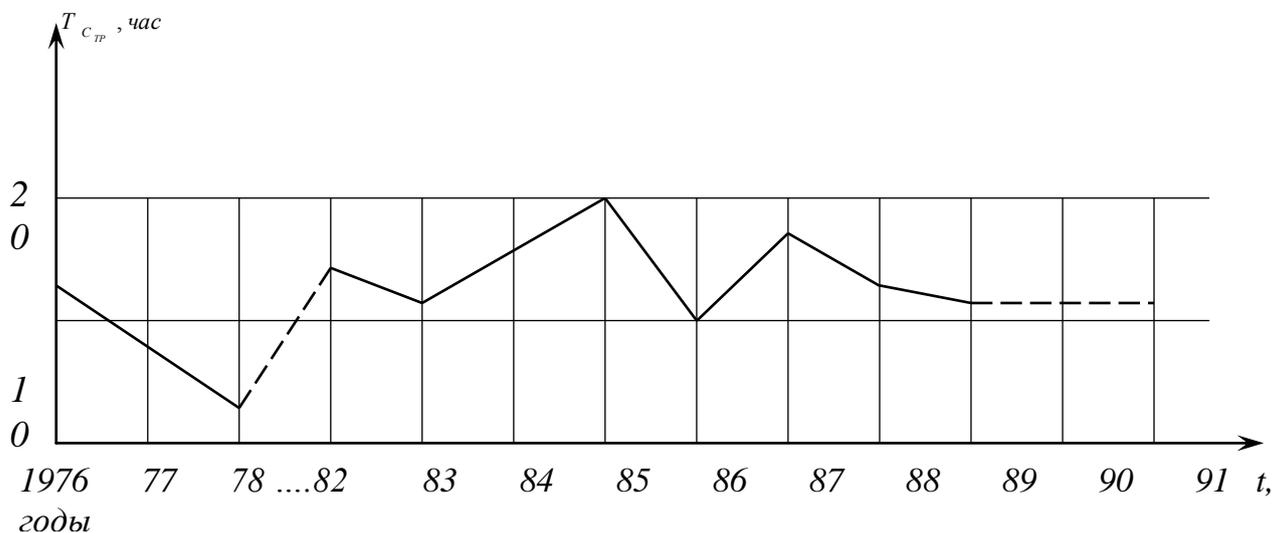


Рис. 1.27

Также можно сделать вывод, о том, что низкая безотказность была обусловлена (явилась следствием) отсутствия приемлемой методики обеспечения безотказности машины на этапе проектирования. Поэтому все мероприятия по повышению надежности при производстве и эксплуатации хлопкоуборочных машин не способствовали обеспечению требуемого (достигнутого уровня надежности хлопкоуборочных машин зарубежных фирм) уровня безотказности в течении многих лет поиска и работы.

Многие опубликованные в литературе методики в силу принятых в них допущений, предположений и ограничений, не всегда возможно и целесообразно применять при расчете безотказности вновь проектируемых или существенно модернизируемых машин, в том числе и тюнинг-автомобилей.

В связи с этим и с учетом вышеизложенного можно сделать вывод о том, что проблема разработки приемлемой (для любых ситуаций) методики является актуальной, и её решение требует дальнейшего исследования.

## 1.8.2. О конструктивной надежности автомобиля

Надежность автомобиля определяется рядом свойств и их показателей. Рассмотрим наиболее распространенные из них: вероятность безотказной работы  $p$ , широко используемую при теоретических расчетах, и наработку на отказ  $s_{отк}$ , удобную при оценке надежности автомобиля в эксплуатации и измеряемую обычно числом километров пробега между появлениями отказов.

Величины  $p$  и  $s_{отк}$  взаимно связаны. Установим эту связь при упрощающих предположениях. Если  $N_0$  — число автомобилей в начале эксплуатации, а  $s$  — заданная величина пробега, то  $N_{осп}$  — наработка исправных автомобилей (в км). Если вероятность отказа  $i$ -го изделия составляет  $1 - p_i$ , а пробег до появления отказа соответственно  $s_i < s$ , то при общем числе отказавших автомобилей  $n$  наработка на отказ составит

$$s_{отк} = \frac{N_0 p s + \sum_{i=1}^n N_0 (1 - p_i) s_i}{N_0 (1 - p)} \geq s_{мин}$$

Минимальная наработка на отказ

$$s_{мин} = \lim_{s \rightarrow 0} s_{отк} = \frac{p}{1 - p} s$$

Отсюда минимальное значение вероятности безотказной работы

$$p = \frac{s_{отк}}{s + s_{мин}}$$

График, соответствующий этому выражению, приведен на рис. 1.28.

Для автомобиля примем величину  $s$ , соответствующей пробегу до капитального ремонта (5—120 тыс. км). В настоящее время можно считать приемлемой наработку на отказ  $s_{мин} = s_{отк} \approx 5$  тыс. км, т. е. пробегу между техническими обслуживаниями № 2. При обычной системе технического обслуживания и достаточно развитой технической диагностике такая величина  $s_{мин}$  может обеспечить практически безотказную работу автомобиля

от одного технического обслуживания до другого, т. е. за пробст  $s$ . По формуле, определяющее минимальные значения вероятности безотказной работы или рис. 1.28 определим, что желательная величина безотказной работы автомобиля должна быть в этом случае не менее 4% при обычных условиях эксплуатации. Таким образом, особенность автомобиля состоит в том, что для него достаточна очень небольшая вероятность безотказной работы. Для особо ответственных восстанавливаемых изделий (самолетов) вероятность безотказной работы должна быть значительно выше. Еще больших значений она достигает для невосстанавливаемых элементов изделия (например, для подшипников качения  $p > 90\%$ ).

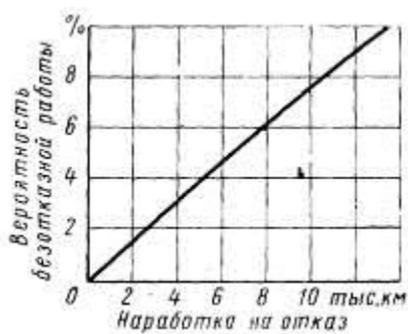


Рис. 1. 28. Связь между наработкой на отказ автомобиля и минимальной вероятностью безотказной работы

В существующих автомобилях действительная наработка па отказ значительно меньше необходимой. Задача заключается в том, чтобы увеличить надежность автомобилей в несколько раз. Проблема повышения надежности является весьма важной, так как отказы наступают, несмотря на большие затраты времени и средств па службу технического обслуживания и ремонта автомобиля. За амортизационный срок они превышают стоимость изготовления автомобиля в 7 раз по денежным затратам и в 60 раз по трудоемкости изготовления.

Надежность автомобиля закладывается при проектировании, обеспечивается при его изготовлении, поддерживается и проявляется в эксплуатации. Поэтому учет требований надежности при конструировании автомобиля имеет первостепенное значение.

Условимся понимать под конструктивной надежностью сумму мероприятий по обеспечению надежности конструкции, проводимых на стадии проектирования автомобиля.

Основные направления, позволяющие обеспечить конструктивную надежность механизмов и систем автомобиля, сводятся к следующему:

1. Конструкция должна быть простой, с минимальным числом элементов. Наблюдающееся постепенное усложнение конструкции автомобиля не снижает надежности последнего только в том случае, если сопровождается комплексом мероприятий, поддерживающих или повышающих его безотказность.

Каждый элемент (деталь, узел, система) должен обладать возможно более высокой надежностью. Практически это достигается широким использованием стандартизованных, нормализованных, унифицированных элементов, полагая, что они лучше отработаны и более надежны, чем нестандартные.

Функциональная схема изделия должна выбираться так, чтобы обеспечить высокую его безотказность (схемная надежность).

В необходимых случаях должно использоваться резервирование, т. е. создание в конструкции резервов того или иного вида, повышающих вероятность безотказной работы изделия.

Пределы изменения выходных параметров в процессе эксплуатации изделия должны быть достаточно широкими. Режим работы элемента должен быть при необходимости облегчен защитой его от влияния окружающей среды, уменьшением числа и продолжительности пиковых нагрузок и т. п.

Последствия отказов должны быть минимальными. При конструировании должна быть предусмотрена совершенная технология изготовления. Необходимы легкость контроля исправного состояния конструкции, легкость замены невосстанавливаемых деталей и узлов и

удобство восстановления предназначенных для этого элементов, удобство сборки, регулировки, разборки конструкции.

Для обеспечения конструктивной надежности необходима хорошо налаженная служба по сбору, обработке, использованию информации об отказах и причинах недостатков в надежности конструкции, а также по анализу надежности прототипов и аналогичных конструкций.

Приведенное деление является условным, так как отдельные направления, например, перечисленные в пп. 3, 4, 5, тесно связаны друг с другом.

При проектировании автомобиля так или иначе используются все перечисленные выше направления.

Прежде чем останавливаться на этом подробнее, рассмотрим, как отражается на безотказной работе изделия тот или иной способ соединения его элементов. Схемы соединения элементов и резервирование. На рис. 1.29 приведены схемы последовательного (а), параллельного (б) и смешанного (в) соединений элементов. Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов

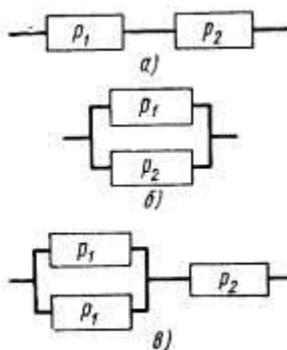


Рис. 1.29. Схемы соединения элементов

$$P = p_1 p_2 \dots = \prod_{i=1}^n p_i$$

Если, например, один элемент «ненадежный»  $p_1 = 0,5$ , а другой — «надежный»  $p_2 = 0,8$ , то  $p = 0,5 \cdot 0,8 = 0,4$ . Надежность последовательного соединения получается ниже надежности самого ненадежного элемента. В автомобиле большинство элементов соединены последовательно, например,

двигатель и трансмиссия. Вероятность безотказной работы параллельно включенных элементов равна

$$p = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$$

Если элементы с  $p_1 = 0,5$  и с  $p_2 = 0,8$  соединить параллельно, то получим  $p = 1 - 0,5 \cdot 0,2 = 0,90$ , т. е. надежность параллельного соединения выше надежности самого надежного элемента.

В автомобиле примерами параллельных включений с появлением частичных отказов при отказе одного элемента являются ведущие мосты автомобиля при раздельном их приводе, сдвоенные шипы задних мостов, включение источников тока, применение двух и более ремней в клиноременных передачах, основного и дополнительного упругих элементов в подвеске, включение сателлитов планетарной передачи и др.

Смешанное соединение включает как последовательно, так и параллельно соединенные элементы. Пусть для последовательного соединения величина  $p = 0,4$  недостаточна. Присоединим параллельно «ненадежному» элементу второй такой же элемент (рис. 1.29, в)

Тогда получим

$$p = [1 - (1 - p_1)^2] p^2 = (1 - 0,25) 0,8 = 0,6$$

т. е. вероятность безотказной работы значительно возросла.

В автомобиле примером смешанного соединения является включение источников, связанных между собой параллельно, и каждого потребителя электрической энергии, соединенного последовательно с источниками тока.

Введение в конструкцию резервных элементов является средством получения надежных изделий из мало надежных элементов.

Резервирование ведет к увеличению веса, объема и стоимости изделия. Поэтому резервированием чаще пользуются в радиоэлектронных изделиях, где размеры элементов невелички, а требования к безотказности изделия обеспечить нелегко

В механических системах резервирование применяется при следующих основных предпосылках:

1. Эффект, который дает резервирование, себя оправдывает.
2. Надежность элементов изделия недостаточна и не может быть повышена более простыми средствами.
3. В изделии предусмотрен ответственный («слабый») элемент, отказ которого равноценен отказу всего изделия.
4. Отказ одного элемента (основного) не вызовет отказа другого элемента (дополнительного).
5. Обеспечена возможность своевременного переключения с одного элемента на другой (с основного на резерв).

Несмотря на перечисленные ограничения, резервирование имеет достаточно широкое распространение в автомобильных конструкциях. Прежде чем это пояснить, рассмотрим основные виды резервирования.

Схемное резервирование. Резервирование возможно по изделию (общее резервирование) или его элементам (поэлементное резервирование). Это по существу один из схемных методов, при котором параллельно включаются одинаковые целые изделия или их элементы.

Условимся относить к резервированию не только системы с избыточными элементами, но и параллельные включения, при которых отказ одного элемента не вызывает отказа всего изделия, а в худшем случае ведет лишь к некоторому снижению его работоспособности.

Резервирование с использованием дополнительного (резервного, запасного) элемента — частный случай. Более общим является создание запаса (резерва) по тому или иному параметру, определяющему основные свойства изделия (например, мощность, прочность, теплостойкость и т. п.).

При схемном резервировании различают три основных способа включения резервного элемента: нагруженный (горячий); ненагруженный (холодный); облегченный (теплым).

Схемой с нагруженным резервом является любое параллельное соединение элементов, при котором в случае отказа одного элемента продолжает работать другой. Встречаются конструкции спортивных и специальных автомобилей с двумя двигателями, передающими мощность на общую трансмиссию автомобиля. Так как движение возможно и при одном работающем двигателе, второй играет роль горячего резерва.

Схемой с ненагруженным резервом является такая, при которой каждый из параллельно включенных элементов работает поочередно. Это включение способствует увеличению долговечности одного из элементов, но могут возникнуть дополнительные трудности при переключении с основного элемента на резервный. Система с холодным резервом широко используется в системе пуска двигателей: помимо основной системы (электрический стартер), предусмотрена дополнительная — ручной пуск при малой мощности двигателя или пуск от сжатого воздуха при двигателях значительной мощности. Переход с основной системы на резервную не встречает трудностей. Иначе обстоит дело, например, с обеспечением надежной работы рулевого гидропривода, имеющего основной насос с приводом от двигателя и в холодном резерве насос с приводом от колеса. Переход от основного элемента к резервному должен быть автоматическим и обеспечиваться специальными муфтами.

Облегченное резервирование встречается в некоторых электронных схемах. Например, параллельно основной лампе включается резервная, находящаяся под слабым током. Благодаря этому переход с основной лампы на резервную происходит более быстро, без затрат времени на прогрев ее нити.

Возможно также смешанное резервирование, когда один из элементов может служить то холодным, то горячим резервом, как, например, в автомобилях с двумя двигателями, о которых упоминалось выше.

Общее и поэлементное резервирование в автомобилях применяется в системах, связанных с безопасностью движения, например, в тормозных системах и шинах.

Рассмотрим схемы нескольких типовых тормозных систем. В тормозных системах ряда отечественных и зарубежных автомобилей, выпускавшихся после окончания войны, усилие от педали или ручного рычага передавалось на одни и те же тормозные механизмы колес. Часть привода была, таким образом, включена параллельно, а остальная часть тормозной системы — последовательно.

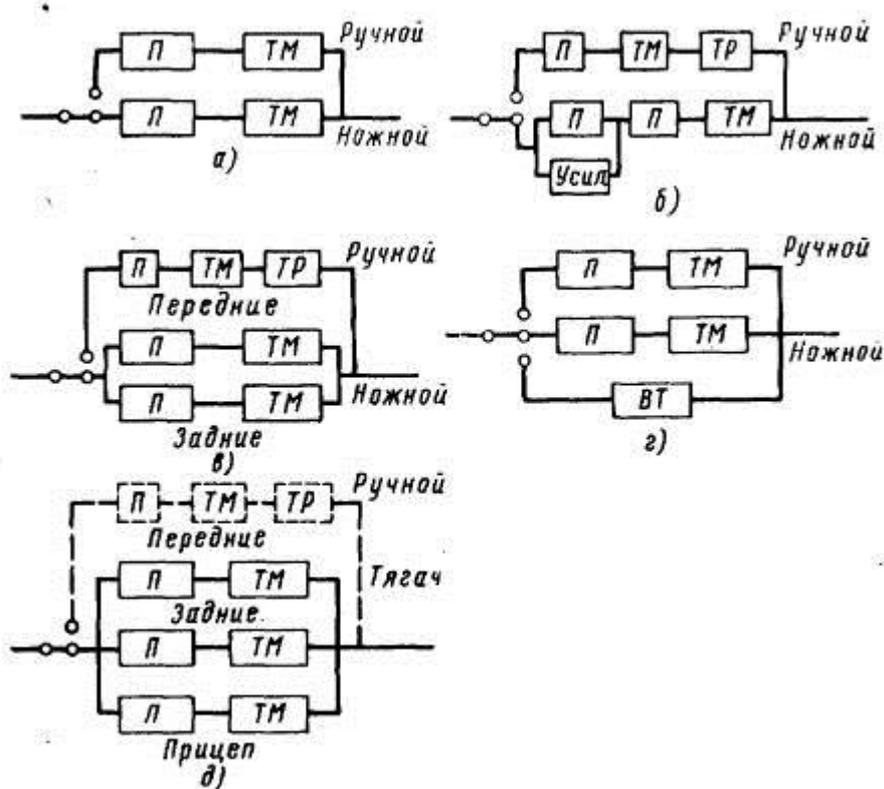


Рис. 1.30. Схемы тормозных систем (П — привод; ТМ — тормозной механизм; ТР — механизмы трансмиссии, участвующие в передаче тормозного момента)

Последние 20 лет для легковых автомобилей наибольшее распространение имела схема, приведенная на рис. 1.30, а. Ножная и ручная тормозные системы имели отдельные привод и тормозные механизмы с параллельным включением обеих систем. При этом ручного тормоз служил

холодным резервом. Центральное расположение тормоза заставляет " включить в его структурную схему механизмы трансмиссии, участвующие в передаче тормозного момента.

На грузовых автомобилях с полным весом до 8 т и на легковых автомобилях высокого класса, в тормозную систему ножного тормоза вводится усилитель, включенный по схеме, близкой к нагруженному резерву (рис. 1.30,б): при отказе усилителя торможение остается возможным за счет мускульной силы водителя. Однако схема не соответствует в точности принципиальной схеме с нагруженным резервом, так как наступает отказ при неисправном гидравлическом цилиндре усилителя, что не должно происходить при параллельном включении.

За последние годы получают распространение тормозные системы повышенной надежности, отличающиеся тем, что одна ножная тормозная система заменяется двумя системами, параллельно сниженными друг с другом и работающими по схеме нагруженного резерва. На схеме рис. 1.30, в одна часть ножной тормозной системы действует на передние колеса, а другая — на задние.

Во всех этих схемах тормозные механизмы колес работают в условиях большой тепловой напряженности и с износом, порождающим опасность отказа. Стремление разгрузить основную тормозную систему привело к появлению на грузовых автомобилях и автобусах, главным образом с дизелями, третьей тормозной системы, обычно в виде выпускного тормоза ВТ, включенного параллельно двум остальным системам (рис. 1.30, г). Преимущество схемы заключается в том, что при некоторых тяжелых режимах (горные условия, затяжные спуски и др.) основная система становится ненагруженным резервом. Появились предложения переноса ручного тормоза на задние колеса, повышающего надежность ручного тормоза,

Идеи параллельных включений широко используются в тормозных системах автопоездов. Значительный вес поезда и большие скорости движения требуют особо надежных тормозов при междугородных перевозках. Тормозная система разбивается на ряд контуров, параллельно связываемых друг с другом. Одна из таких систем представлена на схеме (рис. 1.30, д), где ножная система включает три независимых контура соответственно с передними и задними тормозами тягача, а также с тормозами прицепа.

Схемы тормозных систем не всегда повторяют в точности схемы с резервированием, применяемые, например, в радиоэлектронике. Однако идеи параллельных включений помогают повышать безопасность движения автомобилей и автопоездов.

Своеобразной формой резервирования является использование запасных частей, возимых на самом автомобиле, например, запасного колеса. Вопрос о том, нужно ли оно или сколько должно быть запасных колес, может, видимо, получить обоснование в зависимости от требуемой надежности, условий работы шип, числа колес на автомобиле и других факторов.

Описанные способы повышения надежности механизмов и систем автомобиля, хотя и соответствуют общим положениям теории надежности, но появились независимо от ее развития. Возникает вопрос, — что может дать теория надежности и можно ли, как и прежде, решать каждый возникающий вопрос, руководствуясь опытом и здравым смыслом.

Существует ряд причин, требующих применения теории надежности уже в стадии проектирования автомобиля. Основные из них следующие:

1. Возможность обобщения частных решений, приемов, догадок, сведение их в единую систему. Недостаточная надежность существующих автомобилей требует такой общей теории обеспечения надежности автомобиля и его элементов.

2. Растущее число автоматических устройств и систем автомобиля, усложнение его конструкции. "Например, система переключения передач с рычагом на коробке может быть сделана безотказной и без теории надежности. Для коробки передач с автоматическим управлением надежная работа «сама собой» уже может не обеспечиваться, так как необходимы мероприятия по безотказности работы системы.
3. Возможность прогнозирования надежности, сравнения и количественной оценки надежности различных систем и механизмов автомобиля уже в стадии проектирования.

**Приведем пример.** Тормозные системы повышенной надежности.

Рассмотрим несколько тормозных систем с гидравлическим тормозным приводом.

Для оценки надежности той или иной системы необходимо составить структурную схему включения ее элементов. Эта схема не повторяет их топографического размещения или идеи параллельности и последовательности электрических систем. В основе схемы лежит влияние элементов на вероятность безотказной работы системы.

На рис. 1.31, а приведена обычная схема тормозной системы с гидравлическим приводом. Ее элементы: главный тормозной цилиндр и тормозы, состоящие из тормозных механизмов и рабочих цилиндров с соответствующими участками тормозных трубопроводов. Отказ любого из этих элементов приводит к выходу из строя всей тормозной системы. Поэтому соединение элементов тормозной системы приходится считать последовательным. Рассмотрим схему, приведенную на рис. 1.31,а. Обозначим вероятности безотказной работы главного тормозного цилиндра  $p_{Г.ц}$ , тормоза  $p_m$ , тормозного механизма и привода соответственно  $p_{Т.М}$  и  $p_{П}$ . Полагая вероятности безотказной работы для тормозов всех колес одинаковыми, для надежности тормозной системы получим

$$P = p_{Г.ц} p_{П}^4 p_{Т.М}^4 = p_{Г.ц} p_T^4$$

В настоящее время нет достаточных данных о надежности элементов тормозных систем. Поэтому примем пока следующие числовые значения: новый автомобиль  $p_{Г.Ц.}=0,88$  и  $p_T=0,69$ ; находящийся в эксплуатации  $p_{Г.Ц.}=0,84$  и  $p_T=0,59$ .

С помощью выражения, определяющая надежность тормозной системы определим, что вероятность безотказной работы тормозной системы составит  $p \approx 20\%$  у нового автомобиля и  $p \approx 14\%$  у автомобиля после некоторой его эксплуатации.

Использование приближенной формулы, определяющая минимальную наработку на отказ даст минимальную наработку на отказ около 27 тыс. км для нового автомобиля и 13,2 тыс. км для автомобиля, находящегося в эксплуатации. Эта последняя цифра близка к данным обследования тормозных систем автомобилей ряда автохозяйств.

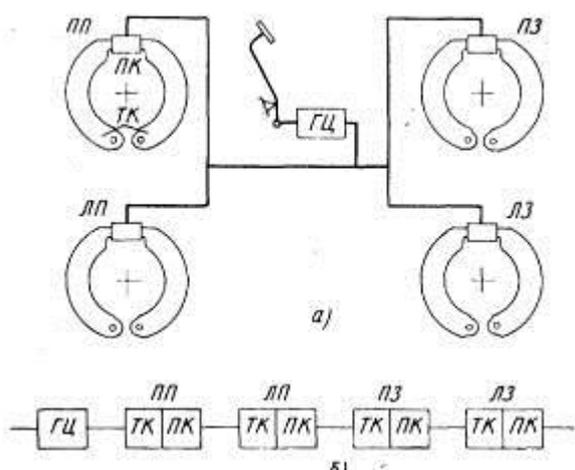


Рис. 1.31. Тормозная система с гидравлическим приводом (ПК — рабочий цилиндр привода к колесу с соответствующим участком трубопровода): а — функциональная схема; б — структурная схема

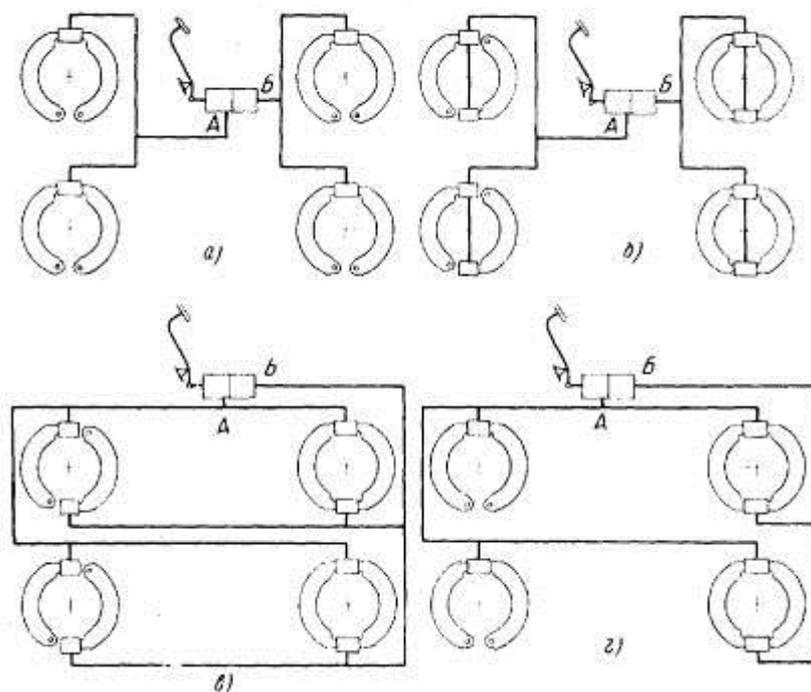


Рис. 1.32. Схема тормозных систем повышенной надежности

Рассмотрим некоторые схемы тормозных систем повышенной надежности, приведенные на рис. 1.32. Все они имеют двухсекционный или двоярный главный тормозной цилиндр, позволяющий воздействовать от педали на две независимые системы: передних и задних тормозов (рис. 1.32, а, б), всех четырех колес (рис. 1.32, в, в), или одних задних колес (рис. 1.32, г). Схема рис. 1.32, а рекомендуется для легковых автомобилей и грузовых грузоподъемностью до 1 т. Схема рис. 1.32, б отличается большим тормозным эффектом, поскольку передние тормоза выполнены с разнесенными опорами, а задние — плавающие. Эту схему предпочтительна для грузовых автомобилей грузоподъемностью 1,5—3,0 т. В обеих схемах при отказе одного из тормозов работают либо передние, либо задние тормоза. Поскольку в этих случаях можно ожидать значительной разницы в поведении автомобиля во время торможения, в частности в его устойчивости и управляемости, появилась схема рис. 1.32, в, при которой в случае любого повреждения тормоза всех колес остаются действующими, но тормозные моменты уменьшаются. Для схемы рис. 1.32, г характерно то, что одна

тормозная система действует на все колеса, а другая — только на задние, подобно ручному тормозу в некоторых автомобилях.

Схемы включения элементов этих тормозных систем, приведены на рис. 1.33. Во всех случаях цепочки соединены параллельно с разным числом последовательно соединенных элементов.

Имеем следующие выражения для вероятности безотказной работы схем:

рис. 1.33, а и б;  $p = 1 - (1 - p_{г.ц} \cdot p_T^2)^2$

рис. 1.33, в,  $p = 1 - (1 - p_{г.ц} \cdot p_T^4)^2$

рис. 1.33, г;  $p = 1 - (1 - p_{г.ц} \cdot p_T^4)(1 - p_{г.ц} \cdot p_T^2)$

Вероятность безотказной работы тормозов разнообразных схем различна. Примем, что для тормоза с разнесенными опорами со связью рабочих цилиндров внутри тормоза  $p_T = 0,69$ , а при отдельном подводе жидкости к каждому цилиндру у тормоза как с разнесенными опорами, так и с плавающими колодками  $p_T = 0,73$  для каждой части тормоза.

Теперь можно воспользоваться приведенными выше формулами и определить вероятность безотказной работы тормозной системы нового автомобиля или находящегося в эксплуатации.

В таблице приведена сравнительная характеристика различных тормозных систем.

Таблица 1.19

Сравнительная характеристика различных тормозных систем

Схема тормозной системы	Вероятность безотказной работы* в %	Тормозной эффект** в % при		
		исправной системе	отказе в цепи А	отказе в цепи Б
Рис. 1.31,1.33	$\frac{20}{14}$	$\frac{50}{100}$	0	0
Рис. 1.33,а	$\frac{66}{50}$	$\frac{50}{100}$	$\frac{21}{31}$	$\frac{36}{44}$

Рис. 1.33,б	$\frac{66}{50}$	$\frac{73}{143}$	$\frac{36}{44}$	$\frac{41}{63}$
Рис. 1.33, в	$\frac{44}{26}$	$\frac{73}{143}$	$\frac{36}{73}$	$\frac{36}{73}$
Рис. 1.33, г	$\frac{59}{48}$	$\frac{60}{119}$	$\frac{21}{31}$	$\frac{50}{100}$
* Числитель соответствует новому автомобилю, знаменатель — бывшему и эксплуатации.				
** Числитель соответствует автомобилю без груза, знаменатель — с грузом.				

Для оценки тормозной системы важна не только ее надежность, существенны и другие качества, прежде всего получаемый тормозной эффект. Пользуясь применявшейся ранее методикой оценки тормозных моментов и учитывая лишь разницу в способах подвески колодок и в величинах вертикальных реакций при торможении грузового автомобиля на сухой дороге ( $\varphi = 0,7$ ), получим относительные значения тормозных моментов при различном состоянии тормозных систем, приведенные в таблице.

Из этой таблицы следует, что все схемы рис. 6 дают значительное повышение вероятности безотказной работы по сравнению с обычной системой. Схема рис. 1.33, в обладает высокой тормозной эффективностью и стабильностью тормозного эффекта при любом отказе, но относительно меньшей надежностью. Схема рис. 6, б в случае высокой надежности и высокой эффективности при исправном состоянии дает значительные колебания тормозной эффективности во время того или иного отказа.

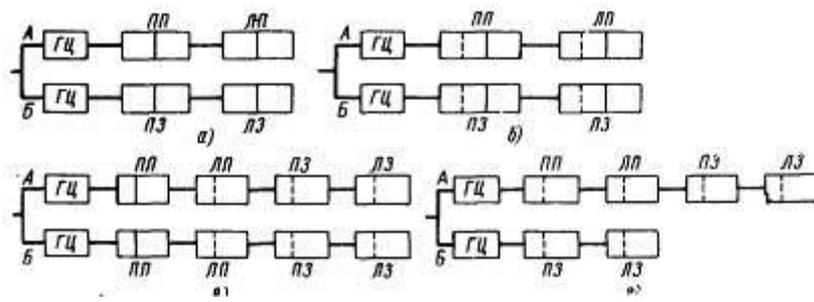


Рис. 1.33. Структурные схемы тормозных систем, соответствующих схемам рис. 1.32

Схема рис. 1.33, г обладает достаточной надежностью и тормозной эффективностью, но при отказе в контуре А тормозная эффективность значительно снижается.

Подобные расчеты дают полезную информацию для выбора тормозной системы, сочетающей в себе эффективность с надежностью. Ценность этой информации в количественной оценке той или иной системы.

Обобщая изложенное, отметим, что обеспечение надежности автомобиля при его проектировании, т. е. его конструктивной надежности, имеет решающее значение для создания высокой надежности автомобиля в эксплуатации.

Целесообразно использовать теорию надежности с тем, чтобы придать общность частным приемам и предложениям по повышению надежности узлов и систем автомобиля.

**1.8.3. Анализ методов обоснования и расчета нормативов надёжности сложных технических систем.**

Основным ориентиром в обеспечении безотказности должны являться научно-обоснованные нормативы на все составные элементы проектируемой системы. В общем виде задача распределения требований к безотказности элементов системы может быть сформулирована так: требуемый показатель безотказности системы, состоящий  $n$  – элементов, задан; необходимо

определить, какой безотказностью должен обладать каждый элемент. Эта задача может быть решена несколькими методами, описанными в работах [3, 5, 8, 9, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 19, 20].

Однако, как показал анализ этих методик в силу, принятых в них требований, допущений и ограничений, применить их в полной мере при расчете безотказности автомобиля нецелесообразно или не всегда представляется возможным.

Согласно этим работам, в зависимости от имеющейся априорной информации, могут применяться различные способы определения нормативных значений показателей безотказности составных частей изделия. Рассмотрим основные из них, принципы, которых, без названия способа расчета применены и в некоторых других работах, посвященных решению данной задачи.

### **1.8.3.1. Метод равномерного распределения.**

При этом методе предполагается, что система состоит из  $n$  последовательно соединенных элементов, имеющих одинаковую безотказность (отказ любого элемента приводит к отказу системы), что элементы системы выходят из строя независимо друг от друга и что интенсивность отказов постоянна.

Пусть  $P_{TP}$  – требуемая вероятность безотказной работы системы, а  $P_{iTP}$  – требуемая вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы. Тогда

$$P_{TP} = \prod_{i=1}^n P_{iTP}$$

или

$$P_{iTP} = \sqrt[n]{P_{TP}}, \quad i = 1, \dots, n$$

Требуемую среднюю наработку на отказ  $i$ -го элемента системы определяют по выражению

$$T_{i_{TP}} = n \cdot T_{TP}$$

где  $T_{TP}$  – требуемая средняя наработка на отказ системы (в данной и последующих методиках условные обозначения показателей надежности приведены в соответственно принятым в рассматриваемых работах).

Ограничением этого метода является то, что уровень безотказности элементов системы устанавливается без учета их важности, последствия отказов и степени трудности достижения требуемой безотказности. Также данный метод применим только при постоянной интенсивности отказов т.е., при экспоненциальном законе распределения наработок на отказ элементов. Эти условия у автомобиля не выполняются, поэтому данный метод применить для поставленных целей не представляется возможным.

### **1.8.3.2. Метод распределения с учетом значимости элементов.**

Этот метод распределения применяется для ориентировочного расчета нормативных значений показателей безотказности элементов системы при наличии структурной схемы системы – аналога и при известных значениях показателей безотказности элементов системы – аналога. При определении нормативных значений показателей безотказности элементов системы с учетом информации о показателях безотказности элементов системы – аналога используется следующие зависимости:

$$P_{i_{TP}} = P_{TP} \cdot \frac{1}{W_i}$$

$$P_{i_{TP}} = P_{TP} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot \xi_i$$

$$P_{i_{TP}} = P_{TP} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot \eta_i$$

где  $W_i$ - коэффициент пропорциональности, учитывающий значимость показателей безотказности  $i$ -го элемента системы – аналога назначения

показателя безотказности системы аналога в целом и выражается следующей зависимостью:

$$W_i = \frac{1 - P_{i_a}}{\sum_{i=1}^n (1 - P_{i_a})}$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1$$

где  $P_a$  - вероятность безотказной работы  $i$  - го элемента системы аналога;

$n$  - число элементов в системе – аналоге;

$\xi_i$  - коэффициент учитывающий отношение скоростей изменения выходных параметров одноименных и  $i$ -ых элементов проектируемой системы и системы – аналога, работающих в разных условия эксплуатации;

$\eta_i$  - коэффициент, характеризующий отношение затрат на изготовление и поддержание работоспособного состояния одноименных  $i$ -ых элементов проектируемой системы и системы – аналога.

Требуемая средняя наработка на отказ и  $i$ -го элемента системы определяется по выражению

$$T_{i_{TP}} = T_{TP} \cdot \frac{1}{W_i}$$

где

$$W_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{i_a}}}$$

$T_{i_a}$  - средняя наработка на отказ  $i$ -го элемента системы аналога.

Для использования данного метода необходимо иметь информацию о безотказности элементов системы – аналога. Очевидно, что при проектировании или существенной модернизации машин, в качестве машины – аналога может выступать машина с приемлемым уровнем безотказности.

Получить полную информацию о безотказности аналога нового или тюнингового автомобиля невозможно, так как ее или нет или такие материалы не публикуются.

### **1.8.3.3. Метод распределения требований к безотказности элементов системы пропорционально затратам на их ремонт.**

Этот метод применяется на стадии проектирования изделия при известных нормативных затратах на текущие и капитальные ремонты изделия и его основных составных частей. Требуемая вероятность безотказной работы  $i$ -ой составной части изделия определяется по выражению

$$P_{i_{TP}} = \sqrt[n_i]{P_{TP}}$$

где

$$n_i = z_{k_a} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{1}{z_{k_a}}$$

$P_{TP}$  – требуемая вероятность безотказности работы изделия;

$z_{k_a}$  ( $k=1,2,\dots,i\dots n$ ) - затраты на ремонт (восстановление при одном отказе) аналога  $i$ -ой составной части.

Требуемая средняя наработка на отказ  $i$ -ой составной части определяется по выражению

$$T_{i_{TP}} = n_i \cdot T_{TP}$$

где  $T_{TP}$  – требуемая вероятность безотказной работы изделия.

При проектировании новых автомобилей еще нет данных нормативных затратах на текущие и капитальные ремонты.

### 1.8.3.4. Метод чувствительности.

Метод чувствительности определяют требуемые средние наработки на отказ покупных составных частей изделий.

Расчет производится в следующей последовательности:

а) определяют коэффициент приведения  $K_\lambda$  из уравнения

$$\frac{1}{T_{уз}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_\lambda \left( \frac{T_{уз\delta}}{C_{\delta_i}} \right)^2 + T_{\delta_i}}$$

где  $T_{уз}$  и  $T_{уз\delta}$  - соответственно, требуемого и базовое значение средней наработки на отказ проектируемого изделия и изделия – аналога;

$C_{\delta_i}$  - стоимость аналога  $i$ -го составной части;

$T_{\delta_i}$  - средняя наработка на отказ аналога  $i$ -ой составной части.

При решении уравнения методом последовательных приближений, первое приближение можно вычислить по формуле

$$K_\lambda \approx \frac{T_{уз} - T_{уз\delta}}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{уз\delta}^2}{C_{\delta_i} - C_{\delta_i}} \right)^2}$$

б) определяет искомые нормы безотказности элементов по выражению

$$T_i = K_\lambda \left( \frac{T_{уз\delta}}{C_{\delta_i}} \right)^2 + T_{\delta_i}, \quad i = 1, \dots, n$$

Данный метод позволяет определить экономически оптимальные нормы безотказности составных частей проектируемого изделия, которые увеличивают их среднюю наработку на отказ, по сравнению с базовой моделью, до требуемого уровня.

Применение данного метода требует использования численных значений средние наработки на отказ всех основных составных частей базовой модели изделия.

Для нового или тюнингового автомобиля такую информацию получить очень трудно или практически невозможно.

### 1.8.3.5. Метод множителей Лагранжа.

Наиболее обоснованным считается способ распределения норм надежности, когда обеспечивается какое-либо дополнительное требование, связанное с повышением эффективности или экономичности разрабатываемого устройства.

Постановка задачи для подобных распределений выглядит следующим образом: известен (или задан) показатель надежности изделия  $R$ . Необходимо распределить надежность между составными частями изделия  $R_i$  так, чтобы были минимальными затраты на изготовление и обеспечение надежности  $C$ .

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min$$

при ограничениях

$$R = g(R_1, \dots, R_n);$$
$$C_i = \varphi_i(R_i), \quad i = \overline{1, n}$$

Здесь функция  $g(R_1, \dots, R_n)$  выражает зависимость между показателями надежности изделия и показателями надежности его составных частей, функция  $\varphi_i(R_i)$  - зависимость затрат  $C_i$  от показателей надежности  $R_i$   $i$ -ой составной части.

Для иллюстрации данного метода рассмотрим случай, когда для обеспечения требуемого уровня надежности системы необходимо повысить вероятность безотказной работы хотя бы одного элемента системы. При этом накладывается дополнительное условие, чтобы инженерные разработки, привлечение рабочей силы, проведение дополнительных испытаний, применение новой технологии для повышения надежности были минимальными.

Для решения этой задачи вводятся функции затрат

$$G(P_i, P_{i_{TP}}), \quad i = 1, \dots, n$$

где  $P_i$  - достигнутый уровень вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента системы;

$P_{i_{TP}}$  - требуемый уровень вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента системы;

$G(P_i, P_{i_{TP}})$  - дополнительные затраты, необходимые для повышения уровня надежности  $i$ -го элемента системы с  $P_i$  до  $P_{i_{TP}}$ .

Функция затрат  $G(P_i, P_{i_{TP}})$  обладает следующими свойствами:

1.  $G(P_i, P_{i_{TP}})$  - неубывающая функция по  $P_{i_{TP}}$  при фиксированном значении  $P_i$  т.е.

$$G(P_i, P_{i_{TP}}) < G(P_i, P_{i_{TP}} + \Delta P_{i_{TP}}) \text{ при } \Delta P_{i_{TP}} > 0$$

$$2. \sum_{i=1}^n G(P_i, P_{i_{TP}}) = G(P_c, P_{c_{TP}})$$

где  $P_c$  - существующий уровень безотказной работы системы;

$P_{c_{TP}}$  - требуемый уровень безотказной работы системы;

$G(P_c, P_{c_{TP}})$  - затраты, необходимые для повышения уровня надежности с  $P_c$  до  $P_{c_{TP}}$ , при  $P_c < P_{c_{TP}}$ .

Минимизировать целевую функцию

$$\sum_{i=1}^n G(P_i, P_{i_{TP}})$$

при ограничении

$$\prod_{i=1}^n P_{i_{TP}} = P_{c_{TP}}$$

Сформулированная задача решается методом неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа в данном случае имеет вид

$$\Phi(P_i, P_{i_{TP}}, \lambda) = \sum_{i=1}^n G_i(P_i, P_{i_{TP}}) + \lambda \left[ P_{c_{TP}} - \prod_{i=1}^n P_{i_{TP}} \right]$$



$$\left. \begin{aligned}
 \beta_1 - \lambda \frac{P_{c_{TP}}}{P_{1_{TP}}} &= 0 \\
 \beta_2 - \lambda \frac{P_{c_{TP}}}{P_{2_{TP}}} &= 0 \\
 \dots & \\
 \beta_n - \lambda \frac{P_{c_{TP}}}{P_{n_{TP}}} &= 0
 \end{aligned} \right\}$$

$$P_{c_{TP}} - \prod_{i=1}^n P_{i_{TP}} = 0$$

Решение этой системы уравнений можно получить следующим образом. Разрешаются первые  $n$  уравнений системы относительно  $\lambda$ .

$$\lambda = \beta_i \frac{P_{c_{TP}}}{P_{i_{TP}}}, \quad i = 1, \dots, n$$

Полученные уравнения перемножаются, в результате чего получается

$$\lambda^n = \prod_{i=1}^n \beta_i \cdot P_{c_{TP}}^{1-n}$$

Отсюда

$$\lambda = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \beta_i} \cdot \sqrt[n]{P_{c_{TP}}^{1-n}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \beta_i} \cdot \frac{1}{P_{c_{TP}}} \sqrt[n]{P_{c_{TP}}}$$

Это значение  $\lambda$  подставляется в уравнение

$$P_{i_{TP}} = \frac{\lambda}{\beta_i} \cdot P_{c_{TP}}$$

В результате получается

$$P_{i_{TP}} = \frac{1}{\beta_i} \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \beta_i} \cdot \sqrt[n]{P_{c_{TP}}}$$

или

$$P_{i_{TP}} = b_i \sqrt[n]{P_{c_{TP}}}$$

где

$$b_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \beta_i}}{\beta_i}$$

Таким образом, оптимальное распределение критериев надежности системы по элементам, ее составляющим, можно представить в следующем виде:

$$(P_{i_{TP}})_{ОПТ} b_i = \sqrt[n]{P_{c_{TP}}}$$

или

$$(P_{i_{TP}})_{ОПТ} = P_{c_{TP}}^{\alpha_i}$$

где

$$\alpha_i = \frac{1}{\ln P_{c_{TP}}} \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \ln \beta_i + \ln P_{c_{TP}} \right) \ln \beta_i \right]$$

Данный метод может быть применен при наличии данных о затратах на изготовление и обеспечение требуемой надежности (безотказности).

Эти ограничения не позволяют в полной мере использовать данный метод при расчете безотказности нового или тюнингового автомобиля. Однако данный метод может быть использован при расчете безотказности отдельных составных частей автомобиля (для элементов гидро – пневно – водосистемы, закрытых зубчатых передач и др.), имеющих аналоги.

### **1.8.3.6. Метод распределения требований по безотказности с учетом важности элемента.**

Предполагается последовательное соединение взаимно независимых элементов (подсистем), имеющих экспоненциальное распределение времени работы. Показатель важности элемента определяется через вероятность отказа системы, если этот элемент выйдет из строя. Показатель важности, равный единицы, означает, что для безотказной работы системы этот элемент должен безотказно работать, а показатель важности равный нулю, означает, что отказ этого элемента не влияет на работу системы.

При распределении требований к безотказности предполагают, что каждый элемент – модуль (сложный элемент системы) вносит одинаковый вклад в безотказную работу системы.

При расчетах используются следующие формулы:

I. Для расчета требуемой вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента системы при его требуемой наработке.

$$P_i = 1 - \frac{1 - P_{TP}^{N_i / N}}{\omega_i}$$

где  $N_i$  - число модулей в  $i$ -ой подсистеме;

$N$  - общее число модулей в системе;

$\omega_i$  - показатель важности для  $i$ -ой подсистемы (вероятность отказа системы при выходе из строя  $i$ -го элемента подсистемы);

$P_{TP}$  - требуемая вероятность безотказной работы системы.

$$\omega_i = \frac{d_{c_i}}{d_i}$$

где  $d_{c_i}$  - число отказов системы вследствие отказа  $i$ -го элемента (подсистемы);

$d_i$  - число отказов  $i$ -го элемента (подсистемы) за то же время работы.

Распределение надежности по данному методу дает хорошее приближение, если для каждого элемента (подсистемы) значение коэффициента важности  $\omega_i$  близко к единице.

Данный метод применим при экспоненциальном распределении времени наработок на отказ и при допущении и равнонадежности сложных элементов, входящих в подсистему.

Для тюнингового и вновь проектируемого автомобиля это ограничение не приемлемо.

### 1.8.3.7. Метод распределения требований по безотказности с учетом относительной уязвимости элементов

При этом предполагается, что подсистемы соединены последовательно и имеют постоянную интенсивность отказов, что отказ любой подсистемы вызывает отказ всей системы и что заданная наработка подсистем равна заданной наработке системы. При использовании этого метода необходимо выразить требуемую безотказность через интенсивности отказов. Задача состоит в том, чтобы выбрать такие  $\lambda_i$ , что

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \leq \lambda_{TP}$$

где  $\lambda_i$  - заданная интенсивность отказов  $i$ -ой подсистемы;

$\lambda_{TP}$  - требуемая интенсивность отказов системы.

Метод включает следующие этапы:

1. Определение интенсивности отказов подсистем  $\lambda_i$  по результатам наблюдений или на основе оценок по данным за прошлое время;

2. Задание весового множителя  $\omega_i$  для каждой подсистемы в соответствии с интенсивностями отказов, определенными на этапе 1;

$\omega_i$  определяются по формуле

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad i = 1, \dots, n$$

Таким образом,  $\omega_i$  показывает относительную уязвимость  $i$ -го элемента  
и

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$$

3. Вычисление требуемой интенсивности отказов подсистемы с помощью соотношения

$$\lambda_i = \omega_i \cdot \lambda_{TP}, \quad i = 1, \dots, n$$

Данный метод позволяет задать новые значения интенсивности отказов на основе весовых множителей, которые являются функциями интенсивностей отказов подсистем за прошлое время.

Этот метод применим при постоянной интенсивности отказов составных элементов системы, т.е. при экспоненциальном законе распределения времени работы. Это условие для основных составных частей тюнингового автомобиля в общем случае не выполняется.

Весовой множитель  $\omega_i$  определяется по результатам наблюдений или на основе оценок по данным за прошлое время.

Принятые в методике ограничения не приемлемы при расчете безотказности нового или тюнингового автомобиля.

### **1.8.3.8. Способ определения нормативных значений показателей безотказности составных частей изделия с учетом использования априорной информации об изменении их выходных параметров**

Данный способ применяют при заданной функции стоимости проектируемой  $i$ -ой составной части от вероятности ее безотказной работы и известной скорости монотонного изменения выходного параметра аналога  $i$ -ой составной части.

Предполагается следующая постановка задачи:

1. Задан показатель надежности (вероятности безотказной работы) изделия -  $P_c$ .

2. Требуется определить вероятность безотказной работы -  $P_{\varepsilon_i}$ -ой составной части таким образом, чтобы удовлетворялось условие

$$\min \sum_{i=1}^n C_i(P_{\varepsilon_i}), \quad i = \overline{1, n}$$

при условии, что  $\prod_{i=1}^n P_{\partial_i} \geq P_c$ , где  $c_i(P_{\partial_i})$  - стоимость  $i$ -ой составной части изделия.

Исходя из этого условия, в случае, если все составные части изделия равнонадежны, распределение вероятности безотказной работы по составным частям проводить по формуле

$$P_{\partial_i} = P_c^{1/n}, \quad i = \overline{1, n}$$

В случае неравнонадежности составных частей используют следующий подход:

1. Вводят в рассмотрение коэффициенты

$$K_i = a_i / \sum_{i=1}^n a_i, \quad i = \overline{1, n}$$

каждый из которых характеризует независимый параметр, определяющий работоспособность соответствующей составной части; величина

$$a_i = \left( \sum_{i=1}^n \overline{t}_i \right) / \overline{t}_i$$

где  $\overline{t}_i$  - средний ресурс  $i$ -ой составной части,

$$\overline{t}_i = \frac{L_i}{V_i}$$

В этой формуле  $L_i$  предельное значение выходного параметра, а  $\overline{V}_i$  средняя скорость его изменения в процессе эксплуатации  $i$ -ой составной части. При таком способе расчета коэффициенты  $K_i (i = \overline{1, n})$  удовлетворяют условиям  $0 < K_i < 1$ ,  $\sum_{i=1}^n K_i = 1$ , причем значение  $K_i$  тем больше, чем меньше значение величины  $t_i$ .

2. Используя коэффициенты  $K_i$ , зависимость вероятности безотказной работы  $P_{\partial_i}$  от требуемой вероятности безотказной работы изделия  $P_c$  в случае последовательного соединения составных частей имеет вид

$$P_{\partial_i} = P_c^{K_i}, \quad i = \overline{1, n}$$

3. Данное выражение позволяет рассчитывать нормативные значения показателей безотказности составных частей изделий с учетом прогнозируемых значений выходных параметров технического состояния в процессе эксплуатации.

Данный способ применяется при заданной функции стоимости проектируемой  $i$ -ой составной части от вероятности ее безотказной работы и известной скорости монотонного изменения выходного параметра аналога  $i$ -ой составной части.

При проектировании нового или тюнингового автомобиля такие функции для большинства составных частей еще не известны и их трудно получить.

### **1.8.3.9. Распределение безотказности с учетом коэффициента весомости**

Поток отказов системы приближенно считается равным сумме потоков отказов агрегатов, если рассматривать поток отказов агрегатов данной системы как стационарный пуассоновский поток с параметром  $\lambda_c$ , равным среднему значению параметра потоков отказов  $\omega(t)$  (интенсивность потоков отказов восстанавливаемых элементов).

При допущении о независимости отказов агрегатов поток отказов системы приближенно считается равным сумме потока отказов агрегатов этой системы

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

где  $\lambda_i$  - интенсивность отказов  $i$ -го агрегата

$n$  - число агрегатов в системе.

Данное выражение может быть преобразовано следующим образом:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n d_{b_i} \cdot \lambda_c$$

Здесь коэффициент  $d_{b_i}$  - коэффициент весомости. Зависящий от сложности агрегата, его стоимости и других факторов. Этот коэффициент может быть найден расчетным, экспертным путем или по аналогии с известным опытом. В некоторых случаях коэффициент  $d_{b_i}$  определяют как отношение числа элементов в агрегате к числу элементов в системе (машине).

Приведенные положения по нормированию показателей правомочны при отсутствии каких-либо ограничений, например, по стоимости элементов машин. В то же время необходимо иметь в виду, что повышение надежности элементов машин в основном осуществляется путем совершенствования материалов, улучшения технологии изготовления, снижения динамических нагрузок и колебаний, а также других эффективных мероприятий. Выполнение таких мероприятий обычно вызывает повышение стоимости элементов машин. Однако стоимость машин в целом, как правило, ограничена. Использование методов распределения безотказности с учетом ограничений стоимости [8, 9] затрудняется вследствие отсутствия априорных зависимостей стоимости изготовления узла в связи с изменением его безотказности.

При отмеченных допущениях имеет место зависимость

$$T_c \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{\varepsilon_i}}}$$

где  $T_c$  и  $T_{\varepsilon_i}$  - соответственно средняя наработка на отказ системы и агрегата.

Для вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента системы, формула примет вид

$$P_{\varepsilon_i} = \exp(-\lambda_c d_{b_i} L)$$

где  $L$  - установленная наработка.

Поскольку  $\sum_{i=1}^n d_{b_i} = 1$  то следует, что  $\lambda_i = d_{b_i} \sum_{i=1}^n \lambda_i$  или  $\lambda_i = d_{b_i} \cdot \lambda_c$ .

Таким образом, метод весовых коэффициентов, задаваемых априори, позволяет решить задачу нормирования безотказности элементов системы на установленной наработке  $L$  при условии, что поток отказов является простейшим с суммарной интенсивностью  $\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ .

При этом полагается, что все составляющие  $\lambda_i = \lambda_c \cdot d_{b_i}$  малы по сравнению с  $\lambda_c$ , т.е. в системе нет элементов, потоки отказов которых были бы сравнимы по интенсивности с потоком отказов всей системы.

В общем случае потоки отказов механических систем являются нестационарным, сложным образом меняющимися во времени. Это делает задачу нормирования безотказности трудно разрешимой аналитически.

Следует отметить, что зависимость является точными на любом участке времени и при любом числе элементов лишь при экспоненциальном законе распределения наработки на отказ каждого элемента системы. Для других законов эта зависимость является приближенной.

В связи с указанными допущениями применение данного метода для нормирования безотказности нового или тюнингового автомобиля имеет ограниченный характер. Приближенное распределение норм безотказности может привести к неоправданным экономическим затратам.

Применение при расчетах весовых коэффициентов, учитывающих важность или относительную значимость элементов в системе, целесообразно.

Оценки  $d_{b_i}$  можно найти по формуле

$$d_{b_i} = S_i / \sum_{i=1}^n S_i, \quad i = \overline{1, n}$$

где  $S_i$  - априорный оценочный показатель для  $i$ -го элемента, найденный в результате испытаний или назначенный по принципу аналогии с подобными или уже известными системами,  $\sum_{i=1}^n d_{b_i} = 1$ .

В разрабатываемой методике, также как и в рассмотренной, при расчетах целесообразно применить весовые коэффициенты элементов системы.

### **1.8.3.10. Подход к определению требований по безотказности комплектующих изделий исходя из достигнутого уровня их надежности и трудоемкости устранения отказов**

Для ремонтируемых изделий, каковыми являются сельхозмашины, помимо достигнутого уровня надежности, важно учитывать вклад каждого элемента в общее время устранения отказов, поскольку отказ одного из них может потребовать минуты на устранение, отказ же другого повлечет за собой часы простоя и соответственно несоизмеримо большие потери. Поэтому и требования к безотказности второго элемента должны быть выше, чем первого. В этом случае коэффициент весомости  $g_i$  с учетом значимости каждой составной части в общем времени простоев машины при устранении отказов  $t_i / \sum_{i=1}^n t_i$  и значимости в достигнутом уровне надежности  $\omega_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$ , показывающую относительную уязвимость  $i$ -го элемента определяется выражением

$$g_i = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\lambda_i}$$

где  $t_i$  - время устранения отказов  $i$ -го элемента

$n$  - число элементов в системе;

$\lambda_i$  - интенсивности отказов подсистем, определенные по результатам наблюдений или на основе оценок по данным за прошлое время.

Данный подход представляется правомерным, однако для его реализации, кроме данных, изложенных в методике распределения требований по безотказности с учетом относительной уязвимости элементов, требуется информация о соотношении затрат времени на устранение отказов составных частей машин.

При проектировании новых или существенной модернизации машин использование, как основополагающих, статистических данных полученных по результатам наблюдений за существующими конструкциями представляется неэффективным. Поэтому в чистом виде данный метод применить к поставленным целям затруднительно.

### **1.8.3.11. Распределение требований безотказности с использованием принципа равенства возможных потерь в эксплуатации по каждой составной части с учетом сложности и доли его работы (машиной)**

Внедрение данного метода позволило улучшить организацию работ по обеспечению безотказности зерноуборочных комбайнов. Большинство элементов этой методики использовано при разработке комбайнов семейства «Дон». Для достижения заданного уровня безотказности комбайнов требуется различная степень повышения безотказности из основных подсистем и агрегатов. При распределении между ними требований безотказности использован принцип равенства возможных потерь в эксплуатации по каждому агрегату (подсистеме) с учетом сложности и доли его работы с комбайном в уборочный период:

$$r_i = K_i \cdot \alpha_i \cdot d_i \cdot S / (C \cdot a_i \cdot t_{i_e} + C_{i_c})$$

где  $r_i$  - нормативное количество возможных отказов агрегатов за нормативный срок службы комбайна;

$K_i = C_a / C_m$  - коэффициент сложности агрегата ( $C_a, C_m$  – цена агрегата и комбайна, руб.)

$\alpha_i$  - доля работы агрегата с комбайном;

$C$  - стоимость 1 часа простоя комбайна, руб.;

$t_{i_b}$  - среднее время восстановления агрегата, ч.;

$C_{i_c}$  - средняя стоимость сборочной единицы (детали) агрегата, заменяемой в сезон эксплуатации, руб.;

$S$  - уровень возможных потерь, при котором соблюдается предложенный принцип, руб., определяется отношением

$$S = r_M \left/ \sum_{i=1}^n \frac{K_i \cdot \alpha_i \cdot a_i}{C \cdot a_i \cdot T_{i_b} + C_{i_c}} \right.$$

(здесь  $r_M = H/h$  - нормативное число возможных отказов комбайна за нормативный срок службы;  $H$  – его нормативная наработка, ч.;  $h$  - нормативная наработка на отказ, ч.;  $n$  – общее число агрегатов комбайна).

Определив нормативное количество возможных отказов агрегата за нормативный срок службы комбайна, можно определить нормативное количество отказов за агросезон и нормативные значения показателей безотказности агрегатов за это же время.

В данной методике значения  $t_{i_b}$ ,  $C_{i_c}$  и  $a_i$  приняты по результатам инженерного анализа конструкции агрегатов с учетом результатов испытаний комбайнов семейства «Дон» и наблюдений за работой машин – аналогов.

Для тюнингового и нового автомобиля расчет безотказности проводится на этапе проектирования, и эксплуатационные данные аналога отсутствуют.

### 1.8.3.12. Метод распределения требований к средним наработкам на отказ составных частей изделия при отсутствии априорной информации

Постановка задачи: проектируемое изделие с требуемой наработкой  $T_{c_{тп}}$  состоит из независимых составных частей, отказ каждой из которых приводит к отказу изделия в целом.

Требуется определить средние наработки на отказ  $T_{i_{тп}}$  составных частей (стандартные и унифицированные составные части в расчет не принимаются), обеспечивающие заданную (требуемую) среднюю наработку на отказ  $T_{c_{тп}}$  изделия в целом, если экспертным путем можно установить коэффициенты соотношения средних наработок на отказ между составными частями изделия.

Решение: пусть экспертным путем установлены коэффициенты соотношения средних наработок на отказ:

$$K_1 = \frac{T_{1_{тп}}}{T_{1_{тп}}}; K_2 = \frac{T_{2_{тп}}}{T_{1_{тп}}}, \dots, K_i = \frac{T_{i_{тп}}}{T_{1_{тп}}}, \quad i = \overline{1, n}$$

Обозначим через  $T_{1_{тп}}$  составную часть, которая, по мнению экспертов, должна иметь наибольшую среднюю наработку на отказ, т.е.

$$T_{1_{тп}} = \max( T_{i_{тп}} )$$

известно, что в случае постоянной и возрастающей функции интенсивности отказов (ВФИ – распределение наработок до отказа) при последовательном соединении элементов можно оценить нижнюю и верхнюю границы средней наработки на отказ изделия в целом, если известны значения средней наработки на отказ каждого элемента.

Рассматривается два варианта решения:

1. Распределение требований по нижней границе.

В этом случае средняя наработка на отказ изделия определяется в зависимости от средних наработок на отказ составных частей по формуле

$$T_{c_{TP}} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{i_{TP}}}$$

применяя коэффициенты соотношения получим

$$T_{i_{TP}} = K_i \cdot T_{1_{TP}}$$

используя данные соотношения получим

$$\frac{1}{T_{1_{TP}}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} = \frac{1}{T_{c_{TP}}}$$

Из этого уравнения определяется

$$T_{1_{TP}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} = \frac{1}{T_{c_{TP}}}$$

Тогда искомая средняя наработка на отказ  $i$ -ой составной части равна

$$T_{i_{TP}} = K_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} \cdot T_{c_{TP}}$$

### 1. Распределение требований по верхней границе.

Верхняя граница средней наработки на отказ в случае ВФИ – распределения определяется по формуле

$$T_{i_{TP}} = \min T_{i_{TP}} = T_{n_{TP}}$$

где средние наработки на отказ  $T_{1_{TP}}, T_{2_{TP}}, \dots, T_{i_{TP}}, \dots, T_{n_{TP}}$  располагаются в вариационный ряд в убывающей последовательности.

По аналогии с первым вариантом вводятся коэффициенты  $\omega_i = T_{i_{TP}} / T_{n_{TP}}$ ,

где  $\omega_i \geq 1$ , которые также могут быть определены экспертным путем.

Используя вышеизложенные формулы получим

$$\omega_i = T_{i_{TP}} / T_{c_{TP}} \quad \text{или} \quad T_{i_{TP}} = \omega_i \cdot T_{c_{TP}}$$

Процедура распределения требований к средним наработкам на отказ составных частей производится по уровням иерархии.

Это метод может быть применен при распределении требований к безотказности между элементами составных частей, которые имеют аналоги в других передовых отраслях техники (например, для деталей редукторов, агрегатов гидро – пневмосистемы и др.)

### **1.8.3.13. Требования к безотказности составных частей, с учетом данных эксплуатационных испытаний машин или их аналогов**

В общем случае показатель  $\lambda$  потока отказов машины в функции его наработки – величина переменная, связанная с тремя характерными стадиями: приработки ( $\lambda \neq const$ ), нормальной ( $\lambda = const$ ) работе и старения ( $\lambda \neq const$ ).

Для расчета вероятности  $P_c$  безотказной работы или составной части от начала эксплуатации до момента  $T_p$  ее списания применяется формула

$$P_c(T_p) = \exp(-K)$$

где  $K$  – число отказов за ресурс  $T_p$  машины.

Связь машины и ее составных частей как последовательных систем (в случае независимости отказов) может быть выражена произведением вероятностей безотказной работы сборочных единиц и аналогично для последних – произведением вероятностей безотказной работы деталей.

Суммарные затраты на устранение  $K$  отказов с учетом ущерба от простоев машины за ресурс выражается следующей зависимостью:

$$Z(T_p) = \bar{z}K$$

где  $\bar{z}$  – средние затраты на устранение одного отказа машины, а также ущерб от ее простоя.

Вероятность безотказной работы  $i$ -ой сборочной единицы ( $j$ -ой детали) рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{i(j)}(T_p) = \exp \left( - \frac{K_{(i)}}{\bar{3}_{i(j)} \sum_{i(j)=1}^{n(m)} \frac{1}{3_{i(j)}}} \right)$$

где  $n$  - число сборочных единиц;

$m$  - число деталей в сборочной единице.

Анализ этой формулы показывает, что если  $n$  невелико и составляет всего несколько десятков (в зависимости от критерия деления машины на составные части), то значение  $m$  достигает сотни единиц. Это обуславливает большой объем исходной информации. Исходные данные доля машины определяются производством нескольких тысяч деталей на 15...20 параметров, т.е. составят несколько десятков тысяч единиц. Для выборки из 20...50 зерноуборочных комбайнов объем данных возрастает до нескольких миллионов единиц. Собрать столько данных – задача очень трудоемкая.

В связи с этим в данной методике предлагается выделять такую группу, данных, которая была бы и представительной, и доступной.

Сборочную единицу, включающую в себя только отказывающиеся детали, назвали условной. Введено понятие коэффициента увеличения числа деталей  $M = \frac{n_n}{n_y}$ , где  $n_n$  и  $n_y$  - число нагруженных в проектируемой (реальной) и условной сборочной единице. Вероятность безотказной работы детали в проектируемой сборочной единице  $P_n = (P_{y_j})^{1/M}$ , где  $P_{y_j}$  - вероятность безотказной работы детали в условной сборочной единице.

Применить в полной мере данную методику для обоснования расчета и безотказности составных частей нового или тюнингового автомобиля не представляется возможным, так как она основана на допущении об экспоненциальном законе распределения наработок на отказ системы.

### 1.8.3.14. Применение теории полезности при распределении требований к безотказности составных элементов системы на основе учета их сложности

Учет такого признака, как сложность элементов, может привести к объективному распределению требований к надежности, а учитывая, что чем сложнее элемент, тем труднее обеспечить величину  $P_{э_i}$  (вероятность безотказной работы элемента) и, следовательно, тем выше будет его стоимость, - к снижению общей стоимости изделия.

В этом случае требуемая вероятность безотказной работы элементов рассчитывается по формуле

$$P_{э_{итр}} = P_{э_{сп}}^{K_i} \quad (1.11)$$

где  $K_i$  - коэффициент, характеризующий количественную меру сложности  $i$ -го элемента (коэффициент сложности);

$i$  - заданная вероятность безотказной работы системы.

Анализ работ по исследованию методов решения задачи распределения требований к надежности на основе учета сложности элементов системы показывает, что определение величины  $K_i$  возможно при наличии таких исходных данных, как число категорий элементов по надежности, количество элементов каждой категории надежности элементов от условий эксплуатации др. Получение такой информации даже для образцов – аналогов весьма затруднительно, при наличии же в системе принципиально новых элементов и вовсе невозможно.

В этой ситуации для определения количественной меры сложности элементов на ранних этапах проектирования весьма продуктивным может оказаться применение теории полезности [10, 11].

Полезность – субъективная оценка объекта (элемента), мера, с помощью которой определяется качество объекта. Она заменяет собой все конечное множество признаков, характеризующих объект. Каждому объекту

оценки  $\varphi_i$  соответствует действительное неотрицательное число  $U(\varphi_i)$ , которое рассматривается как показатель полезности. Если объект  $\varphi_i$  более важен, чем  $\varphi_j$ , то  $U(\varphi_i) > U(\varphi_j)$ .

В случае, когда имеются достаточные основания для определения степени предпочтения элементов по сложности, коэффициент сложности определяется по следующей формуле:

$$K_i = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)}, \quad 0 < K_i < 1 \quad (1.12)$$

Составной части большей сложности в общем случае должен соответствовать меньший норматив безотказности, так как затраты на обеспечение безотказности такой составной части выше.

Данный метод имеет значительные преимущества, которые заключаются в том, что его можно применять даже при отсутствии многих видов априорной информации. В реальных объектах машиностроения можно всегда произвести сопоставление элементов системы по их сложности. Однако при несомненных достоинствах этот метод имеет, на наш взгляд, тот недостаток, что, как следует из формулы (1.11), требуемая вероятность безотказной работы  $P_{\varnothing_{iTP}}$  зависит только от коэффициента сложности  $K_i$ . В свою очередь, как видно из формулы (1.12), коэффициент сложности  $i$ -го элемента зависит от его места в ранжированном ряду. Так как ранжирование элементов соответствует натуральному ряду чисел (1, 2, 3 ...), то очевидно, что коэффициенты  $K_i$  и соответствующие им  $P_{\varnothing_{iTP}}$  будут отличаться друг от друга с равномерным шагом. В этом случае нормативы  $P_{\varnothing_{iTP}}$  оказываются в известной степени оторванными от факторов, которые реально должны влиять на их значение. Поэтому при использовании данного метода необходимо разработать дополнительный математический аппарат, который позволил бы более точно распределять требования по безотказности между основными элементами тюнингового автомобиля.

Как показал анализ существующих основных методов определения нормативов безотказности составных частей машин с учетом принятых в них требований, допущений и ограничений применить их в полной мере при обосновании и расчете безотказности тюнингового автомобиля не всегда представляется возможным.

В то же время ряд рекомендаций и некоторые принципы вышеизложенных работ могут быть фрагментально использованы при разработке методики распределения требований к безотказности между составными частями нового или модернизируемого - тюнингового автомобиля.

Методика, основанная на применении теории полезности при распределении требований к безотказности изделия между его составными частями на основе учета их сложности может быть принята как базовая.

## **1.9. Разработка методов распределения требований по безотказности между составными частями модернизируемого или проектируемого автомобиля**

### **1.9.1. Методика распределения требований по безотказности с использованием коэффициентов предпочтений.**

В основу настоящей методики положено требование о том, что значения показателей безотказности составных частей должны различаться между собой в зависимости от ряда объективных факторов, оцениваемых коэффициентами их «веса». В этой связи следует указать, что формула (1.11) также учитывает объективный фактор – сложность изделия. Однако проводить распределение требований к безотказности составных частей только на основе этого фактора – значит существенно упростить модель надежности системы, и следовательно, получать заведомо не адекватный

реальности результат, так как влияющих факторов несколько и есть среди них сопоставимые сложности по значимости.

Нами рассчитаны на ЭВМ кривые по формуле (1.11) для  $n$  от 2 до 14 и построены соответствующие графики (рис.1.34), на которых приведены значения  $P_{э_i}$  для элементов в зависимости от  $P_{с_{тп}}$  системы при соответствующих значениях  $n=2, 5, 9, 14$ .

При использовании таких графиков значения вероятностей безотказной работы для конкретных составных частей зависят от трех переменных: вероятности безотказной работы системы  $P_{с_{тп}}$ , числа составных частей  $n$  и места (номера)  $i$ -ой составной части в ряду предпочтений, т.е.

$$P_{э_i} = f(P_{с_{тп}}, n, i), \quad i = \overline{1, n} \quad (1.13)$$

Так, для  $n=9$ , при вероятности безотказной работы системы  $P_{с_{тп}} = 0,8$  и 5-ом месте элемента в ряду предпочтений (от меньшей безотказности к большей) по рис. 1.34 определяем  $P_5 = 0,95$ .

Как следует из рис.1.34, значения вероятностей безотказной работы элементов  $P_{э_i}$  распределены в интервалах от  $P_1$  до  $P_n$  с довольно равномерно увеличивающимся шагом (по любой ординате графиков).

В реальных условиях для машин наиболее общей ситуацией является неравномерность изменения безотказности от элемента к элементу в ряду предпочтений. Часто встречаются отдельные элементы, отличающиеся высокой или низкой безотказностью по сравнению с остальными.

Например, в автомобиле элементы топливной аппаратуры или резинотехнические детали отказывают намного чаще, чем элементы кузова, и, следовательно, это обстоятельство, несомненно, надо учитывать при назначении соответствующих нормативов безотказности.

В связи с этим при разработке настоящей методики нами была поставлена цель усовершенствовать метод, основанный на применении теории полезности при распределении требований к безотказности системы

между его элементами на основе учета их сложности и представленный формулой (1.11) с тем, чтобы получить возможность назначать нормативы безотказности для составных частей машин дифференцированно, с учетом объективных факторов, влияющих на возможность и экономическую целесообразность их достижения.

В этом случае, значение вероятности безотказной работы  $i$ -ой составной части системы в предлагаемой методике будет функцией 4-х переменных, т.е.

$$P_{э_{ip}} = f(P_{с_{ip}}, n, i, A_i), \quad i = \overline{1, n} \quad (1.14)$$

где  $A_i$  - коэффициент предпочтения, количественно выражающий требования к определенной пропорции соотношений  $P_{э_i}$  между собой.

Объективные факторы, влияющие на соотношение коэффициентов предпочтений  $A_i$  могут быть определены и «взвешены» путем экспертного опроса с привлечением компетентных специалистов, занимающихся вопросами конструирования и надежности машин.

При этом для каждого элемента в зависимости от преобладания того или иного фактора определяется количественное значение (в баллах) коэффициента предпочтения  $A_i$ .

Следует отметить, что при использовании предложенного метода играет роль не абсолютное значение коэффициента предпочтения  $A_i$ , а их соотношение, поэтому баллы могут назначаться в десятибалльной, стобалльной или другой шкале.

Блок – схема разработанной методики, представлена на рис. 1.35.

Методика расчета требуемого уровня безотказности элементов конструкции новых или модернизируемых машин, в том числе тюнинг-автомобилей представлена в таблице П.6.

Данная методика не имеет ограниченного применения, т.е. она позволяет рассчитывать нормативы безотказности основных составных

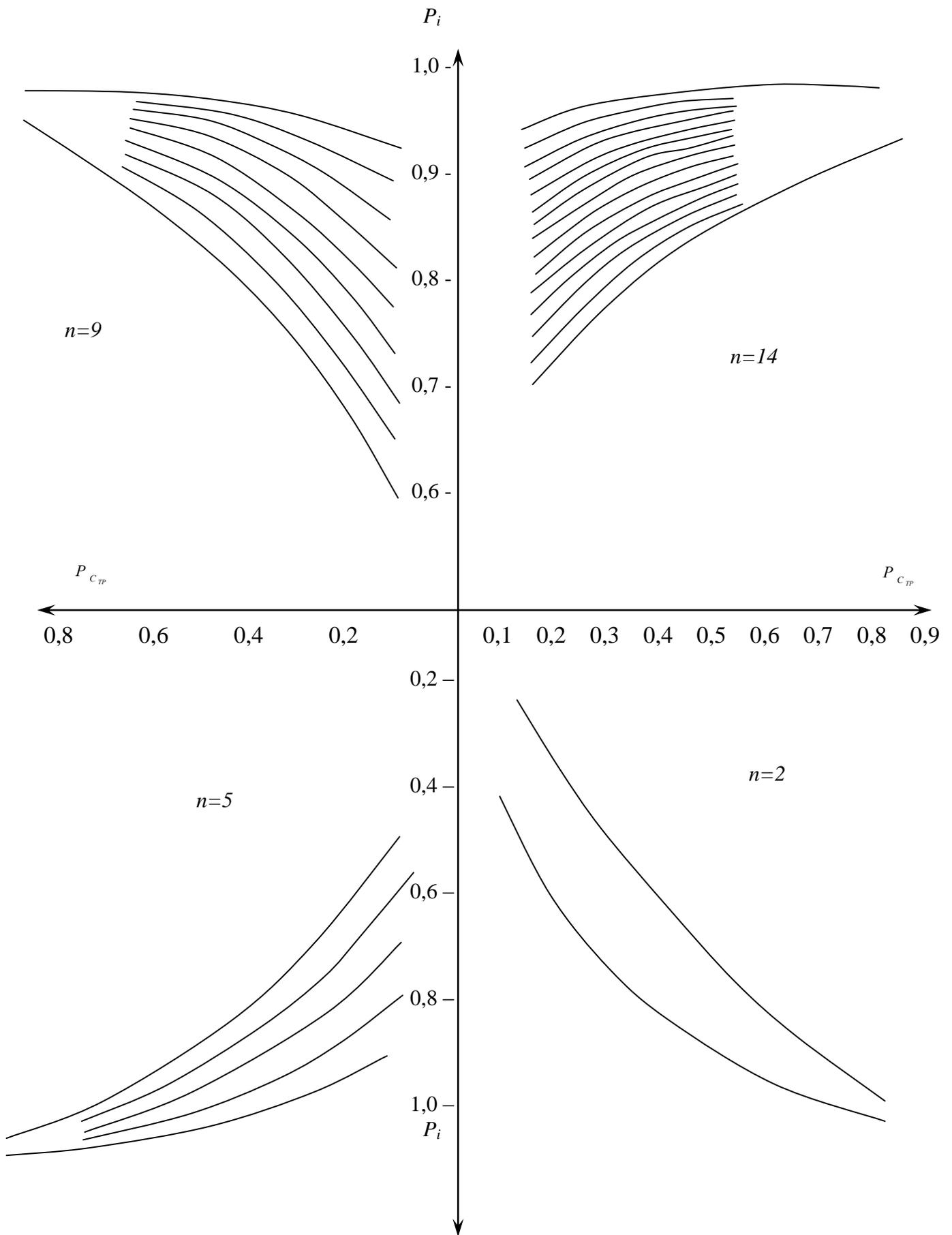


Рис.1.34

элементов широкого круга машин, как на этапе проектирования, так и на этапе их доработки.

Пример расчета безотказности основных элементов конструкции проектируемого или модернизируемого автомобиля по методике, представленной в таблице П.6, показаны в разделе 2.4 части 2.

## **1.10. Организация и статистическая обработка результатов экспертиз.**

### **1.10.1. Экспертная оценка при проектировании сложных технических систем**

Существует множество практических задач, в которых возникает необходимость оценки, сравнения и выбора сложных технических систем (далее систем). Наиболее часто такие задачи встречаются в теории принятия решений, исследовании операций, кибернетике, теории оптимального выбора, квалиметрии, теории экспертных оценок .

Так, например, при создании новой техники, проектировании сложных технических систем, устройств, приборов, комплексов, разработке технологии их построения и эксплуатации методы количественной оценки качества становятся крайне важным средством построения решающего правила, определяющего общую оценку системы по совокупности показателей, т.к. последствия результатов выбора могут быть очень серьезными.

При создании новой системы одним из основных этапов является формулирование требований к системе и обоснование технического задания на проектирование. Качество системы во многом будет определяться обоснованностью технического задания. В то же время, именно на этом этапе, лицо, принимающее решение (ЛПР), работает в условиях наибольшей

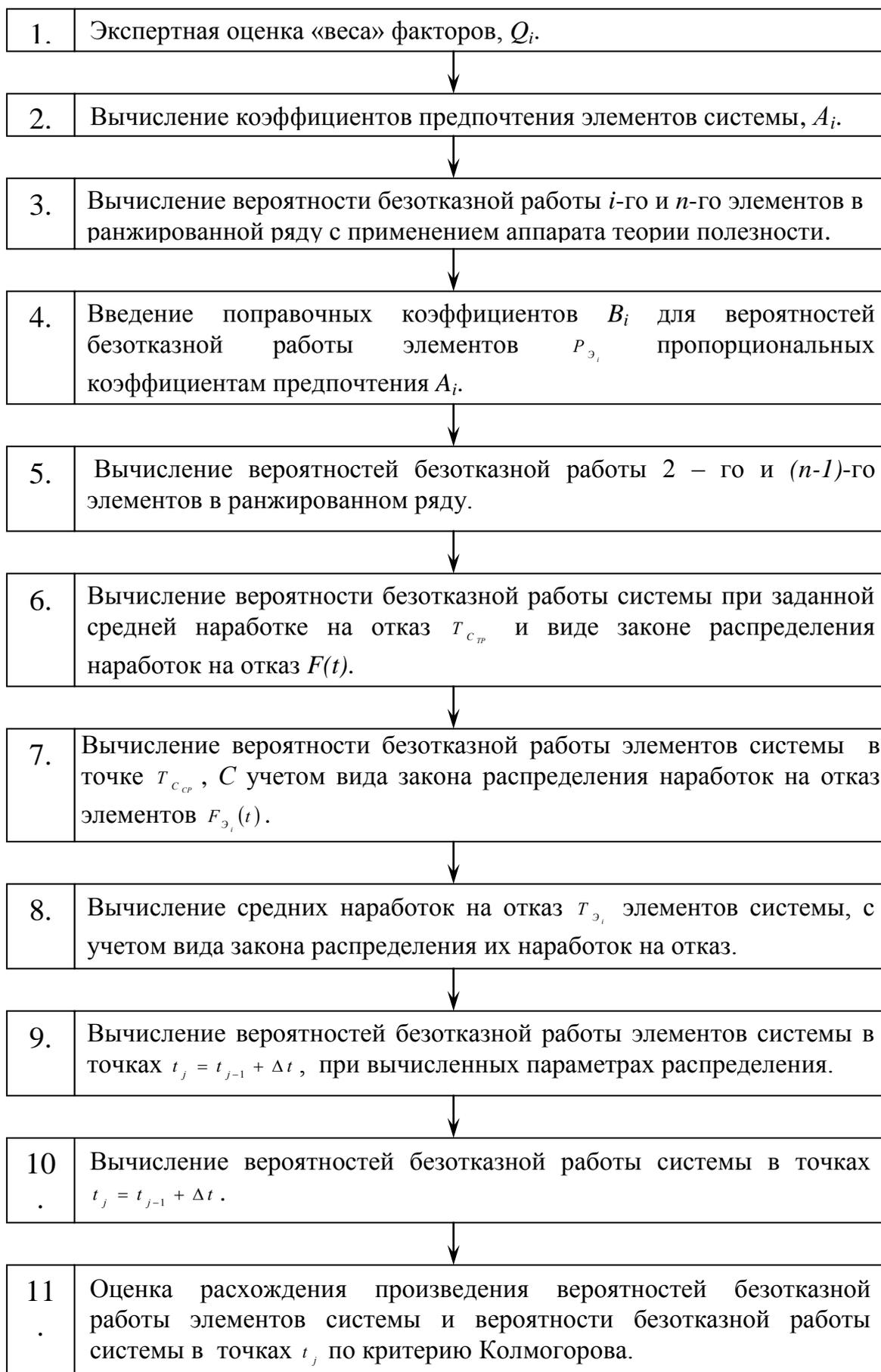


Рис. 1.35. Блок – схема методики

неопределенности и, следовательно, принимаемое решение имеет наивысшую степень риска быть недостаточно обоснованным.

Кроме того, само решение о выборе не является тривиальным, т.к. по своей сути задача выбора многокритериальна: как минимум, она должна учитывать эффективность и стоимость системы.

При решении задачи выбора систем в большинстве случаев используются две группы методов, основанные на решении однокритериальной и многокритериальной задач.

Однако число конкретных математических методов (функциональных зависимостей), которые могут быть использованы в практических расчетах, достаточно велико.

Наиболее известные методы целесообразно разделить, как показано на рис. 1.36.

Данная классификация несколько условна, но она весьма продуктивна по двум причинам:

- 1) определяется область выбора наиболее подходящего для каждой конкретной задачи метода среди известных на настоящее время;
- 2) формируются предпосылки для разработки новых методов (например, путем модификации, совмещения, комплексирования и т.п.).

Как видно из приведенной классификации и проведенного анализа литературы, области применения методов расчета комплексной оценки, основанные на свертках метрических характеристик, методов введения метрик в пространстве нормированных метрических характеристик и методов экспертных оценок пересекаются, т.е. несколько методов могут быть применены к одной и той же задаче, что обуславливает неопределенность в выборе метода решения.

Наиболее целесообразным для решения данной задачи является «экспертный» подход, который заключается в следующем:

- проводится оценка качества систем всеми допустимыми методами из рассмотренных, и по ее результатам формируется матрица «вторичных показателей» - «системы на методы»;

- считая результаты решений задачи оценки всеми методами (матрицу «вторичных показателей») мнениями высококвалифицированных виртуальных экспертов («v-экспертов»), для ее обработки применяются методы экспертных оценок.

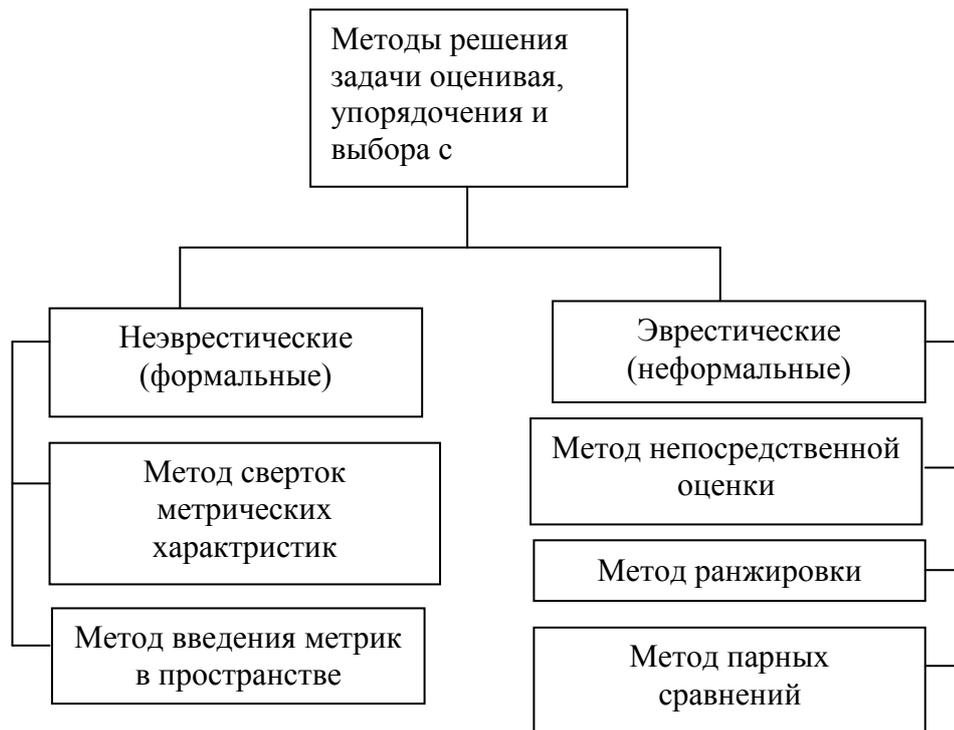


Рис. 1.36. Классификация методов решения задачи оценивания, упорядочения и выбора систем

Эта задача легко могла быть решена, если бы был известен наиболее применимый метод экспертной оценки для каждого случая (каждой матрицы данных) или универсальный метод, применимый во всех случаях.

Рассмотрим достоинства и недостатки основных экспертных методов.

Метод непосредственной оценки применяется в случаях, когда объекты экспертизы, определяющие конечные результаты, поддаются непосредственному сравнению, так как имеют одинаковую природу, т.е. у них есть общий эталон сравнения. Метод непосредственной оценки позволяет учесть степень превосходства какого-либо одного показателя по

отношению к другим, но при определении обобщенного показателя эффективности, ошибочная оценка экспертом менее значительного показателя, при правильном определении ею взаимного расположения по отношению к другим показателям может привести к значительному искажению конечного результата.

Метод ранжирования и его разновидности могут применяться в следующих случаях:

- когда необходимо упорядочить какие-либо объекты или явления во времени или пространстве. Эта ситуация возникает, когда необходимо определить не степень выраженности какого-либо их качества, а лишь взаимное пространственное или временное расположение этих объектов;
- при необходимости упорядочить объекты в соответствии с каким-либо качеством, но при этом не требуется производить его точное измерение;
- если какое-либо качество измеримо, но в настоящий момент не может быть измерено по причинам практического или теоретического характера.

При использовании метода ранжирования на получение конечного результата влияет правильный выбор его разновидности для конкретной ситуации. Точность и надежность процедуры ранжирования в значительной степени зависят от количества объектов. Чем больше таких объектов, тем ниже их «различимость» с точки зрения эксперта, а, следовательно, тем менее надежно можно установить ранг объекта, что является существенным недостатком метода.

К основным недостаткам метода ранжирования можно также отнести потерю информации об оцениваемых объектах вследствие упорядочения их лишь по взаимному расположению без учета степени выраженности какого-либо их качества. Поэтому метод ранжирования редко используется в «чистом виде». Чаще всего он сочетается с другими методами, обеспечивающими более четкое различие между объектами. Одним из них

является метод непосредственной оценки и некоторые его разновидности (ранжирование по сравнимой шкале).

Метод парных сравнений применяется в случаях выявления предпочтений для большого числа объектов и в случаях, когда различия между объектами настолько малы, что непосредственная оценка или ранжирование не обеспечивают их разумного упорядочения.

Метод парного сравнения без дополнительной обработки и ряда ограничений не дает полного упорядочения объектов, что является его существенным недостатком.

Рассмотренные выше три метода решения (непосредственной оценки, ранжирования и парного сравнения) обладают различными качествами, но приводят к близким результатам. Поэтому выбор метода «вторичной» обработки (ранжирование или парные сравнения) предлагается производить по числу оцениваемых объектов и малому различию между ними. Так как понятие «малое различие» не является четкой физической величиной, а её определение требует дополнительных исследований, то за критерий выбора предлагается брать «число оцениваемых объектов» ( $k$ ). Если количество ранжируемых объектов  $n < k$  - метод ранжирования, а при  $n > k$  - метод парных сравнений. Следуя рекомендациям,  $k$  не должно быть больше 20, а наиболее надежна эта процедура, когда  $k < 10$ .

Следовательно, повысить устойчивость результата возможно за счет получения комплексной оценки по результатам решения задачи выбора всеми допустимыми методами из представленных, если бы был известен способ обработки таких результатов.

В качестве такого способа и предлагается использовать Метод Комплексной Экспертной Оценки (МКЭО), обеспечивающий эффективное решение за счет получения устойчивого результата по совокупности методов.

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем.

Описание сравниваемых систем, каждая из которых представлена вектором характеристик, задается исходной матрицей  $A$  ( $m \times n$ ), где  $m$  - число сравниваемых вариантов систем (строк матрицы  $A$ ),  $n$  - число характеристик (столбцов матрицы  $A$ ).

Каждый элемент матрицы  $A$  есть значение характеристики  $X_{ji}$ ,  $j = 1, m$ ,  $i = 1, n$ , то есть  $X_{ji}$  есть значение  $i$ -й характеристики  $j$ -го варианта системы.

Матрица  $A$  имеет следующий вид:

Таблица 1.20

Исходные данные в методе комплексной экспертной оценки систем

Варианты систем	Характеристики					
	$C_1$	$C_2$	---	$C_i$	---	$C_n$
$V_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	---	$X_{1i}$	---	$X_{1n}$
$V_2$	$X_{21}$	$X_{22}$	---	$X_{2i}$	---	$X_{2n}$
-	-	-	---	-	---	-
$V_j$	$X_{j1}$	$X_{j2}$	---	$X_{ji}$	---	$X_{jn}$
-	-	-	---	-	---	-
$V_m$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	---	$X_{mi}$	---	$X_{mn}$

Задается некоторое нормирующее отображение множества характеристики вариантов систем  $\{X\}$ :

$$\{ X_{ji} \} \rightarrow \{ K_i \} \quad (i = 1, n; j = 1, m),$$

где  $X_{ji}$  -  $i$ -я характеристика  $j$ -й системы;  $K_{ji}$  - оценка качества  $i$ -й системы по  $j$ -му свойству.

Результатом такого отображения  $F$  является матрица  $A'(m \times n)$ , где  $m$  - число сравниваемых вариантов систем (строк матрицы  $A$ ),  $n$  - число показателей качеств по различным свойствам системы (столбцов матрицы  $A$ ).

Каждый элемент матрицы  $A$  есть значение показателя качества системы по  $X_{ji}$ ,  $j=1, m, i=1, n$ , то есть  $K_{ji}$  - есть значение  $i$ -го показателя  $j$ -го варианта системы. Матрица

Таблица 1.21.

Показатели качества систем

Варианты систем	Показатели качества					
	$P_1$	$P_2$	---	$P_i$	---	$P_n$
$V_1$	$K_{11}$	$K_{12}$	---	$K_{1i}$	---	$K_{1n}$
$V_2$	$K_{21}$	$K_{22}$	---	$K_{2i}$	---	$K_{2n}$
-	-	-	---	-	---	-
$V_j$	$K_{j1}$	$K_{j2}$	---	$K_{ji}$	---	$K_{jn}$
-	-	-	---	-	---	-
$V_m$	$K_{m1}$	$K_{m2}$	---	$K_{mi}$	---	$K_{mn}$

Для  $m$  строк матрицы  $A'$  при решении задачи выбора каждым из допустимых методов определяется вектор вещественных неотрицательных чисел

$$(KO_{j1}, KO_{j2}, \dots, KO_{ji}, KO_{js})$$

которые составляют комплексную оценку соответствующих вариантов систем,  $j=1, m$ , где  $m$  - число вариантов систем. Получаем матрицу  $B$ :

Таблица 1.22

Комплексные оценки качества систем

Варианты систем	Комплексные оценки качества различными методами					
	$M_1$	$M_2$	---	$M_i$	---	$M_s$
$V_1$	$KO_{11}$	$KO_{12}$	---	$KO_{1i}$	---	$KO_{1n}$
$V_2$	$KO_{21}$	$KO_{22}$	---	$KO_{2i}$	---	$KO_{2n}$
-	-	-	---	-	---	-
$V_j$	$KO_{j1}$	$KO_{j2}$	---	$KO_{ji}$	---	$KO_{jn}$
-	-	-	---	-	---	-

$V_m$	$KO_{m1}$	$KO_{m2}$	---	$KO_{mi}$	---	$KO_{mn}$
-------	-----------	-----------	-----	-----------	-----	-----------

Далее, полагая, что оценки каждым из допустимых методов являются оценками «v-экспертов», производим «вторичную» обработку полученной информации либо методом ранжирования, либо методом парных сравнений, используя в качестве критерия выбора метода «количество объектов» (k):  $n < k$ - метод ранжирования;  $n > k$ - метод парных сравнений, где  $k=10$ , находим результирующую оценку

$$A_{МКЭО} = F_{МКЭО}(C_1(Q_{VЭ}), \dots, C_n(Q_{VЭ}))$$

Блок-схема метода комплексной экспертной оценки представлена на рис.

1.37.

Таким образом, сравнительная оценка результатов обработки «вторичной» информации методами непосредственной оценки, ранжирования, парных сравнений и комплексной экспертной оценки показала, что область решений (разброс крайних мнений) метода комплексной экспертной оценки меньше областей решений методов непосредственной оценки, ранжирования и парных сравнений.

Это подтверждает вывод о большей достоверности решения задачи группового предпочтения методом комплексной экспертной оценки по сравнению с другими методами.

Метод комплексной экспертной оценки рекомендуется применять в следующих случаях:

- когда ни один из методов (сверток, метрик и экспертных оценок) в «чистом» виде не подходит для решения данной задачи;
- если использование каждого из этих методов для решения задачи кажется целесообразным;
- при необходимости комплексного применения всех методов для решения одной и той же задачи.

Таким образом, метод комплексной экспертной оценки позволяет минимизировать риск принятия неверного решения при проектировании систем за счет комплексного использования различных методов количественной оценки качества альтернативных вариантов [22, 23, 24, 25].

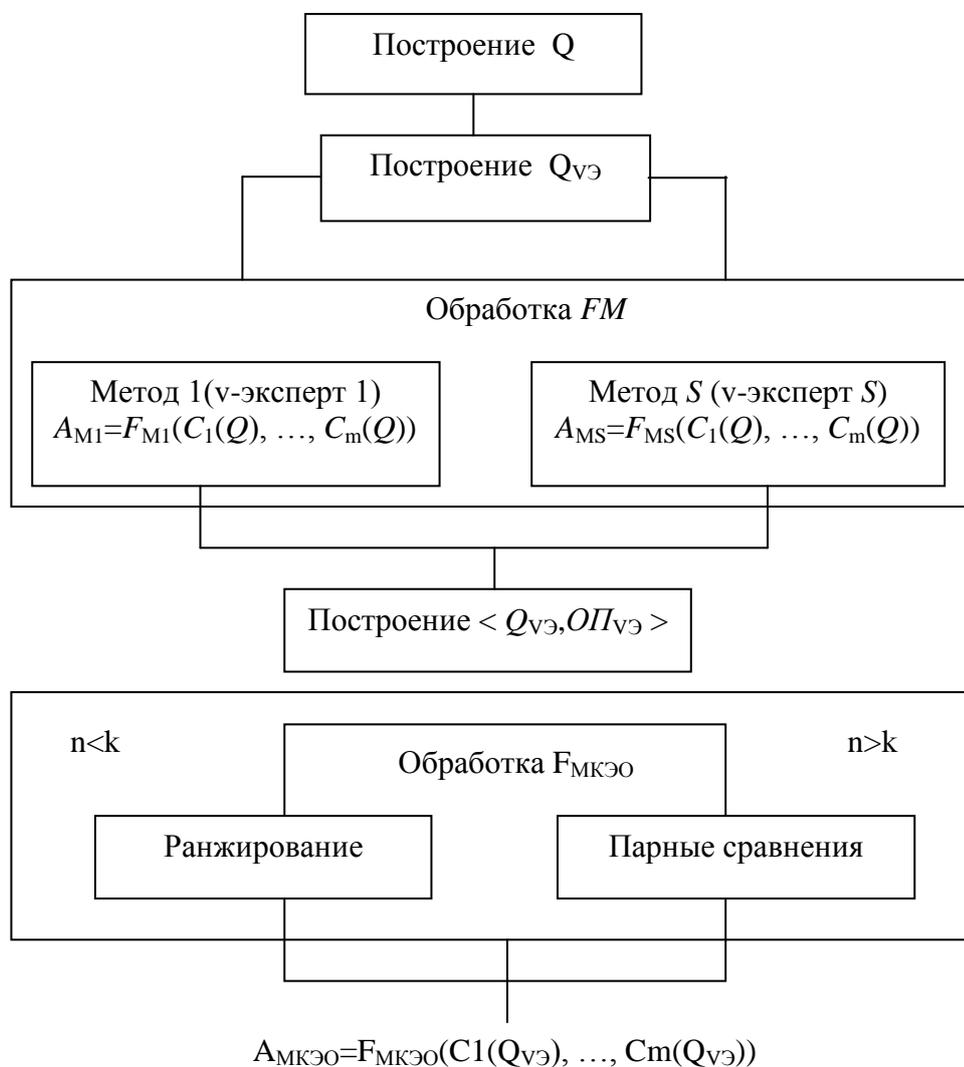


Рис. 1.37. Блок-схема метода комплексной экспертной оценки систем

### 1.10.2. Обоснование выбора методов сравнительного анализа системы поддержки принятия решения (СППР).

Исследуем методы принятия решений и оценим близость получаемых ранжировок (рис.1.38).

Прежде всего необходимо внести расстояния между ранжировками. Пусть  $P$  и  $Q$  – ранжировки на множестве  $A$  и  $a$  и  $b$  – элементы  $A$ . Положим  $y_{PQ}(a, b)$  равным 0, если порядок  $a$  и  $b$  совпадает в  $P$  и  $Q$ , равным 2, если в одной ранжировке  $a$  превосходит  $b$ , и в другой  $b$  превосходит  $a$ , и равным 1, если в одной ранжировке  $a$  превосходит  $b$ , либо  $b$  превосходит  $a$ , и в другой ранжировке  $a$  и  $b$  связаны (равнозначны).

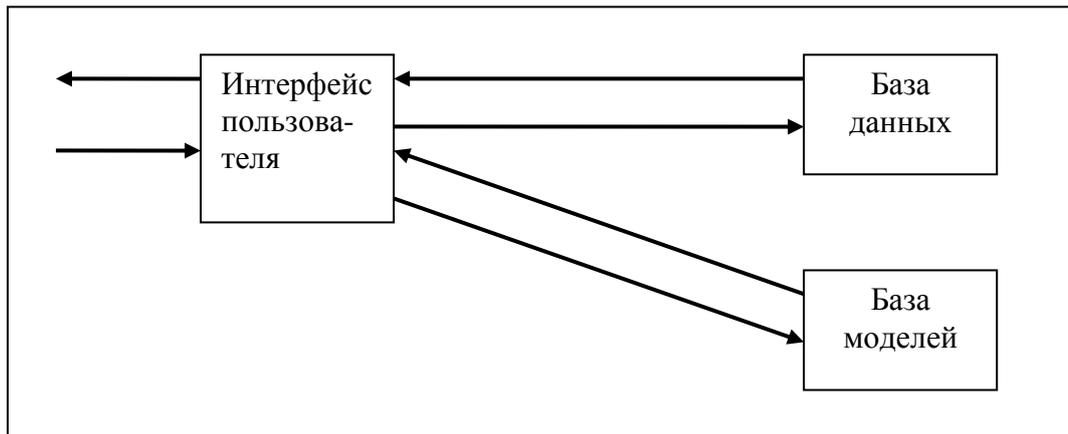


Рис. 1.38. Первоначальная схема СППР в рамках функционального подхода.

Тогда функция расстояния  $d(P, Q)$  равна сумме значений  $y_{PQ}(a, b)$  по всем неупорядоченным парам  $(a, b)$  из  $A$ .

Если имеется способ измерения расстояния между двумя ранжировками, то с его помощью можно определить групповую функцию согласования. Назовем медианой профиля ранжировок  $(P_1, P_2, \dots, P_l)$  такую ранжировку  $P$ , что

$$\sum_{i=1}^l d(P_i, P)$$

минимальна, а средней ранжировкой такую ранжировку  $P$ , что

$$\sum_{i=1}^l d(P_i, P)^2$$

минимальна.

Желательно выбирать в качестве согласованной групповой ранжировки медиану или среднее. Медиана и среднее являются в статистике мерами «центральности» или «основной тенденции».

Если данная процедура не приведет к выбору единственной ранжировки  $P$ , она сможет ограничить рассмотрение множеством разумных согласованных ранжировок. Разумный подход состоит в ослаблении требований к функции группового согласования. Если отказаться от выявления единственной согласованной ранжировки, то медиана и среднее определяют вполне приемлемые функции группового согласования. Но остается еще проблема выбора между медианой и средней. Одна из трудностей, связанных с применением этого метода вызывается отсутствием эффективной процедуры нахождения по данному профилю медианы и среднего.

Определим понятие корреляции между ранжировками. Коэффициент корреляции – это функция, относящаяся к двум множествам данных, число между -1 и 1. Чем больше по абсолютной величине это число, тем более точные заключения можно делать об одном множестве данных, используя другое.

Классическим коэффициентом корреляции служит коэффициент Кендалла  $R$ , измеряющий корреляцию между двумя ранжировками  $P$  и  $Q$  одного множества объектов. Коэффициент Кендалла задается функцией

$$R(P, Q) = 1 - \frac{2d(P, Q)}{n(n-1)},$$

где  $d$  – функция расстояния;  $n$  - число элементов  $A$ .

Коэффициент Кендалла  $R$  получается нормировкой расстояния  $d(P, Q)$  в величину, изменяющуюся между 0 и 1 и затем преобразованную в шкалу  $[-1, 1]$ .

Действительно,

$$N(P, Q) = 1 - 2 \frac{d(P, Q)}{d_{\max}},$$

где  $d_{\max}$  – максимальное расстояние между двумя ранжировками на множестве  $A$ .

Можно убедиться, что  $d_{\max} = n(n-1)$ .

Теперь, когда введены понятия расстояния между ранжировками, средней ранжировки и коэффициента корреляции, можно исследовать и сопоставить результаты, получаемые по другим методам.

При этом предлагается использовать Парето – анализ множества альтернатив.

Функция выбора по Парето:

$$C^{\text{Par}}(X) = \{x \in X \mid \forall y \in X, x \neq y \exists i, x_i > y_i\},$$

т.е. точка  $x$  выбирается в  $X$  в том и только в том случае, когда любая другая точка  $Y$  из  $X$  имеет хотя бы по одной координате значение меньше, чем  $x$ .

Выделение множества Парето при решении многокритериальных задач часто не является удовлетворительным решением. Это связано с тем, что при достаточно большом исходном множестве вариантов множество Парето оказывается допустимо большим для того, чтобы ЛПР был в состоянии осуществить окончательный выбор самостоятельно. Таким образом, выделение множества Парето можно рассматривать лишь как предварительный этап оптимизации, и налицо необходимость дальнейшего сокращения этого множества.

Для сокращения множества Парето и представления эксперту дополнительной аналитической информации можно выделять множество Парето не по всем критериям, а только по важнейшим, тем более что предварительно критерии были упорядочены по важности. Правда, необходимо оговориться, что сокращение числа критериев, по которым выделяется множество Парето, не всегда может приводить к сокращению этого множества. Можно предложить следующий алгоритм построения

упорядоченной слоистой структуры альтернатив на основе упорядочивания критериев (но без весовых коэффициентов).

Пусть имеется набор альтернативных вариантов  $a_n (a_1, a_2, \dots, a_n)$  и набор упорядоченных по важности критериев  $(p_1, p_2, \dots, p_k)$ .

1. Выбираются два важнейших критерия  $p_1$  и  $p_2$  (либо верхняя компактная группа, т.е., равноважные наиболее значимые критерии, либо самый важный критерий и следующая за ним компактная группа). По этим критериям выделяется множество Парето. Пусть оно включает  $i$  альтернатив. Тогда эти варианты образуют верхнюю группу упорядоченной слоистой структуры.

2. Берется следующий по важности критерий (компактная группа) и выделяется паретовский слой по всем предыдущим критериям плюс новый критерий (компактная группа) на всем множестве альтернатив. Пусть в него входят  $l_{i+1}$  альтернатив.

Очевидно, что  $l_{i+1} \in l_i$ .

Из этого множества исключаются альтернативные варианты, входившие в ранее выделенные группы слоистой структуры. Оставшиеся варианты формируют очередную группу.

Второй шаг алгоритма повторяется до тех пор, пока в слоистую структуру не попадут все варианты, либо пока не выбраны все критерии.

Этот алгоритм в измененном виде реализован в описываемой ниже СППР. Паретовский слой выделяется по каждому интегральному показателю при полном наборе критериев, входящих в этот интегральный показатель, и по важнейшим критериям.

По результатам Парето-анализа по отдельным показателям формируются итоговые результаты. Если данная альтернатива является недоминирующей по важнейшим для какого-нибудь (хоть одного) интегрального показателя, то и в общей оценке она является недоминирующей по важнейшим показателям.

Что же касается доминирующих альтернатив, то из того, что данная альтернатива доминирующая в каждом интегральном показателе, нельзя сделать вывод, что она в целом является доминирующей. Дело в том, что по каждому интегральному показателю она может доминироваться разными альтернативами, и, возможно, не существует ни одной альтернативы, которая доминировала бы данную по всем единичным показателям, входящим во все интегральные. Но формально в разработанной системе при выводе результатов анализа альтернативы, доминирующие по всем интегральным показателям, в итоговых результатах Парето-анализа также показаны как доминирующие.

Необходимо отдельно показать, каким образом определяются важнейшие показатели из общего списка критериев. Мы имеем упорядоченный по важности набор критериев и рассчитанные весовые коэффициенты. Для определения наиболее значимых критериев, исходя из имеющейся информации, можно воспользоваться известными методами кластерного анализа.

Однако в разработанной СППР для определения важнейших показателей применяется эвристическая процедура. Это связано с тем, что автоматическое определение важнейших показателей носит вспомогательный характер, и, в конечном итоге, эксперт сам указывает важнейшие показатели, по которым необходим Парето-анализ. Выделенные автоматической процедурой важнейшие показатели отмечаются на экране, и эксперт может изменять этот список.

Приведем алгоритм процедуры:

Пусть  $(W_1, W_2, \dots, W_k)$  – упорядоченные коэффициенты весомости критериев.

1. Проверяется различие коэффициентов.

Если  $W_1 = W_k$  – все критерии равноважны.

2. Проверяется наличие верхней компактной группы. Если такая группа имеется, то входящие в нее показатели принимаются как важнейшие.

3. Если верхняя компактная группа отсутствует, выбирается не более пяти первых показателей, таких, что:

$$W_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k W_i$$

Если последний отобранный показатель сходит в компактную группу, то берется вся эта группа.

Общая схема решения задачи сравнительного анализа объектов включает пять этапов:

1. Формирование структуры оценочных показателей: задание интегральных показателей и определение влияющих на них единичных показателей.

2. Определение весомости показателей.

2.1. Определение весомости влияния единичных показателей на соответствующие интегральные показатели.

2.2. Определение важнейших показателей, влияющих на соответствующий интегральный показатель. Эксперт может принять важнейшие показатели, предложенные автоматической процедурой.

2.3. Определение весомостей интегральных показателей – через парные сравнения или непосредственно.

3. Отбор объектов исследования для сравнительного анализа.

Очевидно, что в сравнительном анализе могут участвовать только однородные, сравнительные объекты исследования. Эти объекты могут быть заданы либо непосредственно экспертом, либо отобраны из базы данных автоматически как аналоги к указанному объекту исследования в соответствии с заданными классификационными показателями и границами отбора.

4. Анализ по каждому интегральному показателю:

4.1. Формирование матрицы «объекты исследования» - критерий данного интегрального показателя.

4.2. Анализ матрицы методом простого взвешивания и сохранения показательных рангов и мест объектов в ранжировке по данному интегральному показателю.

4.3. Анализ матрицы методом идеальной точки и сохранение полученных рангов и мест объектов исследования в ранжировке по данному интегральному показателю.

4.4. Полученные разными методами упорядочения определяют размытую ранжировку для каждого интегрального показателя.

4.5. Парето-анализ по всем показателям, влияющим на данный интегральный показатель. Определение доминирующих объектов.

4.6. Парето-анализ по важнейшим показателям. Определение объектов исследования, недоминирующих по важнейшим показателям

5. Финальный анализ.

5.1. Формирование матрицы «объекты исследования-критерии» для финального анализа методом простого взвешивания. Критериями в этой матрице являются интегральные показатели. Значения их – ранги альтернатив, полученные на этапе анализа методом простого взвешивания (этап 4).

5.2. Анализ матрицы методом простого взвешивания. Определение мест объектов исследования в финальной ранжировке.

5.3. Формирование матрицы «объект исследования-критерии» для финального анализа методом идеальной точки. Критериями в этой матрице являются интегральные показатели. Значения их – ранги альтернатив (вариантов), полученные на этапе 4.3.

5.4. Анализ матрицы методом расстояния до идеальной точки. Определение мест объектов исследования в финальной ранжировке.

5.5. Формирование финальных результатов доминантного анализа по результатам для каждого интегрального показателя.

Предложенная схема анализа позволяет проводить глубокий покомпонентный сравнительный анализ объектов и получать не только общую размытую ранжировку объектов, но и размытые ранжировки по каждому интегральному показателю. Таким образом, ЛПР получает по каждому объекту исследования его полную картину – где объект выиграл, где проиграл, из чего сложилось его итоговое место. Эти данные, дополненные результатами доминантного анализа, позволяют ЛПР принимать взвешенные, обоснованные решения.

### **1.10.3. Основные задачи экспертных методов**

Под экспертными методами понимаются формальные и неформальные процессы принятия решений на основе обобщенного опыта специалистов в области качества и надежности. Достоверность анализа и получаемых оценок существенным образом зависит от совершенства методик опроса экспертов, компетентности экспертов, а также обработки и анализа полученных данных.

Экспертные методы обычно применяют в тех случаях, когда затруднительно использовать более строгие объективные методы. Эти методы используются при определении коэффициентов весомости показателей качества; при аттестации качества продукции и др. [4]

#### **1.10.3.1. Классификация экспертных методов**

Разработано достаточно большое число экспертных методов. На рис. 1.39 приведена их классификация.

В зависимости от характера работы экспертов экспертные методы принято делить на три группы: индивидуальные, коллективные, комбинированные.

При использовании индивидуальных методов обычно стремятся не допускать общения экспертов в ходе проведения экспертиз, что способствует объективности высказываний их личных мнений по рассматриваемым вопросам. К индивидуальным методам относятся: морфологический анализ, метод письменного и устного интервью. Первые два метода обычно используются в наиболее ответственных задачах, к которым, например, можно отнести определение состава и структуры показателей качества конкретного вида продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации.

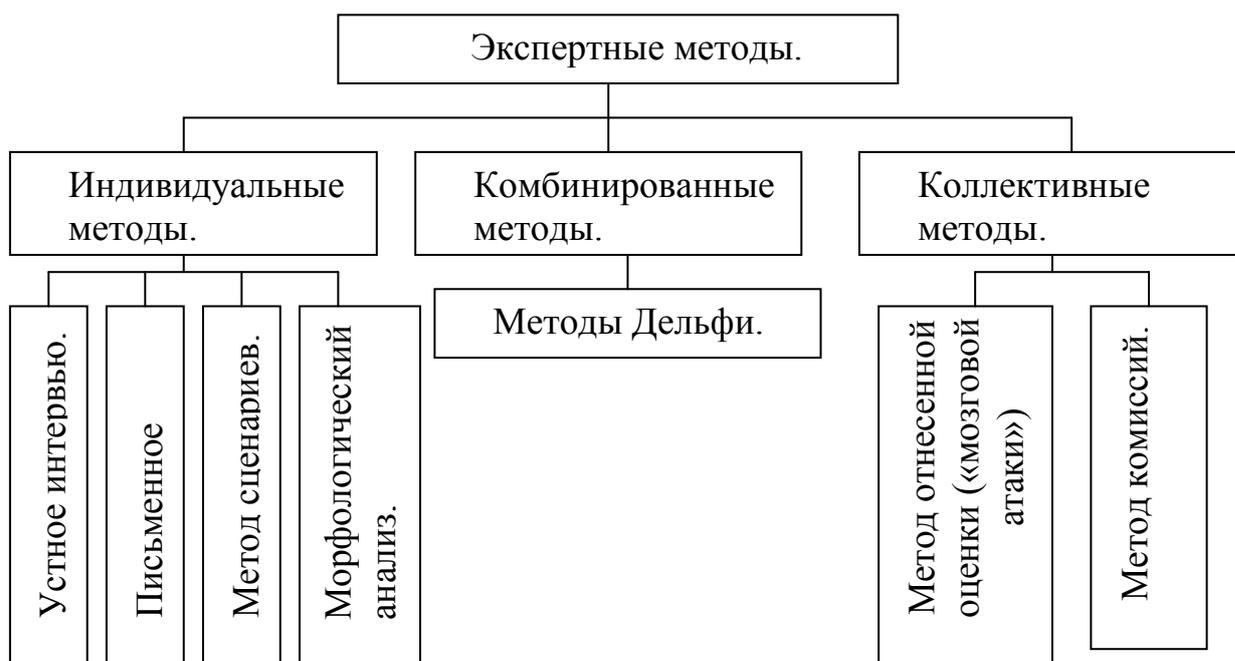


Рис.1.39. Классификация экспертных методов, используемых в задачах оценки качества продукции

Устные и письменные интервью достаточно широко используются при решении практически всех задач анализа качества продукции. При использовании коллективных методов обычно принято организовывать постоянно действующий коллектив экспертов. К коллективным методам относят: метод комиссий и отнесенной оценки («мозговой атаки»).

Наибольшее распространение получил комбинированный метод – метод Дельфи, который сочетает в себе индивидуальный и коллективный методы.

### **1.10.3.2. Общие принципы организации экспертных процедур**

Значительное число задач, связанных с анализом, оценкой и управлением качеством и надежностью продукции на основе экспертных методов, содержит целый ряд следующих общих типовых процедур:

подготовку экспертных процедур, т.е. определение конкретной цели экспертизы, формирование рабочей группы, формирование экспертной группы и составление рабочей документации;

опрос экспертов, в ходе которого проводится анализ документов (опросные анкеты) и оценка объектов исследования;

обработку результатов опроса, состоящего из подготовки исходных данных, выделения экспертов с резко выделяющимся мнением и проверки полноты объектов исследования;

анализ результатов опроса и количественные выводы, включающие расчет итоговых оценок, их группировку, ранжирование по значимости и выделение доминирующих оценок.

Укрупненный алгоритм экспертных процедур, базирующийся на методе Дельфи, представлен на рис. 1.40.

В состав рабочей группы входят организатор, являющийся высококвалифицированным специалистом в области качества и надежности продукции, и технические работники. Организатор руководит работой на всех ее этапах. Он должен быть специалистом в этой области, знать основные положения экспертных методов, а также доподлинно знать вопросы разработки, производства и потребления данного вида продукции. Специалист по оцениваемой продукции должен быть

высококвалифицированный сотрудник организации – разработчика. Основной задачей специалиста является своевременный, правильный и объективный анализ получаемой от экспертов информации и корректировка работы всей экспертной группы. Технические работники осуществляют опрос экспертов и обработку получаемой информации.

В экспертную группу следует включать высококвалифицированных специалистов по оцениваемой продукции (исследователей, проектировщиков, технологов, специалистов из служб качества и надежности и т.д.)

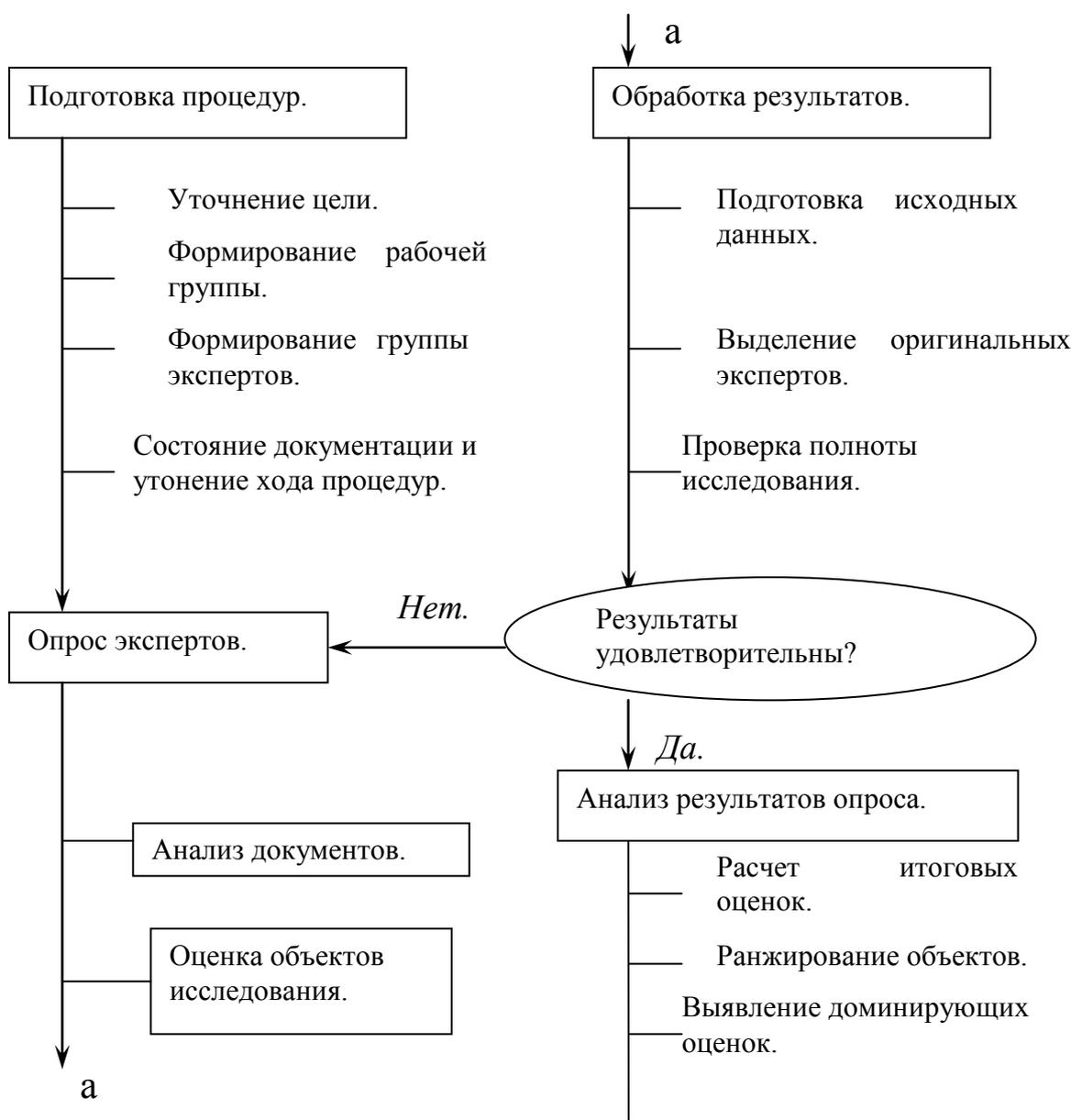


Рис. 1.40. Алгоритм экспертных процедур, основанный на методе Дельфи.

Численно группа должна быть 7 – 12 человек. При необходимости увеличения достоверности экспертных оценок численный состав группы следует увеличить до 15 – 20 человек в зависимости от сложности продукции и сложности решаемых вопросов.

В состав документации экспертного опроса входят опросные анкеты, сопроводительные письма и объяснительные записки. В опросных анкетах идентифицируются конкретные объекты исследования. В сопроводительных письмах излагаются основные цели экспертных исследований и их основные положения. В объяснительных записках подробно излагаются методы работы с опросными анкетами.

### **1.10.3.3. Процедура опроса экспертов и статистическая обработка результатов экспертиз**

В практических задачах анализа, оценки и управления качеством, в которых используются экспертные методы, обычно стараются иметь дело с конкретными количественными признаками, являющимися измерителями показателей качества и надежности. Обычно экспертам предлагается первая опросная анкета, в которой каждому из  $n$  экспертов предлагается написать перечень признаков, характеризующих, по их мнению, конкретный объект (изделие, технологический процесс, комплексный показатель качества изделия или технологического процесса, факторы, влияющие на нормативы надежности составных частей машины и др.).

Затем экспертам предлагается вторая анкета, где количественные признаки должны быть проранжированы по их значимости. Если, по мнению экспертов, ряд признаков не различается по силе их влияния на исследуемый объект, то им присваивается один и тот же порядковый номер (ранг).

На основании этих данных составляется итоговая матрица рангов (табл.1.23)

Матрица рангов

№ эксперт а.	Признак (фактор).					
	<i>l</i>	2	...	<i>J</i>	...	<i>m</i>
<i>l</i>	$X_{l1}$	$X_{l2}$	...	$X_{lj}$	...	$X_{lm}$
2	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2j}$	...	$X_{2m}$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
<i>l</i>	$X_{il}$	$X_{i2}$	...	$X_{ij}$	...	$X_{im}$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
<i>N</i>	$X_{n1}$	$X_{n2}$	...	$X_{nj}$	...	$X_{nm}$

Принятые обозначения:  $X_{ij}$  – ранг  $j$ -го признака у  $i$ -го эксперта;  $n$ -число экспертов;  $m$ -число признаков (факторов).

На основании данных табл. 1.23 техническими работниками проводится оценка степени согласованности (взаимосвязи) опрошенных экспертов. Необходимость в проведении такой процедуры обуславливается двумя основными моментами: во-первых, в силу индивидуальных особенностей каждого эксперта, уровня его знаний и представлений об объекте признаки могут быть истолкованы далеко не однозначно; во-вторых, ранжирование признаков может быть произведено неквалифицированно из-за недостаточной изученности объекта.

Оценка степени согласованности экспертных мнений может быть осуществлена с помощью коэффициента конкордации. Если в матрице рангов (табл. 1.23) в  $i$ -ой строке имеются равные значения рангов, то коэффициент конкордации

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} n^2 (m^3 - m) - n \sum_{i=1}^n T_i}, \quad (1.15)$$

где

$$S = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n X_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \right); \quad (1.16)$$

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j) \quad (1.17)$$

( $t_j$  - число рангов  $j$ -го признака в каждой строке матрицы рангов).

Если в матрице рангов (табл. 1.23) отсутствуют равные значения рангов в каждой из строк, то

$$W = \frac{12 S}{n^2 (m^3 - m)} \quad (1.18)$$

При полном совпадении мнений экспертов  $W=1$ , а при полном несовпадении  $W=0$ . В практических ситуациях  $0 < W < 1$ . При близости коэффициента конкордации к нулю ( $W = 0,05 \div 0,10$ ), следует сделать заключение о том, что состав экспертов подобран неудачно или объект изучен недостаточно полно. И, наоборот, при  $W$ , близком к единице ( $W \geq 0,9$ ), может оказаться, что экспертиза проведена формально без должного изучения объекта. В обеих указанных случаях экспертизу следует повторить. Значимость (отличие) коэффициента конкордации  $W$  от нуля может быть проверена по  $Z$ -критерию Фимера:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{(n-1)W}{1-W} \quad (1.19)$$

Если  $z \geq z_\alpha$ , то с вероятностью  $(1 - \alpha)$  ( $\alpha$  - уровень значимости критерия) можно утверждать, что имеется неслучайная согласованность во мнениях экспертов. Исходными данными для получения  $z_\alpha$  являются уровень значимости  $Z$ -критерия  $\alpha$ , который обычно берется равным  $0,01 \div 0,10$ , и степени свободы  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ :

$$\vartheta_1 = (m-1) - 2/n, \quad (1.20)$$

$$\vartheta_2 = (n-1)\vartheta_1 \quad (1.21)$$

Значения  $z_\alpha$  при  $\alpha = 0,05$  приведены в табл. 14 [4].

Если  $z < z_\alpha$ , то с вероятностью  $p \geq 1 - \alpha$  можно утверждать, что между экспертами нет согласованности и необходимо провести новое

анкетирование или выявить группу экспертов, у которых согласованность мнений достаточно высокая. С этой целью один эксперт исключается из совокупности и подсчитывается коэффициент  $W_I$  для оставшихся экспертов.

Организация и результаты опроса экспертов о влиянии объективных факторов на значения нормативов безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля представлены в разделе 2.4. части 2.

Методика и пример расчета безотказности основных элементов конструкции проектируемого автомобиля на основе учёта их сложности с использованием априорной информации о надёжности аналогов проектируемого автомобиля представлены в разделе 4 части 2

### **1.11. Разработка графического метода расчета средних наработок на отказ элементов конструкции проектируемого автомобиля.**

По разработанной методике рассчитываются вероятности безотказной работы элементов конструкции проектируемого автомобиля (*по уровням иерархии структурно-функциональной схемы проектируемого автомобиля*).

Ранжирование элементов можно провести с использованием коэффициентов предпочтения  $A_i$  или на основании информации о надёжности аналога проектируемого автомобиля.

При этом определяются точечные значения вероятностей безотказной работы элементов конструкции проектируемого автомобиля для определенного заданного значения вероятности безотказной работы автомобиля в целом.

Чтобы построить «кривую убыли» - график вероятности безотказной работы, требуется информация о законе распределения наработок на отказ или между отказами проектируемого автомобиля. Такую информацию можно получить на основании данных об исследованиях надёжности автомобилей –

аналогов или по литературным источникам, где представляются обобщенные данные о числовых характеристиках отказов машин.

По кривой убыли  $P_a(t)$  (рис.1.41) – проектируемого автомобиля, определяется соотношение вероятностей безотказной работы элементов системы определяемого уровня иерархии структурно-функциональной схемы автомобиля ( $P_{эл1}[t], P_{эл2}[t], \dots, P_{элn}[t]$ ) (рис.1.41).

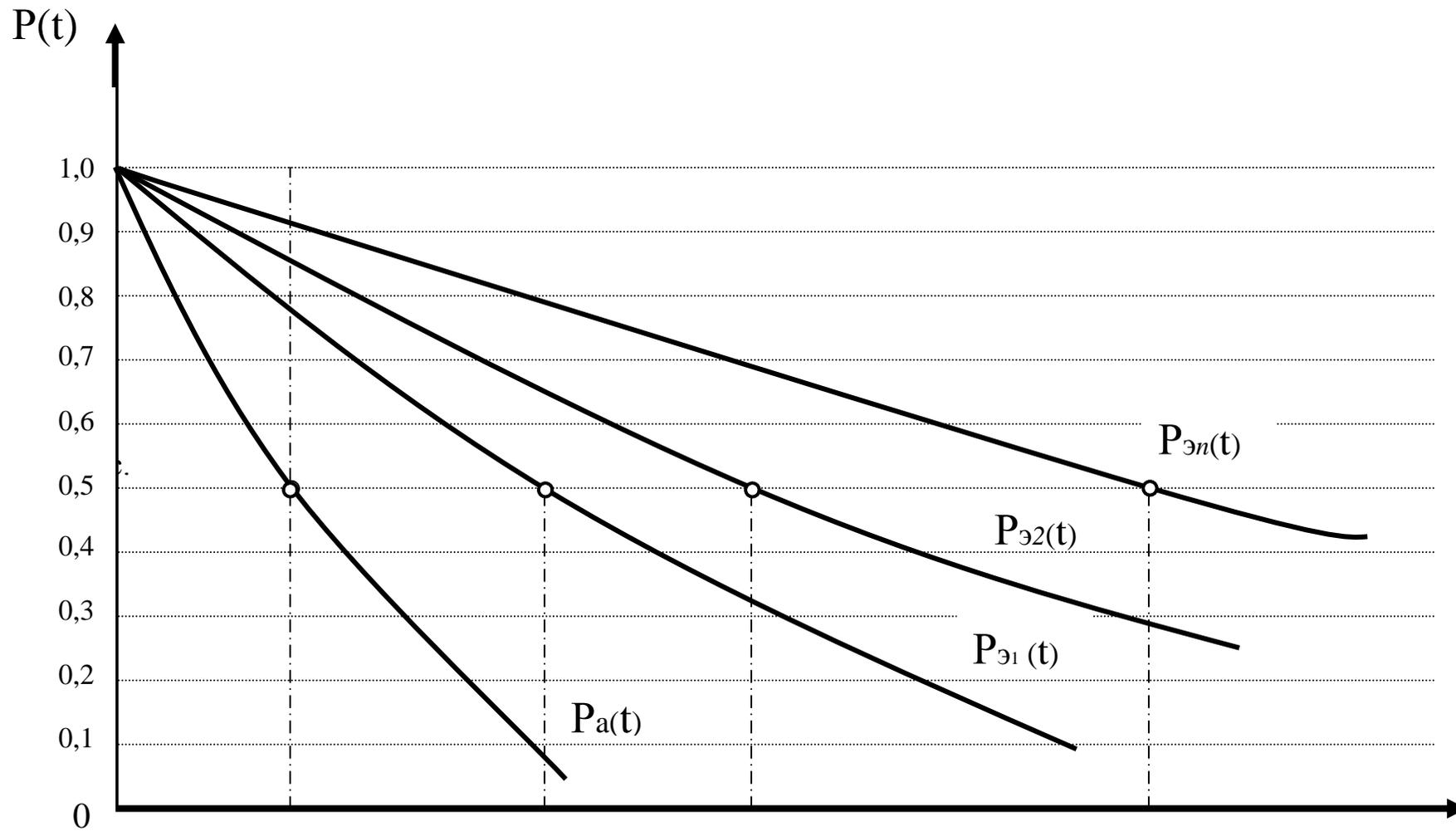
Данные по точечному значению вероятности безотказной работы, соответствующей этому значению наработки и по принятому закону распределения наработок до отказа или между отказами элемента конструкции проектируемого автомобиля позволят построить его «кривую убыли».

Пересечению линии параллельной оси абсцисс проведенной с точки 0,5 (по оси ординат) «кривой убыли» даст точку, проекция которой на ось абсцисс будет соответствовать средней наработке на отказ данного элемента конструкции проектируемого автомобиля

$$t_{эл1cp}(t), t_{эл2cp}(t), \dots, t_{элncp}(t). \text{ (см.рис.1.41).}$$

Процедура и пример расчета безотказности основных элементов конструкции проектируемого автомобиля представлены в разделе 1,5,6 части

2



1.41. Графический метод расчета средних наработок на отказ элементов конструкции проектируемого автомобиля.

## **Часть 2. Решение практических задач по теории надёжности и методам обеспечения требуемого уровня надёжности модернизируемой или проектируемой колесной машины.**

### **2.1. Задачи по теории надёжности.**

#### **2.1.1. Критерии и количественные характеристики надёжности.**

*Критерием надёжности назовем признак, мерило, по которому оценивается надёжность различных изделий.*

К числу наиболее широко применяемых критериев надёжности относятся:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P(t)$ ;
- средняя наработка до первого отказа  $T_{ср}$ ;
- наработка на отказ  $t_{ср}$  ;
- частота отказов  $\alpha(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$  ;
- параметр потока отказов  $\omega(t)$ ;
- функция готовности  $K_g(t)$ ;
- коэффициент готовности  $K_g$

*Характеристикой надёжности называется количественное значение критерия надёжности конкретного изделия.*

Выбор количественных характеристик надёжности зависит от вида изделия.

Основные критерии надёжности можно разбить на две группы:

– критерии, характеризующие надежность невосстанавливаемых изделий;

– критерии, характеризующие надежность восстанавливаемых изделий.

*Невосстанавливаемыми* называются такие изделия, которые в процессе выполнения своих функций не допускают ремонта, если происходит отказ такого изделия, то выполняемая операция будет сорвана и ее необходимо начинать вновь в том случае, если возможно устранение отказа. К таким изделиям относятся как изделия однократного действия (ракеты, управляемые снаряды, искусственные спутники Земли, усилители системы подводной межконтинентальной связи и т. п.), так и изделия многократного действия (колёсные машины, станки, оборудование для производства и ремонта колёсных машин и т.д.)

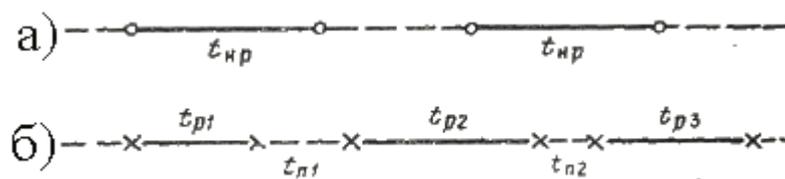


Рис.2.1 Временной график работы невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий:

а – изделия невосстанавливаемые ( $t_{нр}$  – время непрерывной работы, Н.О. – начало операции, К.О. — конец операции); б – изделия восстанавливаемые ( $t_p$  – время исправной работы,  $t_{п}$  – время вынужденного простоя).

*Восстанавливаемыми* называются такие изделия, которые в процессе выполнения своих функций допускают ремонт. Если произойдет отказ такого изделия, то он вызовет прекращение функционирования изделия только на период устранения отказа. К таким изделиям относятся: телевизор, агрегат питания, станок, автомобиль, трактор и т. п.

На рис.2.1 представлен временной график работы невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий.

## 2.1.2. Критерии надежности невосстанавливаемых изделий.

Рассмотрим следующую модель испытания.

Пусть на испытании находится  $N_0$  изделий и пусть испытания считаются законченными, если все они отказали. Причем вместо отказавших образцов, отремонтированные или новые не ставятся. Тогда критериями надежности данных изделий являются:

- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- частота отказов  $a(t)$
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- средняя наработка до первого отказа  $T_{\text{ср}}$ .

*Вероятностью безотказной работы* называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Согласно определению

$$P(t) = P(T > t), \quad (2.1)$$

где  $t$  — время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы;  $T$  — время работы изделия от его включения до первого отказа.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$P(t) = (N_0 - n(t)) / N_0, \quad (2.2)$$

где  $N_0$  — число изделий в начале испытания;  $n(t)$  — число отказавших изделий за время  $t$ ;  $P(t)$  — статистическая оценка вероятности безотказной работы. При большом числе изделий  $N_0$  статистическая оценка  $P(t)$  практически совпадает с вероятностью безотказной работы  $P(t)$ . На практике иногда более удобной характеристикой является вероятность отказа  $Q(t)$ .

*Вероятностью отказа* называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени

возникнет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому

$$Q(t) = P(T \leq t), \quad \Theta(t) = n(t)/N_0, \quad Q(t) = 1 - P(t) \quad . \quad (2.3)$$

*Частотой отказов* называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

Согласно определению

$$\bar{a}(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \quad (2.4)$$

где  $n(\Delta t)$  — число отказавших образцов в интервале времени *от*  $t - \Delta t / 2$  до  $t + \Delta t / 2$ .

*Частота отказов есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа Поэтому.*

$$a(t) = -P'(t) = Q'(t), \quad Q(t) = \int_0^t a(t) dt ,$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt . \quad (2.5)$$

*Интенсивностью отказов* называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

Согласно определению

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t) / (N_{cp} \Delta t) \quad (2.6)$$

где  $N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$  — среднее число исправно работающих изделий в интервале  $\Delta t$ ;  $N_i$  — число изделия, исправно работающих в начале интервала

$\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  — число изделий исправно работающих в конце интервала  $\Delta t$ .

Выражение (2.6) есть статистическое определение интенсивности отказов. Вероятностная оценка этой характеристики находится из выражения

$$\lambda(t) = a(t) / P(t) \quad (2.7)$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.8)$$

*Средней наработкой до первого отказа* называется математическое ожидание времени работы изделия до отказа.

Как математическое ожидание,  $T_{cp}$  вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} t a(t) dt \quad (2.9)$$

Так как  $t$  положительно и  $P(0) = 1$ , а  $P(\infty) = 0$ , то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (2.10)$$

По статистическим данным об отказах средняя наработка до первого отказа вычисляется по формуле

$$\bar{T}_{cp} = \left( \sum_{i=1}^{N_0} t_i \right) / N_0, \quad (2.11)$$

где  $t_i$  – время безотказной работы  $i$ -го образца;  $N_0$  — число испытываемых образцов.

Как видно из формулы (2.11), для определения средней наработки до первого отказа необходимо знать моменты выхода из строя всех

испытываемых элементов. Поэтому для вычисления  $\bar{T}_{cp}$  пользоваться указанной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов  $n_i$ , в каждом  $i$ -том интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять из уравнения

$$\bar{T}_{cp} \approx \left( \sum_{i=1}^m n_i t_{cpi} \right) / N_0 \quad (2.12)$$

В выражении (2.12)  $t_{cpi}$  и  $m$  находятся по следующим формулам:

$$t_{cpi} = (t_{i-1} + t_i) / 2, m = t_k / \Delta t$$

где  $t_{i-1}$  — время начала  $i$ -го интервала;  $t_i$  — время конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  — время, в течение которого вышли из строя все элементы;  $\Delta t = t_{i-1} - t_i$  — интервал времени.

При изучении надежности технических устройств наиболее часто применяются следующие законы распределения времени безотказной работы; экспоненциальный, усеченный нормальный, Релея, Гамма, Вейбулла, логарифмически-нормальный.

В табл. 2.1 приведены выражения для оценки количественных характеристик надежности изделий при указанных законах распределения времени их безотказной работы.

Из выражений для оценки количественных характеристик надежности видно, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, являются функциями времени. На рис.2.2. — приведены типичные зависимости количественных характеристик надежности изделий различного назначения от времени.

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых изделий. Они также позволяют оценить надежность восстанавливаемых изделий до первого отказа.

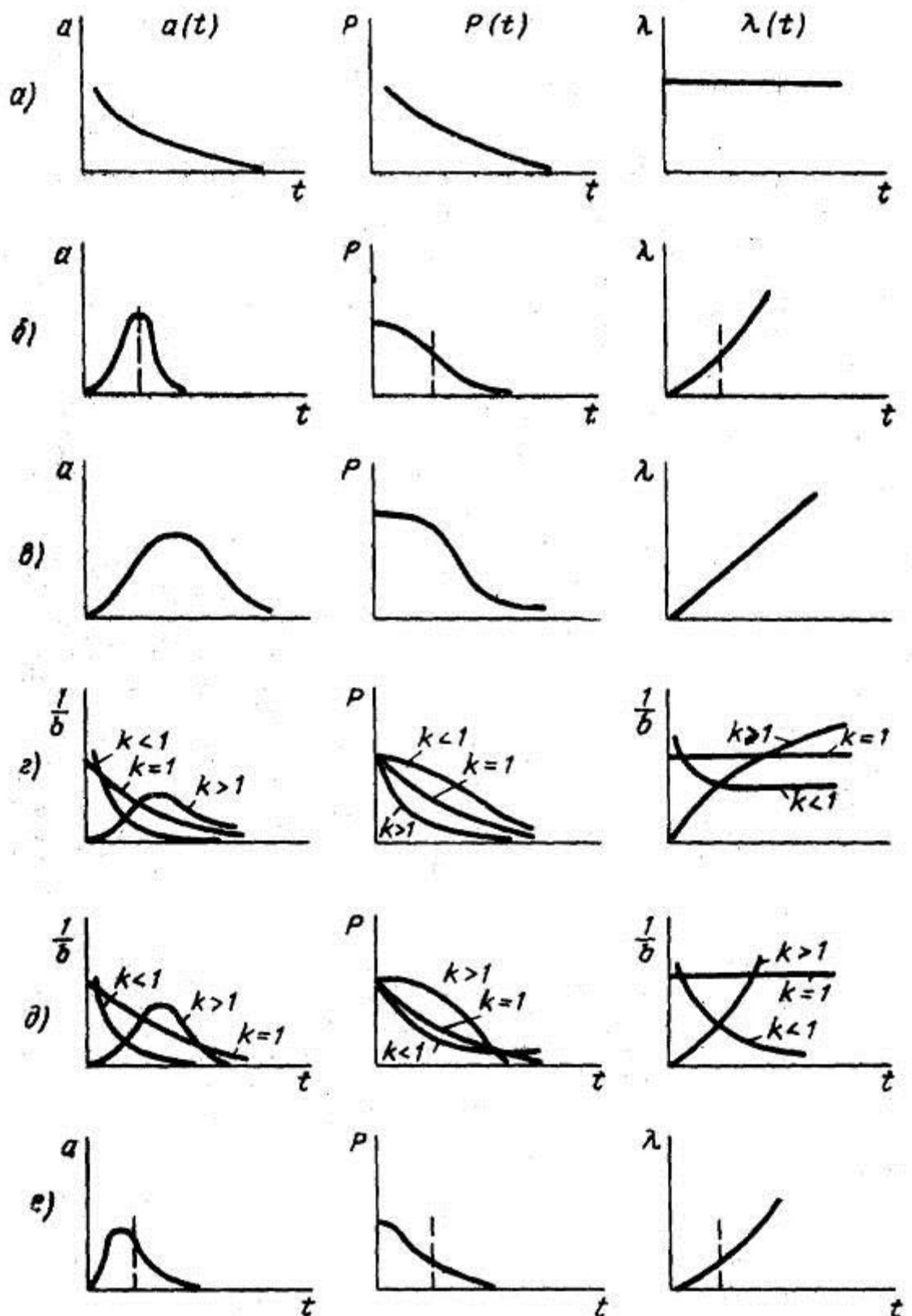


Рис.2. 2. Типичные зависимости количественных характеристик надёжности от времени:

$a$  – экспоненциальный закон;  $b$  – усечённый нормальный закон;  $v$  – закон Релея;  $z$  – гамма распределение;  $d$  – закон Вейбулла;  $e$  – логарифмически-нормальный закон.

Таблица 2.1

Основные соотношения для количественных характеристик надёжности при различных законах распределения времени до отказа.

Наименование закона распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	Средняя наработка до первого отказа
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$	$\frac{1}{\lambda}$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$
Гамма (при $k$ целом)	$\lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$\frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}$	$\frac{k}{\lambda_0}$
Вейбулла	$\lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}$	$e^{-\lambda_0 t^k}$	$\lambda_0 k t^{k-1}$	$\frac{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}$
Усечённый нормальный	$\frac{1}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{F\left(\frac{T_1 - 1}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} e^{\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}$

Логарифмически-нормальный	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2}$	$\frac{1}{2} + \Phi \left( \frac{\mu - \ln t}{\sigma} \right)$	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2}}{0.5 + \Phi \left( \frac{\mu - \ln t}{\sigma} \right)}$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$
---------------------------	---	--	--	--

Наличие нескольких критериев вовсе не означает, что всегда нужно оценивать надежность изделий по всем критериям.

Наиболее полно надежность изделий характеризуется частотой отказов  $a(t)$ . Это объясняется тем, что частота отказов является плотностью распределения, а поэтому несет в себе всю информацию о случайном явлении — времени безотказной работы.

Средняя наработка до первого отказа является достаточно наглядной характеристикой надежности. Однако применение этого критерия для оценки надежности сложной системы ограничено в тех случаях, когда:

- время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;
- закон распределения времени безотказной работы не однопараметрический и для достаточно полной оценки требуются моменты высших порядков;
- система резервированная;
- интенсивность отказов непостоянная;
- время работы отдельных частей сложной системы разное.

Интенсивность отказов — наиболее удобная характеристика надежности простейших элементов, так как она позволяет более просто вычислять количественные характеристики надежности сложной системы.

Наиболее целесообразным критерием надежности сложной системы является вероятность безотказной работы. Это объясняется следующими особенностями вероятности безотказной работы:

- она входит в качестве множителя в другие, более общие

характеристики системы, например в эффективность и стоимость;

- характеризует изменение надежности во времени;
- может быть получена сравнительно просто расчетным путем в процессе проектирования системы и оценена в процессе ее испытания.

### 2.1.3. Критерии надёжности восстанавливаемых изделий

Рассмотрим следующую модель испытания.

Пусть на испытании находится  $N$  изделий и пусть отказавшие изделия немедленно заменяются исправными (новыми или отремонтированными). Испытания считаются законченными, если число отказов достигает величины, достаточной для оценки надежности с определенной доверительной вероятностью. Если не учитывать времени, потребного на восстановление системы, то количественными характеристиками надежности могут быть параметр потока отказов  $\omega(t)$  и наработка на отказ  $t_{cp}$ .

*Параметром потока отказов* называется отношение числа отказавших изделия в единицу времени к числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия заменяются исправными (новыми или отремонтированными).

Согласно определению

$$\bar{\omega}(t) = n(\Delta t) / (N \Delta t), \quad (2.13)$$

где  $n(\Delta t)$  — число отказавших образцов в интервале времени от  $t - \Delta t/2$  до  $t + \Delta t/2$ ;  $N$  — число испытываемых образцов;  $\Delta t$  — интервал времени.

Выражение (2.13) является статистическим определением параметра потока отказов.

Параметр потока отказов и частота отказов для ординарных потоков с ограниченным последствием связаны интегральным уравнением Вольтерра второго рода

$$\omega(t) = a(t) + \int_0^t \omega(\tau) a(t - \tau) d\tau \quad (2.14)$$

По известной  $a(t)$  можно найти все количественные характеристики надежности невосстанавливаемых изделий. Поэтому (2.14) является основным уравнением, связывающим количественные характеристики надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий при мгновенном восстановлении.

Уравнение (2.14) можно записать в операторной форме:

$$\omega(s) = \frac{a(s)}{1 - a(s)} \quad a(s) = \frac{\omega(s)}{1 + \omega(s)} \quad (2.15)$$

Соотношения (2.15) позволяют найти одну характеристику через другую, если существуют преобразования Лапласа функций  $a(s)$  и  $\omega(s)$  и обратные преобразования выражений (2.15).

Параметр потока отказов обладает следующими важными свойствами:

- 1) для любого момента времени независимо от закона распределения времени безотказной работы параметр потока отказов больше, чем частота отказов, т.е.  $\omega(t) > a(t)$ ;
- 2) независимо от вида функции  $a(t)$  параметр потока отказов  $\omega(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  стремится к  $1/T_{\text{ср}}$ . Это важное свойство параметра потока отказов означает, что при длительной эксплуатации ремонтируемого изделия поток его отказов независимо от закона распределения времени безотказной работы становится стационарным. Однако это вовсе не означает, что интенсивность отказов есть величина постоянная;
- 3) если  $\lambda(t)$  —возрастающая функция времени, то  $\lambda(t) > \omega(t) > a(t)$  если  $\lambda(t)$ —убывающая функция, то  $\omega(t) > \lambda(t) > a(t)$ ;

4) при  $\lambda(t) \neq \text{const}$  параметр потока отказов системы не равен сумме параметров потоков отказов элементов, т. е.

$$\omega_c(t) \neq \sum_{i=1}^N \omega_i(t) \quad (2.16)$$

Это свойство параметра потока отказов позволяет утверждать, что при вычислении количественных характеристик надежности сложной системы нельзя суммировать имеющиеся в настоящее время значения интенсивностей отказов элементов, полученные по статистическим данным об отказах изделий в условиях эксплуатации, так как указанные величины являются фактически параметрами потока отказов;

5) при  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$  параметр потока отказов равен интенсивности отказов  $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda$ .

Из рассмотрения свойств интенсивности и параметра потока отказов видно, что эти характеристики различны.

В настоящее время широко используются статистические данные об отказах, полученные в условиях эксплуатации аппаратуры. При этом они часто обрабатываются таким образом, что приводимые характеристики надежности являются не интенсивностью отказов, а параметром потока отказов  $\omega(t)$ . Это вносит ошибки при расчетах надежности. В ряде случаев они могут быть значительными.

Для получения интенсивности отказов элементов из статистических данных об отказах ремонтируемых систем необходимо воспользоваться формулой (2.6), для чего необходимо знать предысторию каждого элемента принципиальной схемы. Это может существенно усложнить методику сбора статистических данных об отказах. Поэтому целесообразно определять  $\lambda(t)$  по параметру потока отказов  $\omega(t)$ . Методика расчета сводится к следующим вычислительным операциям:

– по статистическим данным об отказах элементов ремонтируемых изделий и по формуле (2.13) вычисляется параметр потока отказов и строится гистограмма  $\omega_i(t)$ ;

- гистограмма заменяется кривой, которая аппроксимируется уравнением;
- находится преобразование Лапласа  $\omega_i(s)$  функции  $\omega_i(t)$ ;
- по известной,  $\omega_i(s)$  на основании (2.15) записывается преобразование Лапласа  $a_i(s)$  частоты отказов;
- по известной  $a_i(s)$  находится обратное преобразование частоты отказов  $a_i(t)$ ;
- находится аналитическое-выражение для интенсивности отказов по формуле

$$\lambda_i(t) = a_i(t) / \left( 1 - \int_0^t a_i(t) dt \right); \quad (2.17)$$

- строится график  $\lambda_i(t)$ .

Если имеется участок, где  $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$ , то постоянное значение интенсивности отказов принимается для оценки вероятности безотказной работы. При этом считается справедливым экспоненциальный закон надежности.

Приведенная методика не может быть применена, если не удастся найти по  $a(s)$  обратное преобразование частоты отказов  $a(t)$ , В этом случае приходится применять приближенные методы решения интегрального уравнения (2.14).

*Наработкой на отказ* называется среднее значение времени между соседними отказами.

Эта характеристика определяется по статистическим данным об отказах по формуле

$$\bar{t}_{cp} = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) / n, \quad (2.18)$$

где  $t_i$  — время исправной работы изделия между  $(i - 1)$ -м и  $i$ -м отказами;  $n$  — число отказов за некоторое время  $t$ .

Из формулы (2.18) видно, что в данном случае наработка на отказ определяется по данным испытания одного образца изделия. Если на испытании находится  $N$  образцов в течение времени  $t$ , то наработка на отказ вычисляется по формуле

$$\bar{t}_{cp} = \left( \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} \right) / \sum_{j=1}^N n_j, \quad (2.19)$$

где  $t_{ij}$  — время исправной работы  $j$ -го образца изделия между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказом;  $n_j$  — число отказов за время  $t$   $j$ -го образца.

Нарботка на отказ является достаточно наглядной характеристикой надежности, поэтому она получила широкое распространение на практике.

Параметр потока отказов и наработка на отказ характеризуют надежность ремонтируемого изделия и не учитывают времени, потребного на его восстановление. Поэтому они не характеризуют готовности изделия к выполнению своих функций в нужное время. Для этой цели вводятся такие критерии, как коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

*Коэффициентом готовности* называется отношение времени исправной работы к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок. Эта характеристика обозначается  $K_G$ .

Согласно данному определению

$$K_G = t_p / (t_p + t_{II}), \quad (2.20)$$

где  $t_p$  — суммарное время исправной работы изделия;  $t_{II}$  — суммарное время вынужденного простоя.

Времена  $t_p$  и  $t_{II}$  вычисляются по формулам

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad t_{II} = \sum_{i=1}^n t_{IIi}, \quad (2.21)$$

где  $t_{pi}$  — время работы изделия между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказом;  $t_{pi}$  — время вынужденного простоя после  $i$ -го отказа;  $n$  — число отказов (ремонтов) изделия.

Выражение (2.20) является статистическим определением коэффициента готовности. Для перехода к вероятностной трактовке величины  $t_p$  и  $t_{\pi}$  заменяются математическими ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно.

Тогда

$$K_{\Gamma} = t_{cp} / (t_{cp} + t_B) \quad (2.22)$$

где  $t_{cp}$  — наработка на отказ;  $t_B$  — среднее время восстановления.

*Коэффициентом вынужденного простоя* называется отношение времени вынужденного простоя к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев изделия, взятых за один и тот же календарный срок.

Согласно определению

$$\overline{K}_{\Pi} = t_{\Pi} / (t_P + t_{\Pi}) \quad (2.23)$$

или, переходя к средним величинам,

$$K_{\Pi} = t_B / (t_{cp} + t_B) \quad (2.24)$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma} \quad (2.25)$$

При анализе надежности восстанавливаемых систем обычно коэффициент готовности вычисляют по формуле

$$K_{\Gamma} = T_{cp} / (T_{cp} + t_B) \quad (2.26)$$

Формула (2.26) верна только в том случае, если поток отказов простейший, и тогда  $t_{cp} = T_{cp}$

Часто коэффициент готовности, вычисленный по формуле (2.26), отождествляют с вероятностью того, что в любой момент времени восстанавливаемая система исправна. На самом деле указанные характеристики неравноценны и могут быть отождествлены при определенных допущениях.

Действительно, вероятность возникновения отказа ремонтируемой системы в начале эксплуатации мала. С ростом времени  $t$  эта вероятность возрастает. Это означает, что вероятность застать систему в исправном состоянии в начале эксплуатации будет выше, чем по истечении некоторого времени. Между тем на основании формулы (2.26) коэффициент готовности не зависит от времени работы.

Для выяснения физического смысла коэффициента готовности  $K_r$  запишем формулу для вероятности застать систему в исправном состоянии. При этом рассмотрим наиболее простой случай, когда интенсивность отказов и интенсивность восстановления есть величины постоянные.

Предполагая, что при  $t=0$  система находится в исправном состоянии ( $P(0)=1$ ), вероятность застать систему в исправном состоянии определяется из выражений

$$P_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t},$$

$$P_r(t) = K_r + (1 - K_r) e^{-t/K_r t_B}, \quad (2.27)$$

где

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}}; \quad \mu = \frac{1}{t_B}; \quad K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + t_B}$$

Это выражение устанавливает зависимость между коэффициентом готовности системы и вероятностью застать ее в исправном состоянии в любой момент времени  $t$ .

Из (2.27) видно, что  $P_r(t) \rightarrow K_r$  при  $t \rightarrow \infty$ , т.е. практически коэффициент готовности имеет смысл вероятности застать изделие в исправном состоянии при установившемся процессе эксплуатации.

В некоторых случаях критериями надежности восстанавливаемых систем могут быть также критерии надежности невосстанавливаемых систем, например: вероятность безотказной работы, частота отказов, средняя наработка до первого отказа, интенсивность отказов. Такая необходимость возникает всегда, когда имеет смысл оценить надежность восстанавливаемой системы до первого отказа, а также в случае, когда применяется резервирование с восстановлением отказавших резервных устройств в процессе работы системы, причем отказ всей резервированной системы не допускается.

#### **2.1.4. Типовые примеры и их решения**

Задачи, которые встречаются при определении количественных характеристик надежности, могут быть разбиты на следующие группы:

- 1) определение количественных характеристик надежности по статистическим данным об отказах изделия;
- 2) определение количественных характеристик надежности изделия при известном аналитическом выражении одной какой-либо характеристики.

При решении задач первой группы используются статистические определения количественных характеристик надежности, при решении задач второй группы — вероятностные определения характеристик и аналитические зависимости между ними.

В настоящей главе при определении количественных характеристик надежности технических устройств по статистическим данным об их отказах не учитывается достоверность полученных результатов. По этой причине иногда в примерах и задачах исходные данные о числе испытуемых

образцов и количестве отказов приводятся без учета требований достоверности получения количественных характеристик надежности.

Следует иметь в виду, что частота, интенсивность отказов и параметр потока отказов, вычисленные по формулам (2.4), (2.6) и (2.13), являются постоянными в диапазоне интервала времени  $\Delta t$ , а функции  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$ ,  $\bar{\omega}(t)$  — ступенчатыми кривыми или гистограммами. Для удобства изложения в дальнейшем при решении задач на определение частоты, интенсивности и параметра потока отказов по статистическим данным об отказах изделий ответы относятся к середине интервала  $\Delta t$ . При этом результаты вычислений графически представляются не в виде гистограмм, а в виде точек, отнесенных к середине интервалов  $\Delta t_i$ , и соединенных плавной кривой.

Рассмотрим типовые примеры.

**Пример 2.1.** Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп типа 6Ж4. За 3000 час отказало 80 ламп. Требуется определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа электронных ламп в течение 3000 час.

**Решение.** По формулам (2.2) и (2.3) определяем

$$\bar{P}(3000) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{1000 - 80}{1000} = 0,92,$$

$$\bar{Q}(3000) = \frac{n(t)}{N_0} = \frac{80}{1000} = 0,08$$

или

$$\bar{Q}(3000) = 1 - \bar{P}(3000) = 1 - 0,92 = 0,08.$$

**Пример 2.2.** На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 час отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000 — 4000 час отказало еще 50 ламп. Требуется определить частоту и интенсивность отказов электронных ламп в промежутке времени 3000 — 4000 час.

**Решение.** По формулам (2.4) и (2.6) находим

$$\bar{a}(3500) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_0} = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}},$$

$$\bar{\lambda}(3500) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_{cp}} = \frac{50}{1000 \cdot (920 + 870) / 2} \approx 5,6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$$

**Пример 2.3.** На испытание поставлено  $N_0=400$  изделий. За время  $t = 3000$  час отказало  $n(t)=200$  изделий, за интервал времени  $\Delta t=100$  час отказало  $n(\Delta t)=100$  изделий (рис. 1.3). Требуется определить  $\bar{P}(3000)$ ,  $\bar{P}(3100)$ ,  $\bar{P}(3050)$ ,  $\bar{a}(3050)$ ,  $\bar{\lambda}(3050)$ .

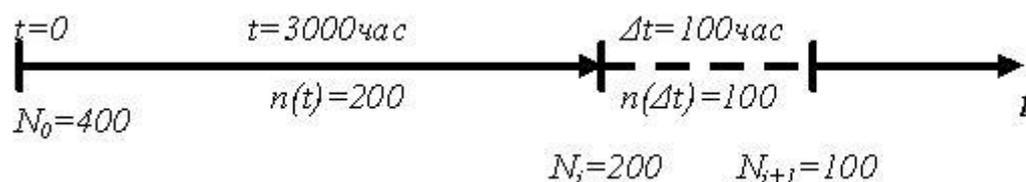


Рис2.3. Временной график к примеру 2.3.

**Решение .1.** По формуле (2.2) найдем вероятность безотказной работы:

для  $t_{п}=3000$  час (начало интервала)

$$\bar{P}(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5;$$

для  $t_{к}=3100$  час (конец интервала)

$$\bar{P}(3100) = \frac{N_0 - n(3100)}{N_0} = \frac{400 - 300}{400} = 0,25 .$$

Определим среднее число исправно работающих образцов в интервале  $\Delta t$ :

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2} = \frac{200 + 100}{2} = 150$$

Число отказавших изделий за время  $t = 3050$  час

$$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250,$$

тогда

$$\bar{P}(3050) = \frac{N_0 - n(3050)}{N_0} = \frac{400 - 250}{400} = 0,375.$$

2. По формуле (2.4) определяем частоту отказа:

$$\bar{a}(3050) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_0} = \frac{100}{100 \cdot 400} = 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}.$$

3. По формуле (2.6) определяем интенсивность отказа

$$\bar{\lambda}(3050) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_{cp}} = \frac{100}{100 (200 + 100) / 2} = 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}.$$

Интенсивность отказа можно также определить по формуле (2.7):

$$\bar{\lambda}(3050) = \frac{\bar{a}(3050)}{\bar{P}(3050)} = \frac{0,0025}{0,375} = 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}.$$

**Пример 2.4.** На испытании находилось;  $N_0=1000$  образцов неремонтируемой аппаратуры. Число отказов  $n(\Delta t)$  фиксировалось через каждые 100 час работы ( $\Delta t=100$  час). Данные об отказах приведены в табл. 2.2. Требуется вычислить количественные характеристики надежности и построить зависимости характеристик от времени.

Таблица 2.2

Данные об отказах к примеру 1.4

$\Delta t_i, \text{ час}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ час}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ час}$	$n(\Delta t_i)$
---------------------------	-----------------	---------------------------	-----------------	---------------------------	-----------------

0-100	50	1000-1100	15	2000-2100	12
100-200	40	1100-1200	14	2100-2200	13
200-300	32	1200-1300	14	2200-2300	12
300-400	25	1300-1400	13	2300-2400	13
400-500	20	1400-1500	14	2400-2500	14
500-600	17	1500-1600	13	2500-2600	16
600-700	16	1600-1700	13	2600-2700	20
700-800	16	1700-1800	13	2700-2800	25
800-900	15	1800-1900	14	2800-2900	30
900-1000	14	1900-2000	12	2900-3000	40

Р е ш е н и е . Аппаратура относится к классу невосстанавливаемых изделий. Поэтому критериями надежности будут  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_{\text{ср}}$ .

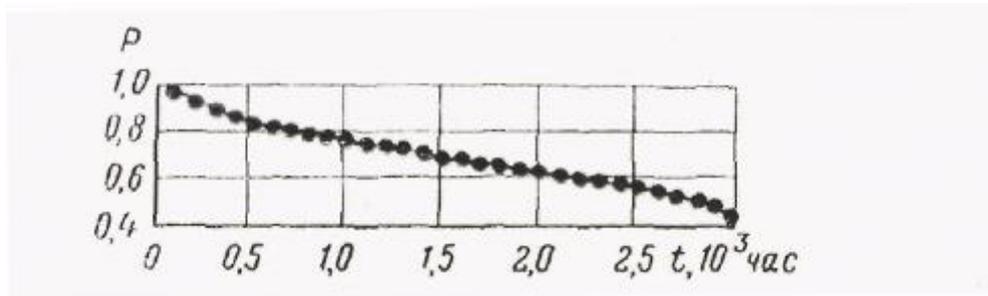


Рис.2. 4. Зависимость  $P$  от  $t$  (к примеру 2.4).

Вычислим  $P(t)$ , На основании формулы (2.2) имеем

$$\bar{P}(100) = \frac{N_0 - n(100)}{N_0} = \frac{1000 - 50}{1000} = 0,95 ,$$

$$\bar{P}(200) = \frac{1000 - 90}{1000} = 0,91 ,$$

.....

$$\bar{P}(3000) = \frac{1000 - 575}{1000} = 0,425 .$$

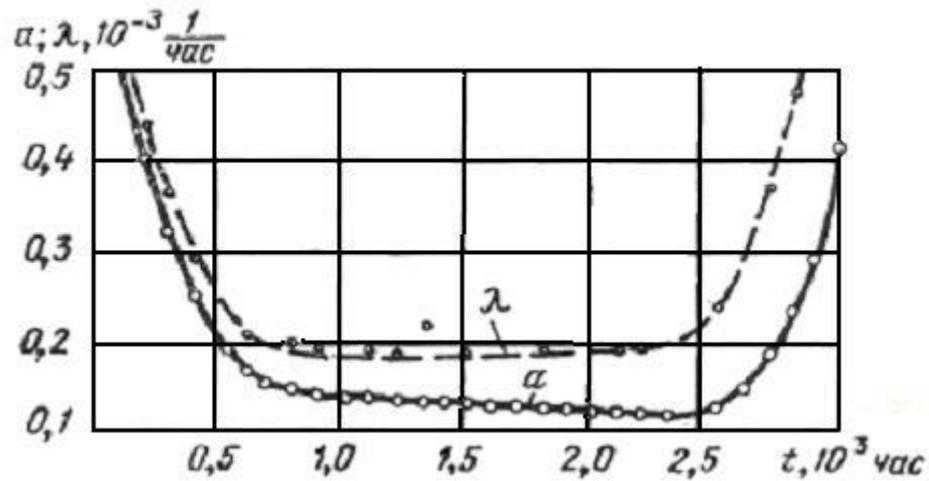


Рис. 2.5. Зависимость  $a$  и  $\lambda$  от  $t$  (к примеру 2.4).

Для расчета характеристик  $a(t)$  и  $\lambda(t)$  применим формулы (2.4) и (2.6), тогда

$$\bar{a}(50) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 100} = 0,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}},$$

$$\bar{a}(150) = \frac{40}{1000 \cdot 100} = 0,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}},$$

.....

$$\bar{a}(2950) = \frac{40}{1000 \cdot 100} = 0,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}};$$

$$\bar{\lambda}(50) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_{cp}} = \frac{50}{100 (1000 + 950) / 2} = 0,514 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}},$$

$$\bar{\lambda}(150) = \frac{40}{100 (950 + 910) / 2} = 0,43 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}},$$

.....

$$\bar{\lambda}(2950) = \frac{40}{100 (465 + 425) / 2} = 0,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}.$$

Значения  $P(t)$ ,  $a(t)$  и  $h(t)$ , вычисленные для всех  $\Delta t_i$ , приведены в табл.2.3. а их зависимости от времени—на рис.2.4 и 2.5.

Следует иметь в виду, что в табл. 2.3. данные  $\bar{P}(t)$  приведены для концов интервалов  $\Delta t_i$ , а данные для  $\bar{a}(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$  — для середины интервалов  $\Delta t_i$ . Поэтому определение  $P(t)$  формуле (2.7) и данным табл. 2.3. не даст значений  $\bar{P}(t)$ , указанных в таблице.

Вычислим среднее время безотказной работы, предположив, что на испытании находились только те образцы, которые отказали.

По формуле (2.12), учитывая, что в данном случае  $m=t_k/\Delta t=3000/100=30$  и  $N_0=575$ , имеем

$$\begin{aligned} \bar{T}_{cp} &\approx \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}}{N_0} = \\ &= \frac{50 \cdot 50 + 40 \cdot 150 + 32 \cdot 250 + \dots + 30 \cdot 2850 + 40 \cdot 2050}{575} = \\ &= 1400 \text{ час.} \end{aligned}$$

Полученное значение средней наработки до первого отказа является заниженным, так как опыт был прекращен после отказа 575 образцов из 1000, поставленных на испытание.

Таблица 2.3.

Вычисленные значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$  к примеру 2.4

$\Delta t_i, \text{ час}$	$\bar{P}(t)$	$\bar{a}(t), 10^{-3} \cdot 1 / \text{ час}$	$\bar{\lambda}(t), 10^{-3} \cdot 1 / \text{ час}$
0-100	0,950	0,50	0,514
100-200	0,910	0,40	0,430
200-300	0,878	0,32	0,358
300-400	0,853	0,25	0,289
400-500	0,833	0,20	0,238
500-600	0,816	0,17	0,208
600-700	0,800	0,16	0,198
700-800	0,784	0,16	0,202
800-900	0,769	0,15	0,193
900-1000	0,755	0,14	0,184
1000-1100	0,740	0,15	0,200
1100-1200	0,726	0,14	0,191
1200-1300	0,712	0,14	0,195

1300-1400	0,699	0,13	0,184
1400-1500	0,685	0,14	0,202
1500-1600	0,672	0,13	0,192
1600-1700	0,659	0,13	0,195
1700-1800	0,646	0,13	0,200
1800-1900	0,632	0,14	0,220
1900-2000	0,620	0,12	0,192
2000-2100	0,608	0,12	0,195
2100-2200	0,595	0,13	0,217
2200-2300	0,583	0,12	0,204
2300-2400	0,570	0,13	0,225
2400-2500	0,556	0,14	0,248
2500-2600	0,540	0,16	0,290
2600-2700	0,520	0,20	0,376
2700-2800	0,495	0,25	0,490
2800-2900	0,465	0,30	0,624
2900-3000	0,425	0,40	0,900

**Пример 2.5.** В течение некоторого периода времени производилось наблюдение за работой одного экземпляра радиолокационной станции. За весь период наблюдения было зарегистрировано 15 отказов. До начала наблюдения станция проработала 258 час, к концу наблюдения наработка станции составила 1233 час. Требуется определить среднюю наработку на отказ  $t_{cp}$ .

**Решение . 1 .** Нарботка радиолокационной станции за наблюдаемый период равна

$$t = t_2 - t_1 = 1233 - 258 = 975 \text{ час}$$

2. Принимая  $\sum_{i=1}^n t_i = 975 \text{ час}$ , по формуле (2.18) находим среднюю наработку на отказ:

$$\bar{T}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{975}{15} = 65 \text{ час} .$$

**Пример 2.6.** Производилось наблюдение за работой трех экземпляров однотипной аппаратуры. За период наблюдения было зафиксировано по первому экземпляру аппаратуры 6 отказов, по второму и третьему—11 и 8 отказав соответственно. Нарботка первого экземпляра составила 181 час, второго — 329 и третьего — 245 час. Требуется определить наработку аппаратуры на отказ.

**Р е ш е н и е .1.** Определяем суммарную наработку трех образцов аппаратуры:

$$t_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} = 181 + 329 + 245 = 755 \text{ час}$$

2. Определяем суммарное количество отказов:

$$n_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N n_j = 6 + 11 + 8 = 25 \text{ отказов}$$

3. Находим среднюю наработку на отказ по формуле (2.19):

$$\bar{T}_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j} = \frac{t_{\Sigma}}{n_{\Sigma}} = \frac{775}{25} = 30,2 \text{ час.}$$

**Пример 2.7.** Система состоит из 5 приборов, причем отказ любого одного из них ведет к отказу системы. Известно, что первый прибор отказал 34 раза в течение 952 час. работы, второй — 24 раза в течение 960 час. работы, а остальные приборы в течение 210 час. работы отказали 4, 6 и 5 раз соответственно. Требуется определить наработку на отказ системы в целом, если справедлив экспоненциальный закон надежности для каждого из пяти приборов.

**Р е ш е н и е .** Для решения дайной задачи воспользуемся следующими соотношениями:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i \text{ и } t_{cp} = \frac{1}{\lambda_c}.$$

1. Определим интенсивность отказов для каждого прибора

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{34}{952} = 0,0357 \frac{1}{\text{час}}, \quad \bar{\lambda}_2 = \frac{24}{960} = 0,025 \frac{1}{\text{час}},$$

$$\bar{\lambda}_{3,4,5} = \frac{4 + 6 + 5}{210} = 0,0714 \frac{1}{\text{час}}.$$

2. Интенсивность отказов системы будет

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,4,5} = 0,0357 + 0,025 +$$

$$+ 0,0714 = 0,1321 \frac{1}{\text{час}}.$$

3. Средняя наработка на отказ системы равна

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,1321} = 7,57 \text{ час}.$$

**Пример 2.8** За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 8 отказов. Время восстановления составило:  $t_1=12$  мин;  $t_2=23$  мин;  $t_3=15$  мин;  $t_4=9$  мин;  $t_5=7$  мин;  $t_6=28$  мин;  $t_7=25$  мин;  $t_8=31$  мин.

Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры.

**Решение:**

$$\bar{t}_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} =$$

$$= \frac{160}{8} = 20 \text{ мин}$$

**Пример 2.9.** При эксплуатации системы было зарегистрировано  $n=40$  отказов. Распределение отказов по группам элементов и время, затраченное на восстановление, приведены в табл.2.4. Необходимо найти величину среднего времени восстановления систем.

**Решение.** Определяем среднее время восстановления аппаратуры по группам элементов.

Для полупроводниковых приборов

$$\bar{t}_B = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} t_i}{n_i} = \frac{\sum_{i=1}^8 t_i}{8} = \frac{600}{8} \text{ мин.}$$

Аналогично:

- для резисторов и конденсаторов 76 мин;
- для реле, трансформаторов, дросселей 113 мин;
- для ЭВП 50 мин;
- для прочих элементов 120 мин.

Таблица 2.4.

Количество зарегистрированных отказов по группам элементов и время, затраченное на восстановление аппаратуры (к примеру 2.9)

Группа элементов	Количество отказов по группе $n_i$	Вес отказов по группе $m_i = \frac{n_i}{n}$	Время восстановления $t_i$ , мин	Суммарное время восстановления по группе $t_B$ , мин
ППП	8	0,2	80 59 110 91 45 43 99 73	600
Резисторы и конденсаторы	10	0,25	61 73 91 58 44 112 82 54 91 94	760
Реле, трансформаторы, дроссели	4	0.1	102 98 124 128	452
ЭВП	14	0,35	60	700

			64	
			56	
			36	
			65	
			44	
			42	
			33	
			32	
			23	
			86	
			75	
			61	
			23	
Прочие элементы	4	0,1	125	480
			133	
			115	
			107	

Рассчитаем среднее время восстановления системы по формуле

$$\bar{t}_{BC} = \sum_{i=1}^m t_{Bi} m_i,$$

где  $t_{Bi}$  — среднее время восстановления элементов  $i$ -й группы;  $m_i$  — вес отказов по группам элементов.

Подставляя значения данных в формулу, получим

$$\bar{t}_{BC} = 0,2 \cdot 75 + 0,25 \cdot 76 + 0,1 \cdot 113 + 0,35 \cdot 50 + 0,1 \cdot 120 = 75 \text{ мин.}$$

**Пример 2.10.** Аппаратура имела среднюю наработку на отказ  $t_{cp}=65$  час и среднее время восстановления  $t_B=1,25$  час. Требуется определить коэффициент готовности.

**Р е ш е н и е .** По формуле (2.22) имеем

$$K_G = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_B} = \frac{1}{1 + t_B / t_{cp}} = \frac{1}{1 + 0,019} = 0,98.$$

**Пример 2.11.** Пусть время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром  $\lambda=2,5 \cdot 10^{-5}$  1/час.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $T_{cp}$ , если  $t=500, 1000, 2000$  час.

**Р е ш е н и е .** Используем формулы для  $P(t)$ ,  $a(t)$  и  $T_{cp}$  приведенные в табл. 1.1

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} t}.$$

Используя данные табл. П. 1, получим:

$$P(500) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500} = e^{-0,0125} = 0,9875 ;$$

$$P(1000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0,025} = 0,9753 ;$$

$$P(2000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = e^{-0,05} = 0,9512 .$$

2. Вычислим частоту отказа:

$$a(t) = \lambda(t)P(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} t}.$$

$$a(500) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9875 = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9875 = 2,469 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}},$$

$$a(1000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9753 = 2,439 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}},$$

$$a(2000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9512 = 2,378 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}}.$$

3. Вычислим среднюю наработку до первого отказа:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ час.}$$

**Пример 2.12.** Пусть время работы элемента до отказа подчинено усеченному нормальному закону с параметрами  $T_1=8000$  час,  $\sigma=2000$  час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_{cp}$  для  $t=4000, 6000, 8000, 10000$  час

**Р е ш е н и е .** Воспользуемся формулами для  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_{cp}$ , приведенными в табл.2.1.

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} = \frac{F\left(\frac{8000 - t}{2000}\right)}{F(4)}.$$

По данным табл. П.2. найдём:

$$P(4000) = \frac{F\left(\frac{8000 - 4000}{2000}\right)}{F(4)} = \frac{F(2)}{F(4)} = \frac{0,97725}{1} = 0,97725 ;$$

$$P(6000) = \frac{F\left(\frac{8000 - 6000}{2000}\right)}{F(4)} = \frac{F(1)}{F(4)} = 0,8413 ;$$

$$P(8000) = \frac{F\left(\frac{8000 - 8000}{2000}\right)}{F(4)} = \frac{F(0)}{F(4)} = 0,5 ;$$

$$P(10000) = \frac{F\left(\frac{8000 - 10000}{2000}\right)}{F(4)} = \frac{F(-1)}{F(4)} = \frac{1 - F(1)}{F(4)} = 0,1587 .$$

График  $P(t)$ , построенный по полученным данным, показан на рис. 2.6.

2. Определим частоту отказа:

$$a(t) = \frac{1}{F(T_1/\sigma)\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(t-T_1)^2/2\sigma^2}.$$

Вычисления удобно производить, используя табл. П.3. функции

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}. \text{ В нашем случае } x = \frac{t - T_1}{\sigma}.$$

Имея в виду, что  $F(T_1/\sigma) = F(8000/2000) = F(4) \approx 1$ ,

найдем  $a(t) = \varphi(x)/\sigma$ . Тогда:

$$a(4000) = \frac{\varphi\left(\frac{4000 - T_1}{\sigma}\right)}{\sigma} = \frac{\varphi\left(\frac{4000 - 8000}{2000}\right)}{2000} = \frac{\varphi(-2)}{2000} = \frac{\varphi(2)}{2000} = \frac{0,05399}{2000} = 2,7 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$a(6000) = \frac{\varphi\left(\frac{6000 - 8000}{2000}\right)}{2000} = \frac{\varphi(-1)}{2000} = \frac{\varphi(1)}{2000} = \frac{0,2420}{2000} = 12,1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$a(8000) = \frac{\varphi\left(\frac{8000 - 8000}{2000}\right)}{2000} = \frac{\varphi(0)}{2000} = \frac{0,3989}{2000} = 20 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$a(10000) = \frac{\varphi\left(\frac{10000 - 8000}{2000}\right)}{2000} = \frac{\varphi(1)}{2000} = 12,1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}}.$$

График  $a(t)$  построенный по полученным данным, показан на рис. 2.7.

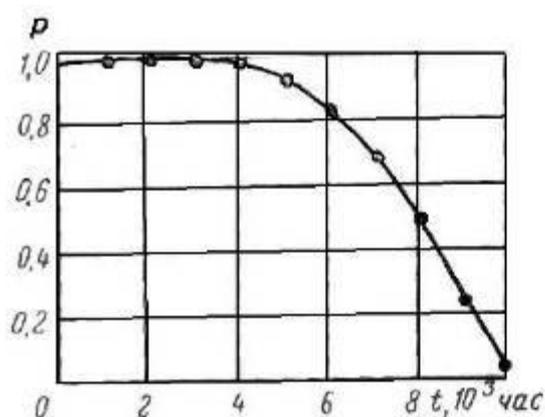


Рис. 2.6. Зависимость  $P$  от  $t$   
(к примеру 2.12)

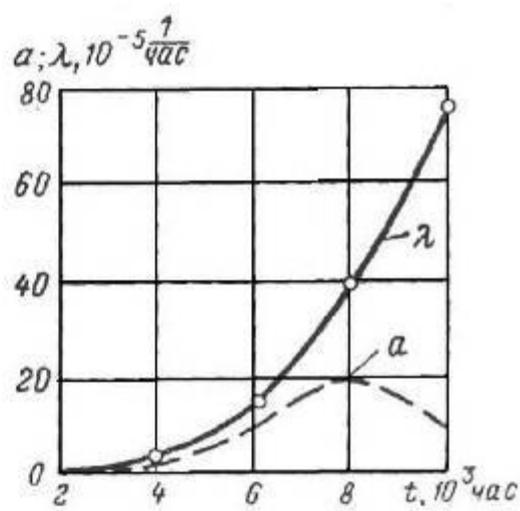


Рис. 2.7. Зависимость  $a$  и  $\lambda$  от  $t$   
(к примеру 2.12)

3. Рассчитаем интенсивность отказов  $\lambda(t)$ .

Подставляя найденные значения  $a(t)$  и  $P(t)$  в выражение  $\lambda(t) = a(t)/P(t)$ , определяем:

$$\lambda(4000) = \frac{a(4000)}{P(4000)} = \frac{2,7 \cdot 10^{-5}}{0,97725} = 2,76 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$\lambda(6000) = \frac{a(6000)}{P(6000)} = \frac{12,1 \cdot 10^{-5}}{0,8413} = 14,4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$\lambda(8000) = \frac{a(8000)}{P(8000)} = \frac{20 \cdot 10^{-5}}{0,5} = 40 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}};$$

$$\lambda(10000) = \frac{a(10000)}{P(10000)} = \frac{12,1 \cdot 10^{-5}}{0,1587} = 76,4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}}.$$

График  $\lambda(t)$ , построенный по полученным данным, приведён на рис.

2.7.

4. Вычислим среднюю наработку до первого отказа:

$$T_{cp} = T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} e^{-T_1^2/2\sigma^2} = 8000 + \frac{2000}{\sqrt{2\pi} F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{8000}{2000}\right)^2} = 8000 +$$

$$+ \frac{2000}{F(4) \sqrt{2\pi}} e^{-8} = 8000,26 \text{ час.}$$

Из графиков и найденных результатов видно, что в данном случае усечённый нормальный закон распределения близок к нормальному.

**Пример 2.13.** Пусть время работы до отказа подчинено усечённому нормальному закону распределения с параметрами  $T_1=8000$  час и  $\sigma=1000, 2000, 3000, 4000$  час. Требуется вычислить количественные характеристики надёжности  $P(t), a(t), \lambda(t), T_{cp}$  для  $t=4000, 6000, 8000, 10000$  час.

**Решение.** Используя формулы табл. 2.1 и порядок решения, приведенный в примере 2.12, сведем найденные данные в табл. 2.5.

Графики  $P(t)$ , построенные по полученным данным, приведены на рис. 2.8, а графики  $a(t)$  и  $\lambda(t)$ —на рис. 2.9.

Из рисунков и данных таблицы можно сделать следующие выводы:

— надёжность изделия до  $t = T_1=8000$  час тем выше, чем меньше  $\sigma_1$ .

— интенсивность отказов растёт тем быстрее, чем меньше  $\sigma_1$ , что свидетельствует о более интенсивном старении элементов;

Таблица 2.5.

Вычисленные значения  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$  и  $T_{\text{ср}}$

(к примеру 2.13)

Количественные характеристики	$\sigma$ , час	$t$ , час			
		4000	6000	8000	10000
$P(t)$	1000	1	0,977	0,5	0,023
	2000	0,977	0,841	0,5	0,159
	3000	0,908	0,749	0,5	0,251
	4000	0,857	0,705	0,52	0,317
$a(t)$ , $10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$	1000	0,013	5,1	39,89	5,4
	2000	2,7	12,1	20	12,1
	3000	5,5	10,7	13,3	10,7
	4000	6,5	8,8	10	8,8
$\lambda(t)$ , $10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$	1000	0,013	6,24	79,78	235
	2000	2,76	14,1	40	76
	3000	6,05	14,3	26,6	42,8
	4000	7,6	12,5	19,2	28,7
$T_{\text{ср с}}$ , час	1000	8000			
	2000	8000,26			
	3000	8035			
	4000	8220			

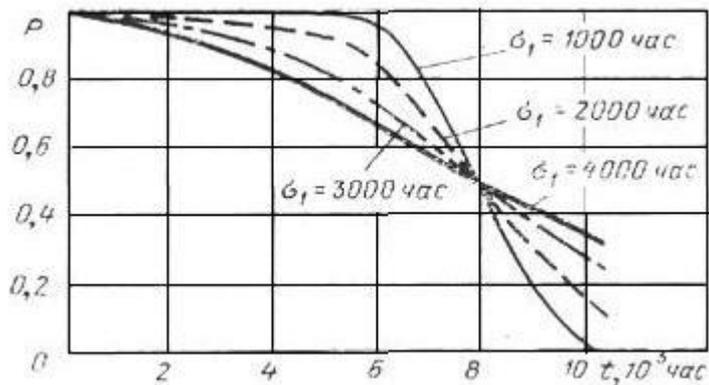


Рис. 2.8. Зависимость  $P$  от  $t$  (к примеру 2.13).

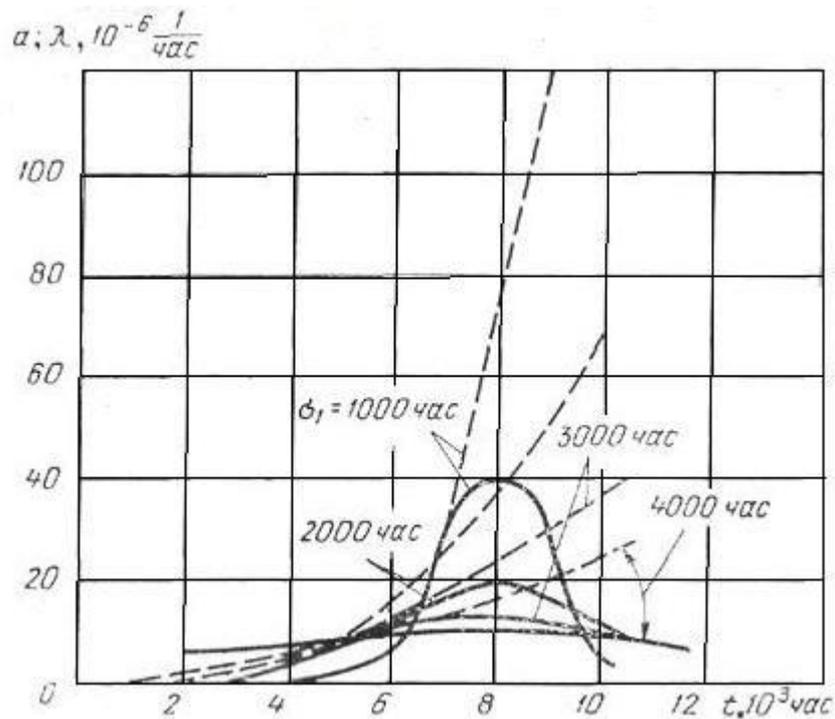


Рис. 2.9. Зависимость  $a$  и  $\lambda$  от  $t$  (к примеру 2.13).

—параметры  $T_1$ ,  $\sigma$  усеченного нормального распределения не являются соответственно средней наработкой до первого отказа и дисперсией подобно случаю нормального закона распределения.

**Пример 2.14.** Время работы изделия до отказа (например, некоторых электровакуумных приборов) подчиняется закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_{cp}$  для  $t = 500, 1000, 2000$  час, если параметр распределения  $\sigma = 1000$  час.

**Решение.** Воспользуемся формулами, приведенными в табл. 2.1. Для  $t = 500$  час:

$$P(500) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{500^2}{2 \cdot 1000^2}} = e^{-0,125} = 0,88;$$

$$a(500) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} = \frac{500}{1000^2} e^{-\frac{500^2}{2 \cdot 1000^2}} = 0,44 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}};$$

$$\lambda(500) = \frac{t}{\sigma^2} = \frac{500}{1000^2} = 0,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}};$$

$$T_{cp} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot 1000 = 1253 \text{ час.}$$

Для  $t = 1000$  час:

$$P(1000) = e^{-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}} = e^{-0,5} = 0,606 ;$$

$$a(1000) = \frac{1000}{1000^2} e^{-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}} = 0,606 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}} ;$$

$$\lambda(100) = \frac{1000}{1000^2} = 10^{-3} \frac{1}{\text{час}} .$$

Для  $t = 2000$  час:

$$P(2000) = e^{-\frac{2000^2}{2 \cdot 1000^2}} = e^{-2} = 0,1353 ;$$

$$a(2000) = \frac{2000}{1000^2} e^{-\frac{2000^2}{2 \cdot 1000^2}} = 0,27 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}} ;$$

$$\lambda(2000) = \frac{2000}{1000^2} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}} .$$

Из примера видно, что данные электровакуумные приборы имеют низкую надежность и практически могут работать в течение времени  $t < 500$  час.

**Пример 2.15.** Время безотказной работы элементов подчинено экспоненциальному закону с  $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$  1/час, а время работы изделия  $t = 20000$  час. Требуется вычислить Количественные характеристики надежности резервированного изделия при общем ненагруженном резервировании замещением с кратностью  $m = 3$ .

**Решение.** Вычислим количественные характеристики надежности по формулам, приведенным в табл.2.1. В нашем случае  $\lambda_0 = \lambda = 3 \cdot 10^{-5}$  1/час,  $k = m + 1 = 4$ . Тогда вероятность безотказной работы будет

$$P(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^3 \frac{(\lambda t)^i}{i!}$$

Найдём в начале значение  $\lambda t$ :

$$\lambda t = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^4 = 0,6.$$

Подставляя это значение в выражение для  $P(t)$ , находим

$$P(20000) = e^{-0,6} \left( 1 + 0,6 + \frac{(0,6)^2}{2!} + \frac{(0,6)^3}{3!} \right) = 0,908 .$$

Частота отказов будет

$$a(t) = \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 t} = \lambda \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} .$$

Подставляя численные значения в  $a(t)$ , находим

$$a(20000) = 3 \cdot 10^{-5} \frac{0,6^3}{3!} e^{-0,6} = 5,4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}} .$$

Вычислим интенсивность отказов:

$$\lambda(20000) = \frac{a(20000)}{P(20000)} = \frac{0,54 \cdot 10^{-6}}{0,908} = 6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}} .$$

Средняя наработка до первого отказа изделия будет

$$T_{cp} = \frac{k}{\lambda_0} = \frac{m+1}{\lambda} = \frac{4}{3 \cdot 10^{-5}} \approx 133000 \text{ час} .$$

**Пример 2.16.** Время безотказной работы гироскопического устройства с шарикоподшипниками в осях ротора гироскопа подчиняется закону Вейбулла с параметрами  $k=1,5$ ,  $\lambda_0=10^{-4}$  1/час, а время его работы  $t=100$  час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности такого устройства.

**Решение.** Определим вероятность безотказной работы по формуле (см. табл. 2.1.)

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t^k} .$$

Подставляя значения  $\lambda_0$ ,  $t$  и  $k$  из условий задачи, получим

$$P(100) = e^{-10^{-4} \cdot 100^{1,5}} = 0,9 .$$

Частота отказов определяется по формуле

$$a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k} .$$

Тогда

$$a(100) = 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 100^{0,5} \cdot 0,9 = 1,35 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}},$$

$$\lambda(100) = \frac{a(100)}{P(100)} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}.$$

Вычислим среднюю наработку до первого отказа по формуле

$$T_{cp} = \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) / \lambda_0^{1/k}.$$

Вначале вычислим значение гамма-функции, воспользовавшись табл.

П.4.

В нашем случае  $x = (1/k) + 1 = (1/1,5) + 1 \approx 1,67$ , тогда  $\Gamma(x) = 0,9033$ . Подставляя в выражение для  $T_{cp}$  значение гамма-функции и параметры распределения  $\lambda$  и  $k$ , получим

$$T_{cp} = 0,9033 / (10^{-4})^{1/1,5} \approx 418 \text{ час.}$$

**Пример 2.17.** Допустим, что в результате анализа данных об отказах аппаратуры частота отказов получена в виде

$$a(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}.$$

Требуется определить все количественные характеристики надежности.

**Решение . 1 .** Определим вероятность безотказной работы. На основании формулы (2.5) имеем

$$\begin{aligned} P(t) &= 1 - \int_0^t a(t) dt = 1 - \left[ \int_0^t c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^t c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt \right] = 1 - \left[ -c_1 e^{-\lambda_1 t} \Big|_0^t - c_2 e^{-\lambda_2 t} \Big|_0^t \right] = \\ &= 1 - \left[ -c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_1 - c_2 e^{-\lambda_2 t} + c_2 \right] = 1 - (c_1 + c_2) + c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}. \end{aligned}$$

Вычислим сумму  $c_1 + c_2$ . Так как  $\int_0^{\infty} a(t) dt = 1$ , то

$$\int_0^{\infty} c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^{\infty} c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt = c_1 + c_2 = 1$$

Тогда

$$P(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}.$$

2. Найдём зависимость интенсивности отказов от времени по формуле (2.7):

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}.$$

3. Определим среднюю наработку до первого отказа. На основании формулы (2.10) будем иметь

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = c_1 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + c_2 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}.$$

4. Вычислим зависимость параметра потока отказов от времени. Воспользуемся формулой (2.15), для чего найдём преобразование Лапласа частоты отказов  $a(t)$ :

$$a(s) = \int_0^{\infty} a(t) e^{-st} dt = \int_0^{\infty} c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} e^{-st} dt + \int_0^{\infty} c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} e^{-st} dt = \frac{c_1 \lambda_1}{\lambda_1 + s} + \frac{c_2 \lambda_2}{\lambda_2 + s}$$

Подставляя полученное значение в формулу (2.15), находим

$$\omega(s) = \frac{a(s)}{1 - a(s)} = \frac{s(c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2) + \lambda_1 \lambda_1}{s[s + \lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)]} = \frac{c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2}{s + \lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{s[s + \lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)]}.$$

Для отыскания  $\omega(t)$  найдём обратное преобразование Лапласа функции  $\omega(s)$ .

Корнями знаменателей будут

$$s_1 = 0, s_2 = -\lambda_1(1 - c_1) - \lambda_2(1 - c_2)$$

Тогда

$$\omega(t) = (c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2) e^{-[\lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)]t} + \lambda_1 \lambda_2 \left[ \frac{1}{\lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)} - \frac{e^{-[\lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)]t}}{\lambda_1(1 - c_1) + \lambda_2(1 - c_2)} \right]$$

После преобразований окончательно получим

$$\omega(t) = \frac{1}{\lambda_1 c_2 + \lambda_2 c_1} \left[ \lambda_1 \lambda_2 + c_1 c_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2 e^{-(\lambda_1 c_2 + \lambda_2 c_1)t} \right]$$

**Пример 2.18.** В результате эксплуатации  $N=100$  восстанавливаемых изделий получены статистические данные об отказах, сведённые в табл. 2.6.

Таблица 2.6.

$n$	46	40	36	32	30	28	26	24	24	22	22	20	20	20
$\Delta t, 10^3 \text{ час}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$\bar{\omega}, 10^{-5} \cdot 1 \text{ час}$	23	20	18	16	15	14	13	12	12	11	11	10	10	10

Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа изделия  $T_{cp}$  вероятность безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$ .

**Решение . 1 .** В нашем случае эксплуатируются изделия восстанавливаемые, поэтому они работают в режиме смены отказавших элементов. Основной характеристикой таких изделий при условии мгновенного ремонта является параметр потока отказов. Значения  $\bar{\omega}(t)$ , вычисленные по формуле (2.13) и данным об отказах, полученным из эксплуатации, приведены в табл. 2.6, а гистограмма — на рис. 2.10.

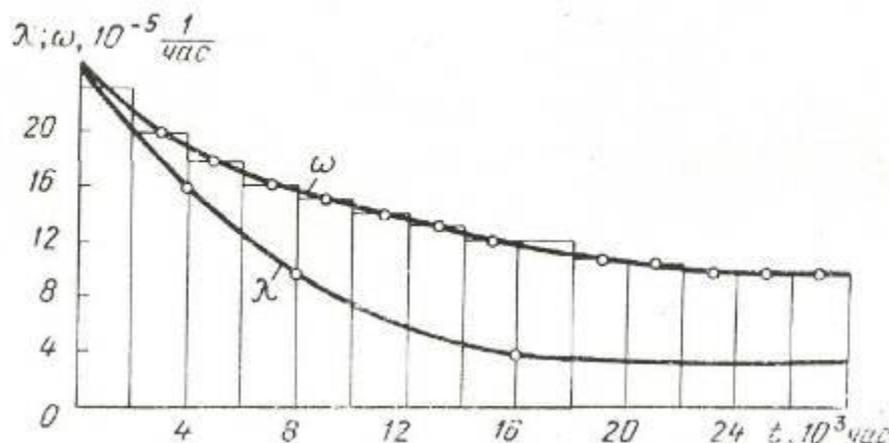


Рис. 2.10. Гистограмма  $\omega(t)$  (к примеру 2.18).

2. Аппроксимируем кривую  $\omega(t)$ , полученную в результате сглаживания гистограммы рис. 2.10, уравнением

$$\omega(t) = a + be^{-kt}$$

Найдем значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $k$ :

$$\omega(0) = a + b = 25 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час при } t=0,$$

$$\omega(\infty) = a = 10^{-4} \text{ 1/час при } t \rightarrow \infty,$$

$$\text{тогда } b = \omega(0) - a = 25 \cdot 10^{-5} - 10^{-4} = 15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

Определить коэффициент  $k$  можно по любой точке гистограммы. Выберем значение  $\omega$  при  $t=9000$  час; по кривой  $\omega(9000) = 1,5 \cdot 10^{-4}$  1/час. Тогда

$$1,5 \cdot 10^{-4} = a + b e^{-k \cdot 9000} = 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4} e^{-k \cdot 9000}.$$

Из этого равенства путем очевидных вычислений получим  $k \approx 1,22 \cdot 10^{-4}$  1/час.

Таким образом, параметр потока отказов можно аппроксимировать уравнением

$$\omega(t) = 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4} e^{-1,22 \cdot 10^{-4} t}$$

3. Вычислим среднюю наработку до первого отказа изделия. Наиболее просто ее найти, используя следующее свойство функции  $\omega(t)$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 1/T_{cp}$$

В нашем случае  $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = a = 10^{-4}$  1/час.

Тогда  $T_{cp} = 1/a = 10000$  час.

4. Найдем вероятность безотказной работы как функцию времени.

Чтобы рассчитать  $P(t)$  или любую другую характеристику надежности, необходимо вначале найти по известной  $\omega(t)$  частоту отказов  $a(t)$ . Наиболее удобно здесь воспользоваться выражениями (2.15):

$$\omega(s) = \int_0^{\infty} \omega(t) e^{-st} dt = \frac{10^{-4}}{s} + \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{s + 1,22 \cdot 10^{-4}}.$$

Тогда

$$a(s) = \frac{\omega(s)}{1 + \omega(s)} = \frac{10^{-5}}{s + 0,36 \cdot 10^{-4}} + \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{s + 3,36 \cdot 10^{-4}}.$$

Обратное преобразование Лапласа

$$a(t) = 10^{-5} e^{-0,36 \cdot 10^{-4} t} + 2,4 \cdot 10^{-4} e^{-3,36 \cdot 10^{-4} t}.$$

Вероятность безотказной работы изделия будет

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt = 1 - 10^{-5} \int_0^t e^{-0,36 \cdot 10^{-4} t} dt - 2,4 \cdot 10^{-4} \int_0^t e^{-3,36 \cdot 10^{-4} t} dt = 0,28 e^{-0,36 \cdot 10^{-4} t} +$$

$$+ 0,72 e^{-3,36 \cdot 10^{-4} t}.$$

5. Интенсивность отказов легко находится при известных  $P(t)$  и  $a(t)$  по формуле (2.7):

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{10^{-5} e^{-0,36 \cdot 10^{-4} t} + 2,4 \cdot 10^{-3,36 \cdot 10^{-4} t}}{0,28 e^{-0,36 \cdot 10^{-4} t} + 072 e^{-3,36 \cdot 10^{-4} t}},$$

Зависимость  $\lambda(t)$  приведена на рис. 2.10. Как видно из рисунка,  $\omega(t)$  и  $\lambda(t)$  не совпадают, а интенсивность отказов на нормальном участке работы изделия, когда приработка закончена, равна  $0,36 \cdot 10^{-4}$  1/час.

**Пример 2.19.** Известно, что интенсивность отказов  $\lambda = 0,02$  1/час, а среднее время восстановления  $t_B = 10$  час. Требуется вычислить функцию и коэффициент готовности изделия.

**Решение.** В нашем случае средняя наработка до первого отказа  $T_{cp} = 1/\lambda = 1/0,02 = 50$  час. Тогда коэффициент готовности будет

$$K_G = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + t_B} = \frac{50}{50 + 10} = 0,83.$$

Функцию готовности легко вычислить по формуле (2.27)6

$$K_G(t) = K_G + (1 - K_G) e^{-t/K_G t_B} = 0,83 + (1 - 0,83) e^{-t/0,83 \cdot 10} = 0,83 + 0,17 e^{-0,12 t}.$$

### 2.1.5. Задачи для самостоятельного решения.

В настоящем параграфе приведены задачи по расчету количественных характеристик надежности, предлагаемые для самостоятельного решения. Эти задачи легко решить, используя типовые примеры, приведенные в предыдущем параграфе.

**2.1.** Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп типа 6Ж4. За первые 3000 час отказало 80 ламп. За интервал времени 3000—4000 час отказало еще 50 ламп. Требуется

определить частоту и интенсивность отказов ламп в промежутке времени 3000—4000 час.

О т в е т:  $\bar{a}(3500) = 5 \cdot 10^{-5}$  1/час;  $\bar{\lambda}(3500) \approx 5,6 \cdot 10^{-5}$  1/час.

**2.2.** Используя данные задачи 1.1, определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа электронных ламп за первые 3000 час.

О т в е т:  $\bar{P}(3000) = 0,92$ ;  $\bar{Q}(3000) = 0,08$ .

**2.3.** Используя данные задачи 1.1, найти вероятность безотказной работы и вероятность отказа электронных ламп за время 4000 час.

О т в е т:  $\bar{P}(4000) = 0,87$ ;  $\bar{Q}(4000) = 0,13$ .

**2.4.** На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час отказало 50 изделий. За интервал времени 4000—4100 час отказало еще 20 изделий. Требуется определить частоту и интенсивность отказов изделий в промежутке времени 4000—4100 час.

О т в е т:  $\bar{a}(4050) = 2 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $\bar{\lambda}(4050) = 5 \cdot 10^{-3}$  1/час.

**2.5.** Используя данные задачи 1.4, определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа изделия за первые 4000 час.

О т в е т:  $\bar{P}(4000) = 0,5$ ;  $\bar{Q}(4000) = 0,5$ .

**2.6.** Используя данные задачи 1.4, вычислить вероятность безотказной работы и вероятность отказа изделий за время 4100 час.

О т в е т:  $\bar{P}(4100) = 0,3$ ;  $\bar{Q}(4100) = 0,7$ .

**2.7.** В течение 1000 час из 10 гироскопов отказало 2. За интервал времени 1000—1100 час отказал еще один гироскоп. Требуется найти частоту и интенсивность отказов гироскопов в промежутке времени 1000—1100 час.

О т в е т:  $\bar{a}(1050) = 10^{-3}$  1/час;  $\bar{\lambda}(1050) = 1,3 \cdot 10^{-3}$  1/час.

**2.8.** На испытание поставлено 400 резисторов. За время наработки 10000 час отказало 4 резистора. За последующие 1000 час.

отказал еще 1 резистор. Определить частоту и интенсивность отказов резисторов в промежутке времени 10000—11000 час.

О т в е т:  $\bar{a}(10500) = 0,25 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}$ ;  $\bar{\lambda}(10500) = 0,253 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}$ .

**2.9.** Используя данные задачи 2.8, найти вероятность безотказной работы и вероятность отказа резисторов за время 10000 час.

О т в е т:  $\bar{P}(10000) = 0,99$ ;  $\bar{Q}(10000) = 0,01$ .

**2.10—2.100.** На испытание поставлено  $N_0$  изделия. За время  $t$  час вышло из строя  $n(t)$  штук изделий. За последующий интервал времени  $\Delta t$  вышло из строя  $n(\Delta t)$  изделий. Необходимо вычислить вероятность безотказной работы за время  $t$  и  $t + \Delta t$ , частоту отказов и интенсивность отказов на интервале  $\Delta t$ .

Исходные данные для решения задачи и ответы приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7.

Задачи 2.10 – 2.100

Номер Задачи	Исходные данные					Ответы			
	$N_0$	$t$ , час	$\Delta t$ , час	$n(t)$	$n(\Delta t)$	$\bar{P}(t)$	$\bar{P}(t + \Delta t)$	$\bar{a}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$ , 1/час	$\bar{\lambda}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$ , 1/час
2.10	400	3000	100	200	100	0,5	0,25	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$
2.11	1000	3000	1000	80	50	0,92	0,87	$5 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$
2.13	100	8000	100	50	10	0,5	0,4	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$
2.14	10	1000	100	3	2	0,7	0,5	$2 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$
2.15	10	1000	100	3	1	0,7	0,6	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$
2.16	1000	0	1000	0	20	1,0	0,98	$0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,202 \cdot 10^{-4}$
2.17	1000	1000	1000	20	25	0,98	0,955	$0,25 \cdot 10^{-1}$	$0,258 \cdot 10^{-4}$
2.18	1000	2000	1000	45	35	0,955	0,92	$0,35 \cdot 10^{-1}$	$3,73 \cdot 10^{-4}$
2.19	1000	0	100	0	50	1,0	0,95	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,514 \cdot 10^{-3}$
2.20	45	75	5	44	1	0,022	0	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$1200 \cdot 10^{-3}$
2.21	45	0	10	0	19	1,0	0,578	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$5,07 \cdot 10^{-2}$
2.22	1000	5000	1000	160	50	0,84	0,79	$5 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$
2.23	1000	4000	1000	130	30	0,87	0,84	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
2.24	1000	100	100	50	40	0,95	0,91	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$
2.25	1000	200	100	90	32	0,91	0,878	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
2.26	45	10	10	19	13	0,578	0,289	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$
2.27	45	60	10	44	1	0,022	0	$0,22 \cdot 10^{-2}$	$20 \cdot 10^{-2}$
2.28	45	5	5	1	5	0,978	0,867	$22 \cdot 10^{-3}$	$24 \cdot 10^{-3}$
2.29	1000	200	100	122	25	0,878	0,853	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
2.30	1000	2900	100	535	40	0,465	0,425	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$
2.31	1000	2000	100	380	12	0,62	0,608	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
2.32	1000	1500	100	315	13	0,685	0,672	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$
2.33	1000	25000	1000	980	20	0,02	0	$2 \cdot 10^{-5}$	$200 \cdot 10^{-5}$

2.34	1000	9000	1000	340	30	0,66	0,63	$3 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
2.35	1000	12000	1000	450	50	0,55	0,5	$5 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$
2.36	1000	6000	1000	210	40	0,79	0,75	$4 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
2.37	1000	23000	1000	925	25	0,075	0,05	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$40 \cdot 10^{-5}$
2.38	1000	16000	1000	630	50	0,37	0,32	$5 \cdot 10^{-5}$	$14,5 \cdot 10^{-5}$
2.39	1000	2800	100	505	30	0,495	0,465	$3 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$
2.40	1000	400	100	147	20	0,853	0,833	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$
2.41	1000	1000	100	245	15	0,755	0,74	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-4}$
2.42	1000	700	100	200	16	0,8	0,784	$16 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$
2.43	1000	2200	100	405	12	0,595	0,583	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
2.44	1000	1700	100	341	13	0,650	0,646	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$
2.45	45	20	10	32	8	0,29	0,11	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
2.46	45	0	5	0	1	1,0	0,978	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
2.47	45	30	5	27	4	0,4	0,31	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
2.48	45	70	5	41	3	0,089	0,022	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
2.49	1000	7000	1000	250	40	0,75	0,71	$4 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
2.50	1000	22000	1000	890	35	0,11	0,075	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$38 \cdot 10^{-5}$
2.51	1000	13000	1000	500	40	0,5	0,46	$4 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
2.52	45	30	10	40	3	0,11	0,044	$6,67 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$
2.53	1000	500	100	167	17	0,833	0,816	$0,17 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$
2.54	1000	1100	100	260	14	0,74	0,726	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
2.55	1000	600	100	184	16	0,816	0,8	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$
2.56	45	50	10	43	1	0,044	0,022	0,002	0,067
2.57	45	10	5	6	8	0,867	0,687	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
2.58	45	35	5	31	3	0,31	0,245	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
2.59	1000	8000	1000	200	50	0,71	0,66	$5 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
2.60	1000	14000	1000	540	50	0,46	0,41	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$
2.61	100	5000	100	10	10	0,9	0,8	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$
2.62	100	4000	200	20	20	0,8	0,6	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,86 \cdot 10^{-4}$
2.63	100	3000	1000	20	20	0,8	0,6	$2 \cdot 10^{-1}$	$0,193 \cdot 10^{-3}$
2.64	1000	800	100	216	15	0,784	0,769	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,225 \cdot 10^{-3}$
2.65	1000	1300	100	417	13	0,583	0,570	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$
2.66	1000	1200	100	274	14	0,726	0,712	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,184 \cdot 10^{-3}$
2.67	1000	900	100	231	14	0,769	0,755	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$
2.68	1000	10000	1000	370	40	0,63	0,59	$4 \cdot 10^{-5}$	$10,3 \cdot 10^{-5}$
2.69	1000	15000	1000	590	40	0,41	0,37	$4 \cdot 10^{-5}$	$37 \cdot 10^{-5}$
2.70	1000	21000	1000	840	50	0,16	0,11	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
2.71	1000	11000	1000	410	40	0,59	0,55	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
2.72	1000	1300	100	288	13	0,712	0,699	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^{-4}$
2.73	1000	1900	100	368	12	0,632	0,62	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$
2.74	1000	2700	100	480	25	0,52	0,495	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
2.75	45	15	5	14	2	0,687	0,643	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$13,3 \cdot 10^{-3}$
2.76	45	45	5	34	1	0,245	0,223	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$19 \cdot 10^{-3}$
2.77	45	60	5	35	3	0,223	0,156	$13,3 \cdot 10^{-3}$	$70,8 \cdot 10^{-3}$
2.78	100	6000	500	50	20	0,5	0,3	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
2.79	100	4000	1000	10	6	0,9	0,84	$6 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
2.80	100	10000	1000	25	5	0,75	0,7	$5 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
2.81	1000	1400	100	301	14	0,699	0,685	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
2.82	1000	2400	100	430	14	0,57	0,556	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$
2.83	1000	17000	1000	680	40	0,32	0,28	$4 \cdot 10^{-5}$	$13,3 \cdot 10^{-5}$
2.84	10	3000	25	4	2	0,6	0,4	$8 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$
2.85	20	8000	100	4	4	0,8	0,6	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,86 \cdot 10^{-3}$

2.86	10000	5000	1000	18	2	0,9982	0,998	$2 \cdot 10^{-7}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
2.87	60	3000	100	15	5	0,75	0,667	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$
2.88	1000	20000	1000	805	35	0,195	0,16	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$19,7 \cdot 10^{-3}$
2.89	1000	1800	100	354	14	0,646	0,632	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-3}$
2.90	1000	2600	100	460	20	0,54	0,52	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-3}$
2.91	1000	19000	1000	770	35	0,23	0,195	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$16,4 \cdot 10^{-3}$
2.92	100	1000	10	10	10	0,9	0,8	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$
2.93	100	100	100	1	1	0,99	0,98	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,015 \cdot 10^{-4}$
2.94	10	100	100	1	1	0,9	0,8	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$
2.95	10	1000	100	6	2	0,4	0,2	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,67 \cdot 10^{-3}$
2.96	1000	1600	100	328	13	0,672	0,659	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$0,195 \cdot 10^{-3}$
2.97	1000	2500	100	444	16	0,556	0,540	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$
2.98	1000	18000	1000	720	50	0,28	0,23	$5 \cdot 10^{-5}$	$19,6 \cdot 10^{-5}$
2.99	5	1000	100	1	2	0,8	0,4	$4 \cdot 10^{-3}$	$6,67 \cdot 10^{-3}$
2.100	20	1000	100	16	2	0,2	0,1	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,67 \cdot 10^{-3}$
	1000	2100	100	392	13	0,608	0,595	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-4}$

**2.101.** Допустим, что на испытании находилось 1000 однотипных ламп 6Ж4. Число отказавших ламп учитывалось через каждые 1000 час работы. Данные об отказах ламп сведены в табл. 2.8. Требуется определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции времени, построить графики этих функций. Необходимо также найти среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  см. табл. 2.9 и рис. 2.11 и 2.12;  $T_{cp} = 12895$  час .

Таблица 2.8.

Данные об отказах к задаче 2.101

$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$
0-1000	20	9000-10000	30	18000-19000	50
1000-2000	25	10000-11000	40	19000-20000	35
2000-3000	35	11000-12000	40	20000-21000	35
3000-4000	50	12000-13000	50	21000-22000	50
4000-5000	30	13000-14000	40	22000-23000	35
5000-6000	50	14000-15000	50	23000-24000	25
6000-7000	40	15000-16000	40	24000-25000	30
7000-8000	40	16000-17000	50	25000-26000	20
8000-9000	50	17000-18000	40	-	-

Таблица 2.9.

Вычисленные значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  к задаче 2.101

$\Delta t_i$ , час	$\bar{P}(t)$	$\bar{a}(t)$ , $10^{-5} 1 / \text{час}$	$\bar{\lambda}(t)$ , $10^{-5} 1 / \text{час}$
0-1000	0,98	2,0	2,02
1000-2000	0,955	2,5	2,58
2000-3000	0,92	3,5	3,73
3000-4000	0,87	5,0	5,6
4000-5000	0,84	3,0	3,5
5000-6000	0,79	5,0	6,15
6000-7000	0,75	4,0	32
7000-8000	0,71	4,0	5,5
8000-9000	0,66	5,0	7,3
9000-10000	0,63	3,0	4,65
10000-11000	0,59	4,0	6,55
11000-12000	0,55	4,0	7
12000-13000	0,50	5,0	9,5
13000-14000	0,46	4,0	8,3
14000-15000	0,41	5,0	11,5
15000-16000	0,37	4,0	10,25
16000-17000	0,32	5,0	14,5
17000-18000	0,28	4,0	13,3
18000-19000	0,23	5,0	19,6
19000-20000	0,195	3,5	16,4
20000-21000	0,16	3,5	19,7
21000-22000	0,11	5,0	37
22000-23000	0,075	3,5	38
23000-24000	0,05	2,5	40
24000-25000	0,02	3,0	85,7
25000-26000	0,00	2,0	200

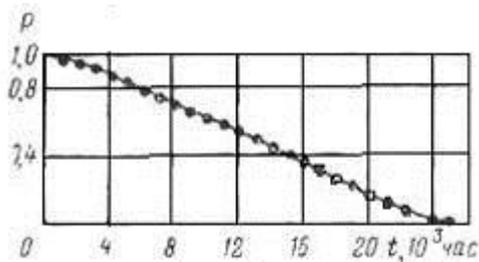


Рис 2.11 Зависимость  $P$  от  $t$  (к задаче 2.101)

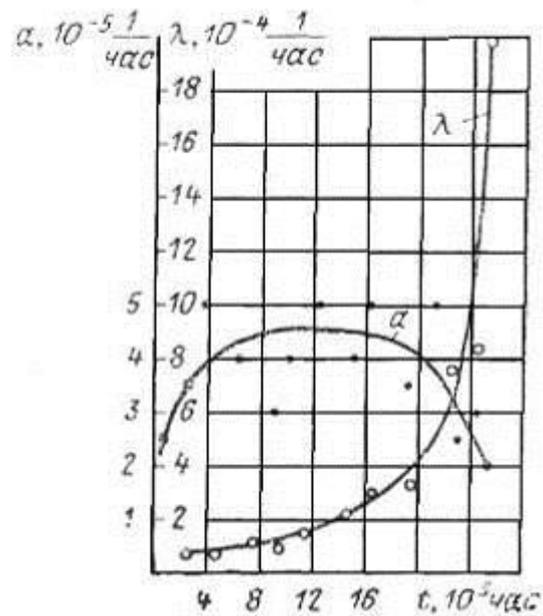


Рис 2.12. Зависимость  $\alpha$  и  $\lambda$  от  $t$  (к задаче 2.101)

**2.102.** В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенных в табл. 2.10. Требуется определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа  $T_{cp}$ .

Ответ:  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  см. табл.2.11 и рис.2.13 и 2.14;

Таблица 2.10

Исходные данные к задаче 2.102

$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$
0-5	1	30-35	4	60-65	3
5-10	5	35-40	3	65-70	3
10-15	8	40-45	0	70-75	3
15-20	2	45-50	1	75-80	1
20-25	5	50-55	0	-	-
25-30	6	55-60	0	-	-

Вычисленные значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  к задаче 2.102

$\Delta t_i$ , час	$\bar{P}(t)$	$\bar{a}(t)$ , $10^{-3} 1/\text{час}$	$\bar{\lambda}(t)$ , $10^{-3} 1/\text{час}$
0-5	0,978	4,44	4,5
5-10	0,867	22,2	24,1
10-15	0,687	35,5	45,7
15-20	0,643	8,9	13,3
20-25	0,531	22,2	37,7
25-30	0,4	26,6	57,1
30-35	0,311	17,8	50
35-40	0,245	13,3	48
40-45	0,245	0	0
45-50	0,223	4,44	19
50-55	0,223	0	0
55-60	0,223	0	0
60-65	0,156	13,3	70,8
65-70	0,089	13,3	109,1
70-75	0,022	13,3	240
75-80	0	4,44	1200

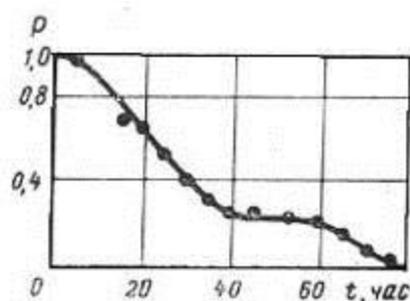
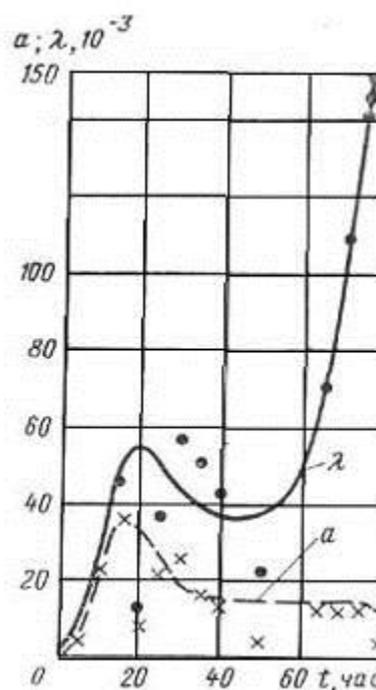


Рис 2.13. Зависимость P от t (к задаче 2.102)

Рис. 2.14. Зависимость a и  $\lambda$  от t (к задаче 2.102)

**2.103.** В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 80-часовую приработку,

получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведённые в таблице 2.12. Необходимо найти вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  см. табл. 2.13 и рис. 2.15 и 2.16;  $T_{cp} = 15,9$  час.

Таблица 2.12

Исходные данные к задаче 1.103

$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i$ , час	$n(\Delta t_i)$
0-10	19	30-40	3	60-70	1
10-20	13	40-50	0	-	-
20-30	8	50-60	1	-	-

Таблица.2.13

Вычисленные значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  к задаче 2.103

$\Delta t_i$ , час	$\bar{P}(t)$	$\bar{a}(t)$ , $10^{-2}$ 1/час	$\bar{\lambda}(t)$ , $10^{-2}$ 1/час
0-10	0,578	4,22	5,07
10-20	0,289	2,89	6,67
20-30	0,111	1,78	8,89
30-40	0,044	0,667	5,71
40-50	0,044	0	0
50-60	0,022	0,222	6,67
60-70	0	0,222	20,0

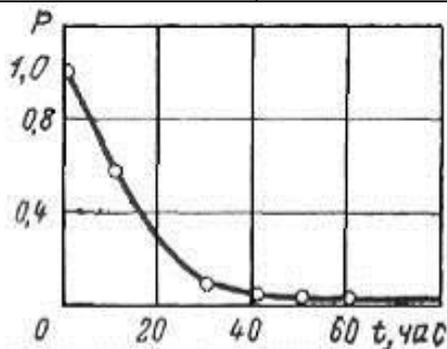


Рис. 2.15 Зависимость  $P$  от  $t$  (к задаче 2.103 )

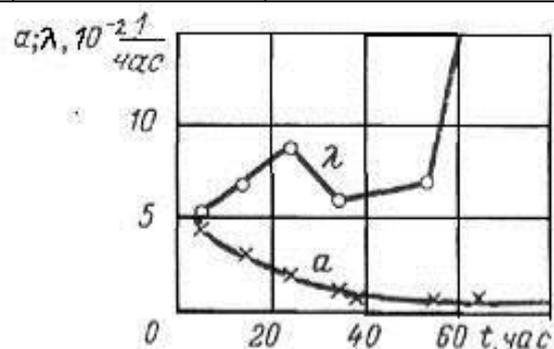


Рис 2.16. Зависимость  $a$  и  $\lambda$  от  $t$  (к задаче 2.103 )

**2.104.** На испытание поставлено  $N=1000$  элементов. Число отказов фиксировалось в каждом интервале времени испытаний  $\Delta t=500$  час. Данные об отказах сведены в табл.2.14. Требуется определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции

времени, построить графики этих функций и найти среднюю наработку до первого отказа элементов.

О т в е т:  $\bar{P}(t), \bar{a}(t), \bar{\lambda}(t)$  см. табл.2.15. и рис. 2.17, 2.18;

$$\bar{T}_{cp} = 3562,5 \text{ час.}$$

Таблица.2.14

Исходные данные к задаче 2.104

$\Delta t_i, \text{ час}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ час}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ час}$	$n(\Delta t_i)$
0-500	145	3000-3500	51	6000-6500	60
500-1000	86	3500-4000	45	6500-7000	75
1000-1500	77	4000-4500	41	7000-7500	62
1500-2000	69	4500-5000	37	7500-8000	42
2000-2500	62	5000-5500	33	8000-8500	16
2500-3000	56	5500-6000	35	-	-

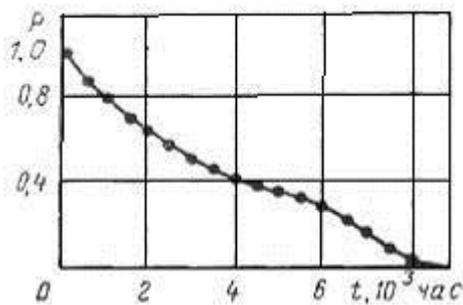


Рис. 2.17. Зависимость P от t (к задаче 2.104)

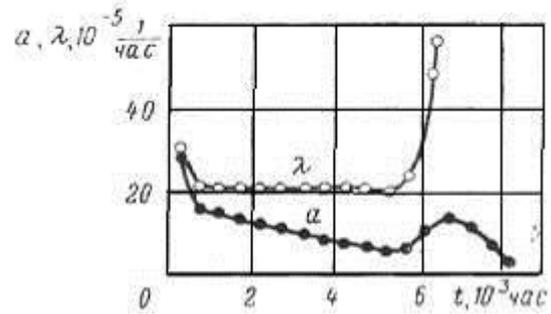


Рис. 2.18. Зависимость a и  $\lambda$  от t (к задаче 2.104)

Таблица 2.15

Вычисленные значения  $\bar{P}(t), \bar{a}(t), \bar{\lambda}(t)$  к задаче 2.104

$\Delta t_i, \text{ час}$	$\bar{P}(t)^*$	$\bar{a}(t),$ $10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$	$\bar{\lambda}(t),$ $10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$	$\Delta t_i, \text{ час}$	$\bar{P}(t)^*$	$\bar{a}(t),$ $10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$	$\bar{\lambda}(t),$ $10^{-5} \frac{1}{\text{час}}$
0-500	0,855	29	31,3	4500-5000	0,331	7,4	21,2
500-1000	0,769	17,2	21,2	5000-5500	0,298	6,6	21
1000-1500	0,692	15,4	21,1	5500-6000	0,263	7,0	25
1500-2000	0,623	13,8	21	6000-6500	0,203	12,0	51,5
2000-2500	0,561	12,4	21	6500-7000	0,128	15,0	90,7
2500-3000	0,505	11,2	21	7000-7500	0,066	12,4	127,8

3000-3500	0,454	10,2	21,3	7500-8000	0,024	8,4	186,7
3500-4000	0,409	9,0	20,9	8000-8500	0,008	3,2	200
4000-4500	0,368	8,2	21,1	-	-	-	-

\*)  $t$  – конец интервала

**2.105.** Имеются статистические данные об отказах трёх групп одинаковых изделий, приведённые в табл. 2.16. В каждой группе было по 100 изделий и их испытания проводились по 1 группе 550 час, по 2 группе 400 час и по 3 группе 200 час. Необходимо вычислить количественные характеристики  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  и построить графики этих функций.

О т в е т:  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  см. табл. 2.17 и рис. 2.19 и 2.20.

Таблица 2.16

Исходные данные к задаче 2.105

$\Delta t_i$ , час	1 группа $n(\Delta t_i)$	2 группа $n(\Delta t_i)$	3 группа $n(\Delta t_i)$	$\Sigma n(\Delta t_i)$
0-25	4	6	5	15
25-50	8	9	8	25
50-75	6	5	7	18
75-100	3	4	5	12
100-150	5	5	6	16
150-200	4	3	3	10
200-250	1	3	-	4
250-300	2	2	-	4
300-400	3	4	-	7
400-550	5	-	-	5

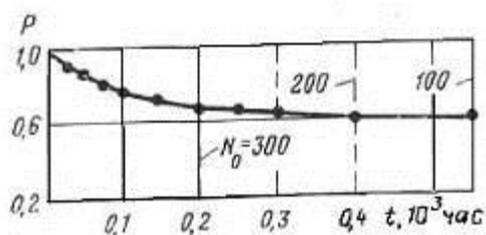


Рис. 2.19. Зависимость  $P$  от  $t$  (к задаче 2.105)

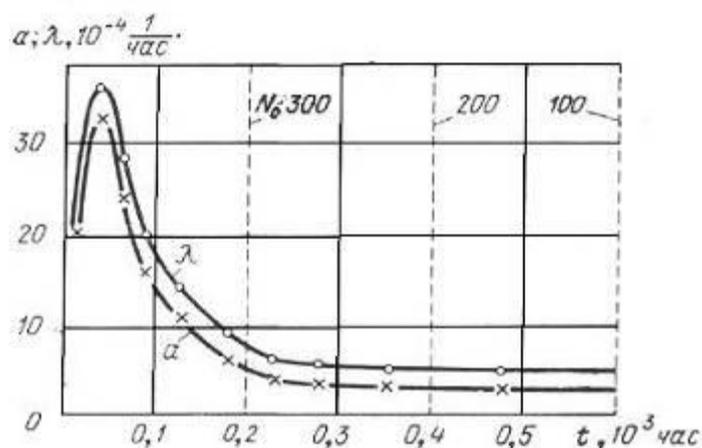


Рис. 2.20. Зависимость  $\alpha$  и  $\chi$  от  $t$  (к задаче 2.105)

Таблица 2.17

Вычисленные значения  $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$  к задаче 2.105

$\Delta t_i$ , час	$\bar{P}(t)$	$\bar{a}(t)$ , $10^{-3}$ 1/час	$\bar{\lambda}(t)$ , $10^{-3}$ 1/час
0-25	0,95	2	2,05
25-50	0,867	3,3	3,67
50-75	0,807	2,4	2,87
75-100	0,767	1,6	2,03
100-150	0,713	1,1	1,44
150-200	0,68	0,67	0,957
200-250	0,67	0,40	0,588
150-300	0,65	0,40	0,606
300-400	0,615	0,35	0,553
400-550	0,59	0,33	0,542

**2.106—2.115.** В течение времени  $\Delta t$  производилось наблюдение за восстанавливаемым изделием и было зафиксировано  $n(\Delta t_i)$  отказов. До начала наблюдения изделие проработало  $t_1$  [час], общее время наработки к концу наблюдения составило  $t_2$  [час]. Требуется найти наработку на отказ.

Исходные данные для решения задачи и ответы приведены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

Задачи 2.106 – 2.115

Номер задачи	Исходные данные			Ответ $\bar{t}_{cp}$ , час
	$t_1$ , час	$t_2$ , час	$t_3$ , час	
1.106	350	1280	15	62
1.107	400	1600	3	400
1.108	1000	6400	9	600
1.109	770	4800	7	575
1.110	1200	5558	2	2179
1.111	300	540	12	20
1.112	540	1200	5	132
1.113	300	3200	8	362,5
1.114	12	184	16	10,75
1.115	570	2000	27	53

**2.116—2.130.** В течение некоторого времени проводилось наблюдение за работой  $N_0$  экземпляров восстанавливаемых изделий. Каждый из образцов проработал  $t_1$  [час] и имел  $n_i$  отказов. Требуется

определить наработку на отказ по данным наблюдения за работой всех изделий.

Исходные данные для решения задачи и ответы приведены в табл. 2.19.

**2.131—2.140.** Система состоит из  $N$  приборов, имеющих разную надежность. Известно, что каждый из приборов, проработав вне системы  $t_1$  [час], имел  $n_i$  отказов. Для каждого из приборов справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо найти наработку на отказ всей системы.

Исходные данные для решения задачи и ответ; приведены в табл. 2.20.

**2.141 —2.145.** Электронная аппаратура состоит из  $k$  групп элементов. В процессе эксплуатации зафиксировано  $n$  отказов. Количество отказов в  $j$ -й группе равно  $n_j$ , среднее время восстановления элементов  $j$ -й группы равно  $t_j$ . Требуется вычислить среднее время восстановления аппаратуры.

Исходные данные и ответы приведены в табл. 2.21.

**2.146—2.150.** Изделие имеет среднюю наработку на отказ  $\bar{t}_{cp}$  и среднее время восстановления  $\bar{t}_B$ . Необходимо определить коэффициент готовности изделия.

Исходные данные и ответы приведены в табл. 2.22.

**2.151.** Интенсивность отказов изделия  $\lambda = 0,82 \cdot 10^{-3}$  1/час=const. Необходимо найти вероятность безотказной работы в течение 6 час полета самолета  $P(6)$ , частоту отказов  $a(100)$  при  $t=100$  час и среднюю наработку до первого отказа  $T_{cp}$ .

О т в е т:  $P(6) = 0,995$ ;  $a(100) = 0,75 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $T_{cp} = 1220$  час.

**2.152.** Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления цилиндров автомобильного двигателя в течение 120 час равна 0,9. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется рассчитать интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени 120 час.

О т в е т:  $\lambda=0,83 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $a(120)=0,747 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $T_{cp}=1200$  час.

**2.153.** Средняя наработка до первого отказа автоматической системы управления равна 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надёжности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 час, частоту отказов для момента времени 120 час и интенсивность отказов.

О т в е т:  $P(120)=0,83$ ;  $a(120) = 1,3 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $\lambda=1,56 \cdot 10^{-3}$  1/час;

**2.154.** Время работы изделия подчинено усеченному нормальному закону с параметрами  $T_1 = 8000$  час,  $\sigma_1=1000$ час. Требуется найти вероятность безотказной работы изделия в течение 8 000 час.

О т в е т:  $P(8000)=0,5$ .

**2.155.** Используя данные задачи 2.154, вычислить частоту отказов для  $t = 6 000$  час.

О т в е т:  $a(6000) = 5,4 \cdot 10^{-5}$  1/час;

**2.156.** Используя данные примера 2.154, определить интенсивность отказов для  $t=10000$  час.

О т в е т:  $\lambda(10000)=2,35 \cdot 10^{-3}$  1/час;

**2.157.** Используя данные примера 2.154, вычислить среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $T_{cp} = 8000$  час.

**2.158.** Время безотказной работы электровакуумного прибора подчинено закону Релея с параметром  $\sigma=1860$  час. Требуется рассчитать вероятность безотказной работы электровакуумного прибора в течение времени  $t=1000$  час, частоту отказа  $a(1000)$ , интенсивность отказов  $\lambda(1000)$  и среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $P(1000) = 0,87$ ;  $a(1000) = 0,25 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $\lambda(1000) = 0,29 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $T_{cp} = 2320$  час.

Таблица 2.19

## Задачи 2.116 – 2.130

Номер Задачи	Исходные данные														Ответ
	$N_1$	$t_1,$ час	$n_2$	$T_2,$ час	$n_3$	$T_3,$ час	$n_4$	$T_4,$ час	$n_5$	$T_5,$ час	$n_6$	$T_6,$ час	$n_7$	$T_7,$ час	$T_{cp},$ час
2.116	1	300	3	600	2	400	-	-	-	-	-	-	-	-	216
2.117	3	90	6	270	4	140	5	230	3	180	-	-	-	-	43
2.118	12	960	15	1112	8	808	7	1490	-	-	-	-	-	-	104
2.119	6	144	5	125	3	80	8	176	5	150	4	112	8	216	25,7
2.120	8	176	5	150	4	112	8	216	-	-	-	-	-	-	26
2.121	6	144	5	125	3	80	-	-	-	-	-	-	-	-	25
2.122	10	1020	18	2700	26	3120	32	4000	24	3480	16	2080	-	-	130
2.123	32	4000	24	3480	16	2080	-	-	-	-	-	-	-	-	133
2.124	10	1020	26	3120	24	3480	18	2700	-	-	-	-	-	-	132
2.125	18	2700	32	4000	24	3480	16	2080	-	-	-	-	-	-	136
2.126	3	720	4	1040	2	500	6	1800	-	-	-	-	-	-	271
2.127	1	300	3	600	6	2300	7	2450	5	1200	2	540	4	770	291
2.128	5	1500	8	1920	3	180	4	680	3	1390	2	2200	10	1500	265
2.129	3	1650	2	1200	4	2300	-	-	-	-	-	-	-	-	572
2.130	5	72	4	60	7	92	8	96	4	50	3	42	6	78	13,2

Таблица 2.20

## Задачи 2.131 – 2.140

Номер Задачи	Исходные данные											Ответ
	$N$	$t_1,$ час	$n_1$	$t_2,$ час	$n_2$	$t_3,$ час	$n_3$	$t_4,$ час	$n_4$	$t_5,$ час	$n_5$	$t_{cp},$ час
2.131	5	256	6	540	8	780	10	250	4	900	12	12,5

2.132	3	200	6	1860	4	2160	3	-	-	-	-	153
2.133	4	960	12	1112	15	808	8	1490	7	-	-	24,6
2.134	5	90	3	270	6	140	4	230	5	180	3	8,2
2.135	5	600	45	600	2	200	4	200	6	200	2	7,25
2.136	3	144	6	125	5	80	3	-	-	-	-	8,4
2.137	4	720	3	1040	4	500	2	1800	6	-	-	65,4
2.138	3	1650	3	150	5	176	10	-	-	-	-	10,9
2.139	4	120	1	120	2	90	8	700	1	-	-	8,7
2.140	3	4800	9	5500	3	1200	3	-	-	-	-	203

Таблица 2.21

Задачи 2.141 – 2.145

Номер Задачи	Исходные данные											Ответ <i>t<sub>ср</sub>, час</i>
	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>t</i> <sub>1</sub> , <i>мин</i>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>t</i> <sub>2</sub> , <i>мин</i>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>t</i> <sub>3</sub> , <i>мин</i>	<i>n</i> <sub>4</sub>	<i>t</i> <sub>4</sub> , <i>мин</i>	<i>n</i> <sub>5</sub>	
1.141	5	12	1	20	4	30	3	16	2	36	2	40
1.142	5	40	5	15	8	25	12	60	6	40	9	20
1.143	4	9	2	37	1	480	2	60	4	25	-	-
1.144	5	18	3	72	5	40	4	36	2	120	4	60
1.145	5	68	14	18	8	40	27	20	6	30	13	15

## Задачи 2.146 – 2.150

Номер задачи	Исходные данные		Ответ $K_T$
	$\bar{t}_{cp}, \text{час}$	$\bar{t}_B, \text{час}$	
2.146	230	12	0,95
2.147	556	23	0,96
2.148	556	2,5	0,995
2.149	430	8	0,98
2.150	143	1,7	0,998

**2.159.** При проведении форсированных испытаний изделия получена зависимость  $\lambda(t)$ , приведенная на рис. 2.21. Необходимо найти вероятность безотказной работы в течение  $t=1000$  час, частоту отказов для  $t=1000$  час и среднюю наработку до первого отказа изделия.

О т в е т:  $P(1000) = 0,9$ ;  $a(1000) = 1,98 \cdot 10^{-4} T_{cp} = 2680$  час.

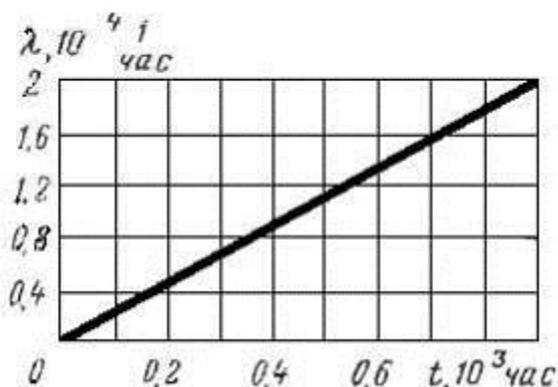


Рис. 2.21. Зависимость  $a$  и  $\chi$  от  $t$   
(к задаче 2.159)

**2.160.** Вероятность безотказной работы изделия в течение  $t=1000$  час,  $P(1000)=0,95$ . Время исправной работы подчинено закону Релея. Требуется определить количественные характеристики надежности  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_{cp}$ .

О т в е т:  $a(1000)=0,95 \cdot 10^{-4}$  1/час;  $\lambda(1000) = 10^{-4}$  1/час;  $T_{cp} = 4000$  час.

**2.161.** Средняя наработка изделия до первого отказа равна 1260 час. Время исправной работы подчинено закону Релея. Необходимо найти его количественные характеристики надежности для  $t=1000$  час.

О т в е т:  $P(1000) = 0,61$ ;  $a(1000) = 0,61 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $\lambda(1000) = 10^{-3}$  1/час;

**2.162.** Время исправной работы изделия подчинено гамма-распределению с параметрами  $k = 3$  и  $\lambda_0 = 1,5 \cdot 10^{-4} 1/\text{час}$ . Необходимо определить вероятность безотказной работы изделия в течение 10000 час.

О т в е т:  $P(10000) = 0,81$ .

**2.163.** Используя данные задачи 2.162, вычислить частоту отказа для  $t = 5000$  час.

О т в е т:  $a(5000) = 3,75 \cdot 10^{-4} 1/\text{час}$ ;

**2.164.** Используя данные задачи 2.162, найти интенсивность отказа для  $t = 5000$  час.

О т в е т:  $\lambda(5000) = 4 \cdot 10^{-4} 1/\text{час}$ ;

**2.165.** Используя данные задачи 2.162, определить среднюю наработку до первого отказа изделия.

О т в е т:  $T_{\text{ср}} = 2000$  час.

**2.166.** Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами  $k = 2,6$ ,  $\lambda_0 = 1,65 \cdot 10^{-7} 1/\text{час}$ . Необходимо найти вероятность безотказной работы шарикоподшипника в течение 150 час.

О т в е т:  $P(150) = 0,92$ .

**2.167.** Используя данные задачи 2.166, вычислить частоту отказов шарикоподшипников для времени  $t = 150$  час.

О т в е т:  $a(150) = 11,9 \cdot 10^{-4} 1/\text{час}$ ;

**2.168.** Используя данные задачи 2.166, рассчитать интенсивность отказов шарикоподшипников для  $t = 150$  час.

О т в е т:  $\lambda(150) = 12,9 \cdot 10^{-4} 1/\text{час}$ ;

**2.169.** Используя данные задачи 2.166, вычислить среднюю наработку до первого отказа шарикоподшипников.

О т в е т:  $T_{\text{ср}} \approx 350$  час.

**2.170.** Вероятность безотказной работы гироскопа в течение  $t = 150$  час равна 0,9. Время исправной работы подчинено закону Вейбулла с

параметром  $k=2,6$ . Необходимо определить опасность отказов гироскопов для  $t=150$  час и среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $A_1(150) = 0,38 \cdot 10^{-3}$  1/час;  $T_{cp} = 270$  час.

**2.171.** Известно, что параметр потока отказов аппаратуры выражается формулой  $\omega(t) = 0,2 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-0,6 \cdot 10^{-3} t})$ . Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа аппаратуры.

О т в е т:  $T_{cp} = 5000$  час.

**2.172.** Преобразование Лапласа параметра потока отказов аппаратуры при раздельном резервировании с кратностью  $m=1$  выражается зависимостью  $\omega(s) = 2\lambda^2 / s(s+3\lambda)$  Требуется вычислить среднюю наработку до первого отказа, если интенсивность отказов  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-3}$  1/час.

О т в е т:  $T_{cp} = 1000$  час.

**2.173.** В результате анализа данных об отказах изделия установлено, что частота отказов имеет вид  $a(t) = 2\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})$ . Необходимо определить количественные характеристики надежности  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $T_{cp}$

О т в е т:

$$P(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t};$$

$$\lambda(t) = \lambda (1 - e^{-\lambda t}) / \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-\lambda t} \right);$$

$$T_{cp} = 3 / 2 \lambda; \omega(t) = \frac{2}{3} \lambda (1 - e^{-3\lambda t}).$$

**2.174.** В результате анализа данных об отказах изделий установлено, что вероятность безотказной работы выражается формулой  $P(t) = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}$ . Требуется найти количественные характеристики надежности  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $T_{cp}$

О т в е т:

$$a(t) = 3\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^2;$$

$$\lambda(t) = \lambda (1 - e^{-\lambda t})^2 / \left( 1 - e^{-\lambda t} + \frac{1}{3} e^{-2\lambda t} \right);$$

$$\omega(t) = \frac{6}{11} \lambda \left[ 1 - \sqrt{\frac{11}{2}} e^{-3\lambda t} \sin \left( \sqrt{2} \lambda t + \arctg \frac{\sqrt{2}}{3} \right) \right];$$

$$T_{cp} = \frac{11}{6\lambda}.$$

**2.175.** Известно, что частота отказов изделия аппроксимируется формулой  $a(t) = 6\lambda^{-2\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})$ . Необходимо определить среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $T_{cp} = 5/6\lambda$ .

**2.176.** Интенсивность отказов изделия зависит от времени и выражается функцией  $\lambda(t) = k(1 - e^{-kt}) / \left(1 - \frac{1}{2}e^{-kt}\right)$ . Требуется определить количественные характеристики надежности  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $T_{cp}$ .

О т в е т:

$$P(t) = 2e^{-kt} - e^{-2kt}; a(t) = 2ke^{-kt}(1 - e^{-kt});$$

$$\omega(t) = \frac{2}{3}k(1 - e^{-3kt}); T_{cp} = \frac{3}{2k}.$$

**2.177.** Интенсивность отказов изделия зависит от времени и выражается функцией  $\lambda(t) = k^2 t / (1 + kt)$ . Необходимо найти  $P(t)$ .

О т в е т:  $P(t) = e^{-kt}(1 + kt)$ ,

**2.178.** Используя данные задачи 2.177, определить частоту отказов изделия  $a(t)$ .

О т в е т:  $a(t) = k^2 t e^{-kt}$ .

**2.179.** Используя данные задач 2.177 и 2.178, найти среднюю наработку до первого отказа.

О т в е т:  $T_{cp} = 2/k$ .

**2.180.** Частота отказов изделия  $a(t) = k^2 t e^{-kt}$ . Требуется определить параметр потока отказов  $\omega(t)$ :

О т в е т:  $\omega(t) = \frac{k}{2}(1 - e^{-2kt})$ .

**2.181.** Интенсивность отказов  $\lambda_c$  сложной восстанавливаемой системы есть величина постоянная и равная 0,015 1/час. Среднее время

восстановления  $t_B = 100$  час. Необходимо вычислить вероятность застать систему в исправном состоянии в момент времени  $t=10$  час.

О т в е т:  $K_T(10) \approx 0,867$ .

**2.182.** Коэффициент готовности сложного восстанавливаемого изделия  $K_T = 0,9$ . Среднее время его восстановления  $t_B=100$  час. Требуется найти вероятность застать изделие в исправном состоянии в момент времени  $t=12$  час.

О т в е т:  $K_T(12) \approx 0,987$ .

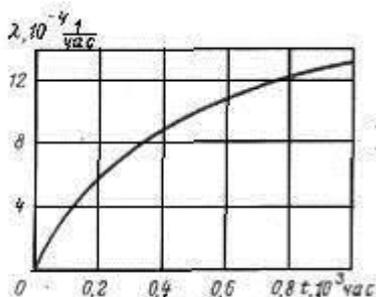


Рис. 2.22. Зависимость  $\chi$  от  $t$   
(к задаче 2.183 )

**2.183.** В процессе эксплуатации  $N_0=100$  восстанавливаемых изделий возникали отказы, которые фиксировались в интервалах времени  $\Delta t = 100$  час. Число отказов  $n$  за время эксплуатации в течение 1000 час приведено в табл.2.23. Требуется определить интенсивность отказов и построить график.

О т в е т: график  $\lambda(t)$  рис. 2.22.

Таблица 2.23

Исходные данные к задаче 2.183

$\Delta t_i$ , час	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500
$n$	2	4	6	7	8
$\Delta t_i$ , час	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
$n$	9	9	10	10	10

**2.184.** Используя данные задачи 2.183, определить вероятность безотказной работы изделия в течение  $t=1000$  час.

О т в е т:  $P(1000) \approx 0,4$

## 2.2. Задачи по теории массового обслуживания

### 2.2.1. Краткие теоретические сведения по теории массового обслуживания.

*Системой массового обслуживания (СМО)* называется любая система, предназначенная для обслуживания какого-то потока заявок (например, ремонтная мастерская, телефонная станция, билетная касса и т.д.).

Системы массового обслуживания делятся *на системы с отказами и системы с ожиданием.*

В системе с отказами заявка, пришедшая в момент, когда все каналы обслуживания заняты, получает отказ и покидает систему.

В системе с ожиданием такая заявка не покидает систему, а становится в очередь и ждет, пока не освободится какой-нибудь канал. Время ожидания и число мест в очереди могут быть как неограниченными, так и ограниченными. Для расчета систем с ожиданием используют цепи Маркова.

Цепь Маркова порядка  $n$  с конечным числом состояний – это стационарный процесс с конечным числом возможных значений, для которого условная вероятность любого значения при заданных  $n$  предыдущих значениях совпадает при заданных  $n+k$  предыдущих значениях (для любого  $k \geq 0$ ). Цепь Маркова произвольного порядка  $n$  называется сложной цепью Маркова, а цепь порядка 1 – просто цепью Маркова.

Марковский сдвиг (перемешивающий) порядка  $n$  с конечным пространством состояний есть преобразование, которое отвечает (перемешивающей) цепи Маркова порядка  $n$  с конечным числом состояний.

Марковский сдвиг порядка  $n$  с конечным пространством состояний изоморфен сдвигу Бернулли. Любой стационарный процесс можно как угодно хорошо аппроксимировать в слабой топологии сложными цепями Маркова. Точнее, для любого процесса  $(P, T)$  и любого  $n$  найдется

марковская цепь  $(P_n, T_n)$  порядка  $n$ , которая каждой последовательности длины  $n$  приписывает ту же меру, что и  $(P, T)$ . Если  $T$  – перемешивающее преобразование, то и  $T_n$  обладает этим свойством

Система массового обслуживания называется пуассоновской, если все потоки событий, переводящие ее из состояния в состояние, являются пуассоновскими.

Ниже мы будем рассматривать только пуассоновские СМО, причем с простейшими потоками переходов.

Эту систему обычно интегрируют при начальных условиях

$$p_0(0)=1; \quad p_k(0)=0; \quad (k>0)$$

(в начальный момент все каналы свободны). При  $t \rightarrow \infty$  существует предельный (установившийся) режим работы СМО, при котором вероятности состояний определяются *формулами Эрланга*

$$P_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!}} \quad (k = 0, 1, \dots, n), \quad (2.28)$$

где  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$

$$P_k = \frac{P(k, \alpha)}{R(n, \alpha)} = \frac{R(k, \alpha) - R(k-1, \alpha)}{R(n, \alpha)} \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (2.29)$$

Вероятность того, заявка будет обслужена (не получит отказа) выражается формулой

$$P_{\text{обс}} = 1 - p_n = 1 - \frac{P(n, \alpha)}{R(n, \alpha)} = \frac{R(n-1, \alpha)}{R(n, \alpha)}. \quad (2.30)$$

Система массового обслуживания называется *чистой системой с ожиданием*, если ни время пребывания заявки в очереди, ни число заявок в очереди ничем не ограничено. Если имеются ограничения по какому-нибудь из этих признаков, система называется *системой смешанного типа*. Для системы массового обслуживания смешанного типа с ограничениями

по числу мест в очереди предельные вероятности состояний выражаются формулами

$$P_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n!} \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1 - \frac{\alpha}{n}}} \quad (k = 0, 1, \dots, n),$$

$$P_{n+s} = \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \left(\frac{\alpha}{n}\right)^s}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n!} \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1 - \frac{\alpha}{n}}} \quad (s = 1, 2, \dots, m) \quad (2.31)$$

где  $n$  – число каналов обслуживания;

$m$  – число мест в очереди;

$\lambda$  – плотность потока заявок;  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$

$\mu$  – плотность “потока обслуживания” одного канала.

Для чистой системы с ожиданием ( $m=\infty$ ) установившийся предельный режим существует только в случае  $\frac{\alpha}{n} < 1$ . Предельные

вероятности выражаются формулами

$$P_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n! \left(1 - \frac{\alpha}{n}\right)}} \quad (k = 0, 1, \dots, n),$$

$$P_{n+s} = \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \left(\frac{\alpha}{n}\right)^s}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n! \left(1 - \frac{\alpha}{n}\right)}} \quad (s = 1, 2, \dots, m),$$

Ограничения по времени пребывания заявки в очереди (или в системе) при составлении уравнений для вероятностей состояний учитываются тем, что на каждую заявку, находящуюся в очереди (системе), действует “поток уходов” с плотностью  $\nu$ , обратной среднему времени пребывания заявки в очереди (системе).

### 2.2.2. Примеры по теории массового обслуживания

**Пример 2.185.** Поток машин, следующих по шоссе в одном направлении, представляет собой простейший поток с плотностью  $\lambda$ . Человек выходит на шоссе, чтобы остановить первую попавшуюся машину, идущую в данном направлении. Найти закон распределения времени  $T$ , которое ему придется ждать; определить его математическое ожидание  $m_t$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_t$ .

**Решение.** Плотность распределения времени ожидания будет такая же, как плотность распределения промежутка между машинами, а именно

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0),$$

так как “будущее” в простейшем потоке никак не зависит от “прошлого”, в частности от того, сколько времени тому назад прошло последняя машина.

Для показательного закона

$$m_t = \frac{1}{\lambda}; \quad D_t = \frac{1}{\lambda^2}; \quad \sigma_t = \frac{1}{\lambda} = m_t.$$

**Пример 2.186.** Тот же вопрос, что и в примере 2.1, но поток машин-регулярный, с той же плотностью:

**Решение.** Закон распределения времени ожидания  $T$  будет законом постоянной плотности в промежутке времени между двумя машинами, равном

$$f(t) = \lambda \quad \left( 0 < t < \frac{1}{\lambda} \right)$$

Для закона постоянной плотности

$$m_t = \frac{1}{2\lambda}; \quad D_t = \frac{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2}{12} = \frac{1}{2\lambda^2}; \quad \sigma_t = \frac{1}{2\sqrt{3}\lambda}$$

**Пример 2.187.** Показать, что для пуассоновского потока событий

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(X(\Delta t) \geq 1)}{P(X(\Delta t) = 1)} = 1$$

где  $X(\Delta t)$  – число событий, попадающих на участок длиной  $\Delta t$ .

**Решение.** Имеем

$$P(X(\Delta t) \geq 1) = 1 - P(X(\Delta t) = 0) = 1 - e^{-\lambda \Delta t};$$

$$P(X(\Delta t) = 1) = \lambda \Delta t e^{-\lambda \Delta t};$$

Следовательно,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(X(\Delta t) \geq 1)}{P(X(\Delta t) = 1)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-\lambda \Delta t}}{\lambda \Delta t e^{-\lambda \Delta t}} = 1.$$

**Пример 2.188.** Пассажир выходит на автобусную остановку и ждет очередного автобуса. Автобусы подходят к остановке через случайные, взаимонезависимые и одинаково распределенные промежутки времени  $T_1, T_2, \dots (T_i > 0)$ . Каждый из этих промежутков времени имеет одну и ту же плотность распределения  $f(t)$ . Требуется найти закон распределения времени ожидания очередного автобуса при условии, что выход пассажира

на остановку некоррелирован с моментом прибытия автобуса (расписание движения автобусов пассажиру неизвестно).

**Р е ш е н и е .** Рассмотрим поток событий, состоящих в том, что на остановку прибывает автобус. Этот поток по условиям задачи будет стационарным потоком Пальма. Выход пассажира на автобусную остановку можно рассматривать как появление некоторой точки  $\Pi$  на оси времени  $Ot$ .

Случайность выхода пассажира на остановку следует понимать в том смысле, что в интервале времени  $T^*$  между прибытием двух автобусов (рис. 2.23 а) точка  $\Pi$  распределена равномерно (подчеркнем, что речь идет об очередном автобусе и ему предшествующем).

Закон распределения интервала времени  $T^*$  между прибытием двух автобусов, на котором появился пассажир (на который упала точка  $\Pi$ ), в

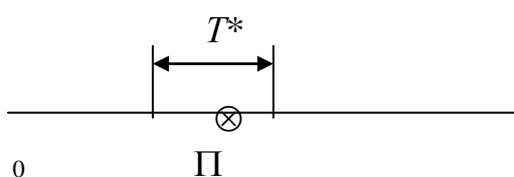


Рис. 2.23 а.

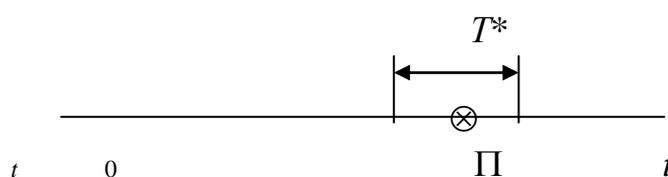


Рис. 2.23 б.

общем случае *не совпадает* с законом  $f(t)$ . Этот (на первый взгляд парадоксальный) факт можно пояснить на следующем наглядном примере. Допустим, сто интервал времени автобусов может принимать только два значения:  $t_1=0,9$  с вероятностью 0,5 и  $t_2=0,1$  с вероятностью 0,5. Тогда на оси  $Ot$  мы будем иметь поток Пальма, в котором с одинаковой частотой будут встречаться длинные (0,9) и короткие (0,1) участки (см. рис. 2.23б). Пусть пассажир появился случайно в какой-нибудь момент на оси  $Ot$ . Спросим себя, что более вероятно: что он попадает на участок длины 0,9 или на участок длины 0,1? Очевидно, первое более вероятно: отрезков 0,9 и 0,1 на оси  $Ot$  в среднем одинаковое количество, но отрезки 0,9 длиннее в 9 раз; значит, они занимают в 9 раз большую протяженность оси  $Ot$ , чем малые отрезки, а следовательно, вероятность попадания точки  $\Pi$  на отрезок 0,9 равна уже не 0,5, а 0,9, а вероятность попадания отрезков 0,1 равна 0,1.

Таким образом, на этом простом примере можно убедиться, что закон распределения того промежутка, на который попала точка  $\Pi$ , не совпадает с его априорным законом распределения.

Решим эту же задачу для непрерывного распределения. Пусть априорная плотность распределения промежутка  $T$  между соседними событиями есть  $f(t)$  ( $t > 0$ ). Найдем плотность распределения  $f(t^*)$  того промежутка  $T^*$ , на который попала точка  $\Pi$ . Для этого найдем  $f^*(t) dt$  – вероятность того, что точка  $\Pi$  попадает на промежуток, длина которого заключена в интервале  $(t, t+dt)$ . Эта вероятность приближенно равна отношению суммарной длины таких промежутков на очень большом интервале времени к полной длине такого интервала. Пусть на очень большом интервале уложилось большое число  $N$  промежутков. Среднее число промежутков, длина которых лежит в пределах  $(t, t+dt)$ , равна  $Nf(t)dt$ ; средняя суммарная длина всех таких промежутков будет  $tNf(t)dt$ . Средняя общая продолжительность всех  $N$  промежутков равна  $Nm_t$ , где

$$m_t = M [T] = \int_0^{\infty} tf(t) dt$$

Следовательно,

$$f^*(t) dt \approx \frac{Ntf(t) dt}{Nm_t} = \frac{tf(t)}{m_t} dt$$

Это равенство выполняется тем точнее, чем более длительный промежуток времени будет рассматриваться (чем больше  $N$ ). В пределе закон распределения случайной величины  $T^*$  будет

$$f^*(t) = \begin{cases} \frac{t}{m_t} f(t) & \text{при } t > 0, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Нетрудно убедиться, что функция  $f^*(t)$  обладает всеми свойствами плотности распределения.

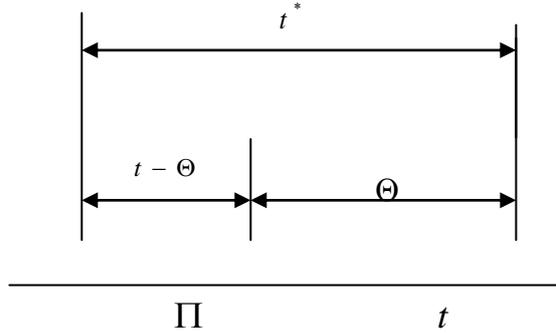


Рис. 2.23 в

После того как мы нашли плотность распределения интервала времени  $T^*$  между прибытием двух автобусов, на котором появился пассажир  $\Pi$ , можно найти и плотность распределения времени  $\Theta$  ожидания  $\varphi(\theta)$  автобуса (рис. 2.23 в). С этой целью воспользуемся формулой полной вероятности

$$\varphi(\theta) = \int_0^{\infty} f^*(t^*)\varphi(\theta | t^*)dt^*, \quad (\theta > 0)$$

где  $\varphi(\theta | t^*)$  - условная плотность распределения времени при условии, что случайная величина  $T^*$  попала в интервал времени  $(t^*, t^*+dt^*)$ .

Так как точка  $\Pi$  на интервале времени  $t^*$  распределена равномерно, то

$$\varphi(\theta | t^*) = \begin{cases} \frac{1}{t^*} & \text{при } 0 < \theta < t^*, \\ 0 & \text{при } \theta > t^*. \end{cases}$$

Отсюда получим

$$\varphi(\theta) = \int_0^{\infty} \frac{1}{t^*} f^*(t^*)dt^* = \int_0^{\infty} \frac{1}{t^*} \frac{t^*}{m_t} f(t^*)dt^* = \frac{1 - F(\theta)}{m_t}$$

где  $F(t)$  – функция распределения случайной величины  $T$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

Искомая плотность распределения времени ожидания будет иметь вид

$$\varphi(\theta) = \begin{cases} \frac{1 - F(\theta)}{m_t} & \text{при } \theta > 0 \\ 0 & \text{при } \theta < 0 \end{cases}$$

**Пример 2.189.** В условиях предыдущей задачи закон распределения промежутка между автобусами есть закон постоянной плотности в интервале от 5 до 10 минут. Найти  $f^*(t)$  и  $\varphi(\theta)$ .

**Решение.**

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{5} & \text{при } t \in (5, 10) \\ 0 & \text{при } t \notin (5, 10) \end{cases}$$

Средний промежуток времени между автобусами  $m_t = 7,5$ .

$$f^*(t) = \begin{cases} \frac{t}{37,5} & \text{при } t \in (5, 10) \\ 0 & \text{при } t \notin (5, 10) \end{cases}$$

График плотности  $f^*(t)$  показан на рис 2.24а.

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 5 \\ \frac{t-5}{5} & \text{при } 5 < t < 10 \\ 1 & \text{при } t > 10 \end{cases}$$

Отсюда

$$\varphi(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta < 0 \\ \frac{1}{7,5} & \text{при } 0 < \theta < 5 \\ \frac{10 - \theta}{37,5} & \text{при } 5 < \theta < 10 \\ 0 & \text{при } \theta > 10 \end{cases}$$

График плотности распределения  $\varphi(\theta)$  показан на рис. 2.24б.

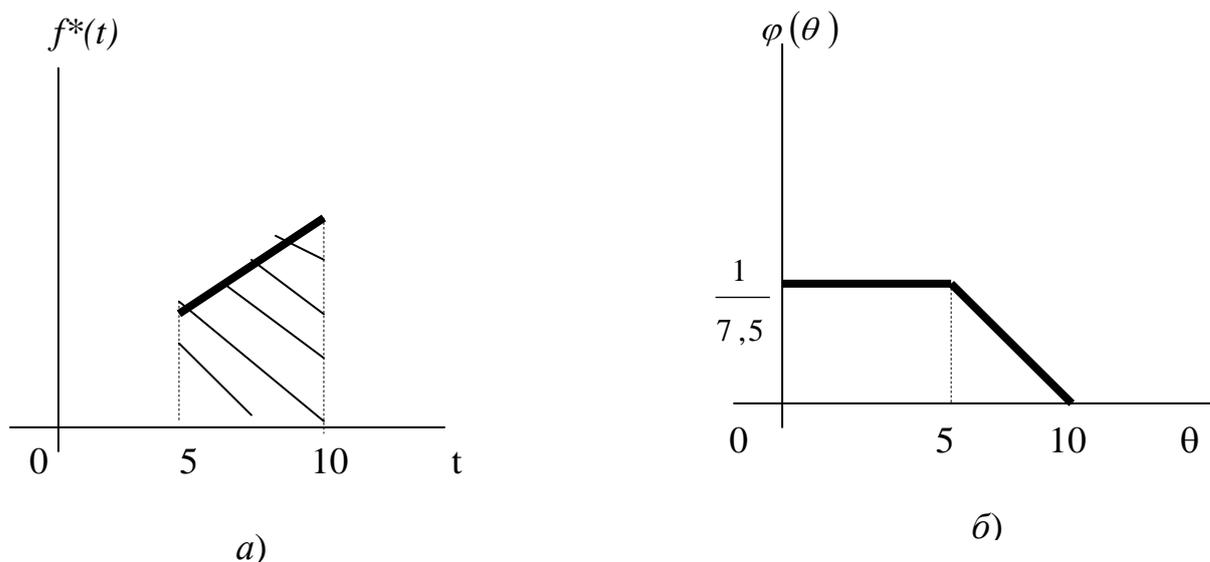


Рис. 2.24

**Пример 2.190.** В условиях задачи 2.189 найти закон распределения времени ожидания очередного автобуса, если поток автобусов представляет собой поток Эрланга  $k$ -го порядка. Найти плотность распределения длины интервала времени  $T^*$ , на который попал пассажир.

Р е ш е н и е .

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{m_t} [1 - F(\theta)] = \frac{1}{m_t} \left[ 1 - \left( 1 - \sum_{s=0}^k \frac{(\lambda \theta)^s}{s!} e^{-\lambda \theta} \right) \right] = \frac{\lambda}{k+1} R(k, \lambda \theta) \quad (\theta > 0)$$

Если исходный поток автобусов был простейшим ( $k=0$ ), то

$$\varphi(\theta) = \lambda e^{-\lambda \theta} \quad (\theta > 0)$$

т.е. время ожидания будет показательным, о чем уже говорилось выше.

Плотность распределения интервала времени  $T^*$ , на который попадает точка  $P$ , имеет вид

$$f^*(t) = \frac{t}{m_t} f(t) = \frac{\lambda t}{k+1} \cdot \frac{\lambda (\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = \frac{\lambda (\lambda t)^{k+1}}{(k+1)!} e^{-\lambda t} = \lambda P(k+1, \lambda t) \quad (t > 0)$$

т.е. представляет собой закон Эрланга  $(k+1)$ -го порядка.

**Пример 2.191.** Для условий примера 2.189 определить вероятность того, что пассажир сядет в автобус, если автобус на остановке ждет время  $t_0$ , а пассажир, не застав автобуса на остановке, тоже ждет время  $t_0$ , и если за

это время не подойдет автобус, то идет пешком. Время  $t_0$  мало по сравнению с возможными значениями промежутков, так что одновременно два автобуса на остановке практически быть не могут.

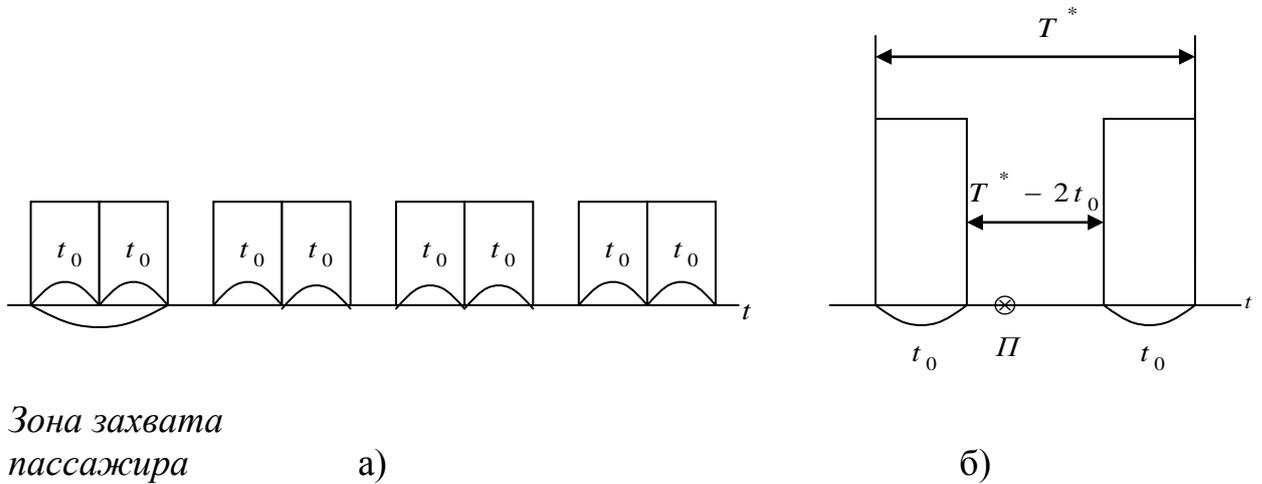


Рис. 2.25

**Решение.** Перейдем к противоположному событию  $A$  – пассажир не сядет в автобус. В данном случае каждое событие “подход автобуса к остановке” сопровождается “зоной захвата” пассажира (зона  $z$ ) шириной  $2t_0$  (рис. 2.25а).

Рассмотрим интервал времени  $T^*$ , на котором появился пассажир  $\Pi$  (рис. 2.25б).

Для того чтобы произошло событие  $A$ , нужно, чтобы точка  $\Pi$ , распределенная равномерно на интервале времени  $T^*$ , не была накрыта “зоной захвата” соседних автобусов. Вероятность этого события будет

$$\begin{aligned}
 P(\bar{A}) &= \int_{2t_0}^{\infty} \frac{t^* - 2t_0}{t^*} f^*(t^*) dt^* = \int_{2t_0}^{\infty} \frac{t^* - 2t_0}{t^*} \cdot \frac{t^*}{m_t} f(t^*) dt^* \\
 &= \frac{1}{m_t} \int_{2t_0}^{\infty} t^* f(t^*) dt^* - \frac{2t_0}{m_t} \int_{2t_0}^{\infty} f(t^*) dt^*
 \end{aligned}$$

откуда

$$P(\bar{A}) = 1 - \frac{1}{m_t} \int_{2t_0}^{\infty} t f(t) dt - \frac{2t_0}{m_t} \int_{2t_0}^{\infty} f(t) dt$$

В этой формуле  $f(t)$  – плотность априорного закона распределения интервала времени  $T$  между появлением на остановке двух автобусов ( $t > 0$ ),

$$m_t = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad \text{– математическое ожидание времени } T.$$

**Пример 2.192.** Рассматривается работа автозаправочной станции (АЗС), на которой имеется четыре заправочных колонки ( $n=4$ ). Заправка одной машины длится в среднем 3 минуты. В среднем на АЗС каждую минуту прибывает машина, нуждающаяся в заправке бензином. Число мест в очереди практически неограниченно. Все машины, вставшие в очередь на заправку, “терпеливо” дожидаются своей очереди. Определить среднее время, проходящее с момента пребывания машины на заправку, до момента ее заправки, а также другие характеристики работы АЗС: среднее число занятых мест ; среднее число машин в очереди ; среднее время простоя колонки между заправками.

**Решение.** Работа АЗС может рассматриваться как работа чистой системы массового обслуживания с ожиданием с характеристиками: число каналов  $n=4$ ; параметр потока заявок  $\lambda = 1 [мин^{-1}]$  ; параметр потока обслуживаний  $\mu = 1/3 [мин^{-1}]$

В этом случае

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = 3, \quad \varkappa = \frac{\lambda}{n\mu} = \frac{3}{4} = 0,75$$

Стационарный предельный режим при  $t \rightarrow \infty$  существует, так как  $\varkappa < 1$ .

В данном случае вероятность обслуживания любой заявки будет равна единице:  $P_{обс} = 1$ , так как рано или поздно машина, вставшая в очередь на обслуживание, дождется его. Среднее число занятых каналов будет

$$k = \frac{P_{обс} \lambda}{\mu} = \alpha = 3$$

Найдем сумму вида

$$\sum_{s=0}^{\infty} s \mathbb{N}^s = \mathbb{N} \frac{d}{d\mathbb{N}} \sum_{s=0}^{\infty} \mathbb{N}^s = \mathbb{N} \frac{d}{d\mathbb{N}} \frac{1}{1-\mathbb{N}} = \frac{\mathbb{N}}{(1-\mathbb{N})^2}$$

Тогда

$$\bar{s} = \frac{P(n, \alpha) \frac{\mathbb{N}}{(1-\mathbb{N})^2}}{R(n, \alpha) + P(n, \alpha) \frac{\mathbb{N}}{1-\mathbb{N}}} = \frac{P(4,3) \cdot 12}{R(4,3) + P(4,3) \cdot 3} \approx 1,53$$

Среднее время ожидания машины в очереди будет

$$\bar{t}_{оч} = \frac{\bar{s}}{\lambda} = \frac{1,53}{1} = 1,53 \text{ [мин]}$$

Среднее время пребывания машины у АЗС будет равно

$$3 + 1,53 = 4,53 \text{ [мин]}$$

Среднее время простоя колонки

$$\bar{t}_{пр} = \frac{1}{\mu} \frac{1 - P_{зан}}{P_{зан}} = 1 \text{ [мин]}$$

так как

$$P_{зан} = \frac{\bar{k}}{n} = \frac{3}{4}$$

### 2.2.3. Примеры применения метода Монте-Карло при расчёте системы массового обслуживания.

Описание задачи. Рассмотрим одну из самых простых систем массового обслуживания. Система эта состоит из  $n$  линий (или каналов, или пунктов обслуживания), каждый из которых может «обслуживать потребителей». В систему поступают заявки, причем моменты их поступления случайные. Каждая заявка

поступает на линию № 1. Если в момент поступления  $k$ -й заявки (назовем его  $T_k$ ) эта линия свободна, то она приступает к обслуживанию заявки, что продолжается  $t_3$  минут ( $t_3$  — время занятости линии). Если в момент  $T_k$  линия №1 занята, то заявка мгновенно передается на линию №2 и т. д. Наконец, если все  $l$  линий в момент  $T_k$  заняты, то система выдает отказ. Требуется определить, сколько (в среднем) заявок обслужит система за время  $T$  и сколько отказов она даст?

Ясно, что задачи такого типа встречаются при исследовании организации работы любых предприятий, а не только предприятий бытового обслуживания. В некоторых очень частных случаях удается найти аналитические решения. Однако в сложных случаях (о них будет сказано ниже) метод Монте-Карло оказывается единственным методом расчета.

**Простейший поток заявок.** Первый вопрос, возникающий при рассмотрении такой системы: что представляет собой поток поступающих заявок? Этот вопрос решается опытом, путем достаточно длительного наблюдения за заявками. Изучение потоков заявок в различных условиях позволило выделить некоторые достаточно часто встречающиеся случаи.

Простейшим называется такой поток заявок, когда промежуток времени  $\tau$  между двумя последовательными заявками есть случайная величина, распределенная в интервале  $(0, \infty)$  с плотностью  $P(x) = a \cdot e^{-dx}$  (рис 2.26 на нем построены плотности при  $a=1,2$  )

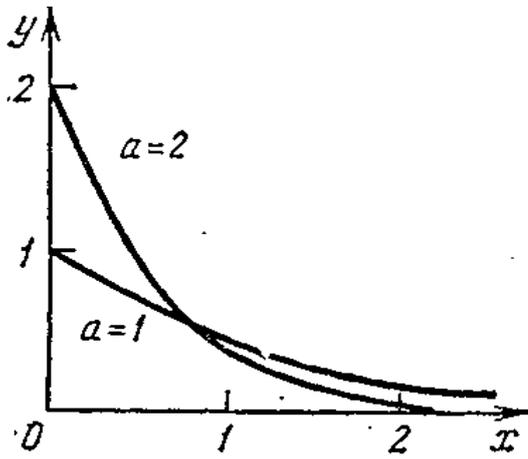


Рис. 2.26

Легко вычислить математическое ожидание  $\tau$

$$M_{\tau} = \int_0^{\infty} xp(x) dx = \int_0^{\infty} xae^{-ax} dx.$$

После интегрирования по частям ( $u=x$ ,  $d=ae^{-ax} dx$ ) получим:

$$M_{\tau} = -xe^{-ax} \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} e^{-ax} dx = -\frac{e^{-ax}}{a} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{a}.$$

Параметр  $a$  называется *плотностью потока заявок*.

Формула для розыгрыша  $\tau$  запишется так:

$$\int_0^{\tau} ae^{-ax} dx = \gamma.$$

Вычислив интеграл, получим

$$1 - e^{-a\tau} = \gamma,$$

откуда

$$\tau = -\frac{1}{a} \ln(1 - \gamma).$$

Впрочем, величина  $1 - \gamma$  распределена точно так же, как  $\gamma$ , и поэтому можно вместо последней формулы использовать формулу

$$\tau = -\frac{1}{a} \ln \gamma \quad (2.32)$$

**Схема расчета.** Итак, рассмотрим работу СМО. Каждой линии поставим в соответствие ячейку внутреннего накопителя ЭВМ, в которую будем записывать момент, когда эта линия освобождается. Обозначим момент освобождения  $i$ -й линии через  $t_i$ . За начальный момент расчета выберем момент поступления первой заявки  $T_1 = 0$ . Можно считать, что в этот момент все  $t_i$  равны  $T_1$  — все линии свободны. Время окончания расчета равно  $T_{кон} = T_1 + T$ .

Первая заявка поступает на линию № 1. Значит, в течение  $t_3$  линия эта будет занята. Поэтому мы должны заменить  $t_1$  на новое значение  $(t_1)_{нов} = T_1 + t_3$ , добавить единицу к счетчику выполненных заявок и перейти к рассмотрению второй заявки.

Предположим, что  $k$  заявок уже рассмотрены. Тогда надо разыграть момент поступления  $k + 1$ -й заявки. Для этого выбираем очередное значение  $\gamma$  и по формуле (2.33) вычисляем очередное значение  $\tau = \tau_k$ . А затем вычисляем момент поступления

$$T_{k+1} = T_k + \tau_k.$$

Свободна ли в этот момент линия? Для установления этого надо проверить условие

$$t_1 \leq T_{k+1}, \quad (2.34)$$

Если это условие выполнено, то, значит, к моменту  $T_{k+1}$  линия уже освободилась и может обслужить эту заявку. Мы должны заменить  $t_1$  на  $T_{k+1} + t_3$ , добавить единицу к счетчику выполненных заявок и перейти к следующей заявке. Если условие (2.34) не выполнено, то это значит, что первая линия в момент  $T_{k+1}$  занята. Тогда мы проверяем, свободна ли вторая линия:

$$t_2 \leq T_{k+1}, \quad (2.35)$$

Если условие (2.35) выполнено, то мы заменяем  $t_2$  на  $T_{k+1}+t_3$ , добавляем единицу к счетчику выполненных заявок и переходим к следующей заявке. Если условие (2.35) не выполнено, то переходим к проверке условия

$$t_3 \leq T_{k+1},$$

Может оказаться, что при всех  $i$  от 1 до  $n$

$$t_i > T_{k+1},$$

т. е. все линии в момент  $T_{k+1}$  заняты. Тогда надо добавить единицу к счетчику отказов и потом перейти к рассмотрению следующей заявки.

Каждый раз, вычислив  $T_{k+1}$ , надо проверять еще условие окончания опыта

$$T_{k+1} > T_{\text{КОН}}.$$

Когда это условие окажется выполненным, опыт заканчивается. В счетчике выполненных заявок и в счетчике отказов будут стоять числа  $\mu_{\text{ВЫП}}$  и  $\mu_{\text{ОТК}}$

Такой опыт повторяется  $N$  раз (с использованием различных  $\gamma$ ). Результаты всех опытов осредняются;

$$M \mu_{\text{ВЫП}} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_{\text{ВЫП}}(j),$$

$$M \mu_{\text{ОТК}} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_{\text{ОТК}}(j)$$

где  $\mu_{\text{ВЫП}}(j)$  и  $\mu_{\text{ОТК}}(j)$  - значения  $\mu_{\text{ВЫП}}$  и  $\mu_{\text{ОТК}}$ , полученные в  $j$ -том опыте.

**Более сложные задачи.** Легко показать, что этот же метод позволяет рассчитывать несравненно более сложные системы. Например, величина  $t_3$  может быть не постоянной, а случайной и различной для различных линий (что соответствует различному оборудованию или различной квалификации обслуживающего персонала). Схема расчета останется в основном такой

же, но значения  $t_3$  придется каждый раз разыгрывать, и формула разыгрывания для каждой линии будет своя.

Можно рассматривать так называемые *системы, с ожиданием*, в которых отказ выдается не сразу: заявка хранится в течение некоторого времени  $t_{\text{п}}$  (*время пребывания заявки в системе*), и если за это время какая-нибудь линия освободится, то она обслужит эту заявку.

Можно рассматривать системы, в которых очередную заявку принимает та линия, которая раньше всех освободилась. Можно учесть случайный выход из строя отдельных линий и случайное время ремонта каждой из них. Можно учесть изменения плотности потока заявок во времени. И многое, многое другое.

Конечно, расчеты таких систем не даются даром. Чтобы получить результаты, имеющие практическую ценность, надо выбрать хорошую модель. Для этого приходится достаточно тщательно изучать действительные потоки заявок, проводить хронометраж работы отдельных узлов и т. п. Вообще надо знать вероятностные законы функционирования отдельных частей системы. Тогда метод Монте-Карло позволяет вычислить вероятностные законы работы всей системы, как бы сложна она ни была.

Такие методы расчета чрезвычайно полезны при планировании предприятий: вместо дорогостоящего (а иногда просто невозможного) эксперимента в натуре мы можем экспериментировать на ЭВМ, моделируя разные варианты организации работы или использования оборудования.

**Пример 2.193.** Перед станком, встроенным в автоматическую линию, расположен накопитель (бункер), в который поступают заготовки. Если в бункере уже находятся две заготовки, то очередная заготовка передается на другую линию;  $\lambda = 2$  (заготовки в минуту);  $M(t_{\text{обс}}) = 20$  с;  $n = 3$ . Вычислить основные вероятностные характеристики системы.

Решение.

$$\text{Имеем} \quad \mu = 1 / M(t_{\text{обс}}) = 60 / 20 = 3 \text{ (обслуживания в минуту)}$$

$$\varphi = \lambda / \mu = 2/3;$$

$$M(q) = \frac{\varphi^{n+1}(n\varphi - n - 1) + \varphi}{(\varphi^{n+1} - 1)(\varphi - 1)} = \frac{(2^4/3^4)(3 \cdot 2/3 - 3 - 1) + 2/3}{(2^4/3^4 - 1)(2/3 - 1)} = 1.02 \approx 1(\text{заготовка});$$

$$M(j) = 1 - p_0 = 1 - 0,41 = 0,59 \approx 1(\text{заготовка});$$

$$M(v) = M(q) - M(j) = 1,02 - 0,59 = 0,43 \approx 0(\text{заготовок});$$

$$M(\rho) = 0,41 \approx 0(\text{приборов});$$

$$P_{отк} = p_3 = (2/3)^3 \cdot 0,41 = 0,12.$$

**Пример 2.194.** В инструментальное отделение сборочного цеха в среднем за минуту приходят за инструментом  $\lambda = 1,6$  рабочих. Обслуживание одного рабочего (нахождение требуемого инструмента и выдача его) занимает  $1/\mu = 1,1$  мин. Известно, что стоимость минуты работы рабочего и кладовщика соответственно равны:  $c_1 = 6$  коп. и  $c_2 = 4$  коп. Сколько должно быть кладовщиков ( $s$ ), чтобы время, потерянное рабочими в очереди и кладовщиками при отсутствии обращений к ним, было бы минимальным?

**Решение:** Имеем  $\mu = 1/1,1 = 0,9$  (обслуживаний одним кладовщиком в мин.)

$$\varphi = \lambda / (\mu s) = 1.6 / (0.9 s)$$

Случай, когда  $s = 1$ , не рассматриваем, так как в этом случае  $\varphi > 1$ .

Среднее число рабочих в очереди при  $s > 1$  вычисляем по формуле

$$M(v) = \frac{\varphi^{s+1} s^s}{s!(1-\varphi)^2} p_0$$

При	$s=2$	имеем	$\varphi=0,88,$	$p_0=0,068,$	$M(v)=6,66;$
»	$s=3$	»	$\varphi=0,59,$	$p_0=0,178,$	$M(v)=0,59;$
»	$s=4$	»	$\varphi=0,44,$	$p_0=0,198,$	$M(v)=0,13;$
»	$s=5$	»	$\varphi=0,36,$	$p_0=0,191,$	$M(v)=0,03.$

Среднее количество незагруженных кладовщиков вычислим по формуле

			$M(\rho)=(1 - \varphi) \cdot s$
При	$s=2$	имеем	$M(\rho)=(1 - 0,88) \cdot 2=0,24$
»	$s=3$	»	$M(\rho)=(1 - 0,59) \cdot 3=1,23$
»	$s=4$	»	$M(\rho)=(1 - 0,44) \cdot 4=1,68$
»	$s=5$	»	$M(\rho)=(1 - 0,36) \cdot 5=3,2$

Тогда стоимость простоя рабочими в очереди и простоя кладовщиков в течение минуты определим по формуле

$$C = c_1 M(\nu) + c_2 M(\rho) = 6 M(\nu) + 4 M(\rho)$$

При	$s=2$	имеем	$C=6 \cdot 6,66+4 \cdot 0,24=40,92$
»	$s=3$	»	$C=6 \cdot 0,59+4 \cdot 1,23=8,42$
»	$s=4$	»	$C=6 \cdot 0,13+4 \cdot 1,68=7,50$
»	$s=5$	»	$C=6 \cdot 0,03+4 \cdot 3,2=12,98$

Очевидно, что функция стоимости достигает минимума при  $s=4$ .

### ***2.3. Задачи по экспертным методам ранжировки факторов, влияющих на значения нормативов надёжности.***

**Организация и результаты опроса экспертов о влиянии объективных факторов на значения нормативов безотказности элементов конструкции модернизируемого или проектируемого автомобиля.**

При задании требований по безотказности и долговечности машины исходят в основном из внешних факторов, характеризующих ее

использование. Главный из них – продолжительность эксплуатации до предельного состояния (долговечность) или до заданной средней наработки на отказ (безотказность). После того, как норматив безотказности для машины в целом установлен, необходимо определить нормативы ее основных элементов конструкции.

Требования, по надежности систем и элементов, особенно модернизируемых, назначаются «от достигнутого» на аналогах и прототипах с учетом ожидаемого совершенствования технологии изготовления, роста надежности материалов и комплектующих изделий и других факторов. В случаях создания совершенно новых систем или элементов, информация о надежности которых недостаточно известна, назначение требований может осуществляться путем экспертного опроса. При этом обоснованность принимаемых решений зависит от компетентности, научной и инженерной интуиции экспертов.

Математическая теория полезности, разработанная П.Фишборном [11], рекомендует в сложных случаях, когда аналитический расчет затруднен из-за неполной информации, применять метод предпочтений, т.е. произвести ранжирование объектов по принципу «больше» или «меньше» и решать задачу на этой основе.

Чтобы применить метод предпочтений при распределении требований к безотказности элементов при заданном нормативе для системы в целом необходимо определить критерии, по которым будет производиться ранжирование.

Применительно к рассматриваемому вопросу для проектируемого или моделируемого автомобиля целесообразно учесть ряд факторов, влияющих на значения нормативов безотказности и долговечности, и «вес» каждого из них. Проведен анализ литературных и собственных данных и определены такие факторы.

Эти факторы приводятся ниже в случайном порядке, т.е. «весу», перечисленный первым фактор не обязательно является первым по значению.

**Стоимость устранения отказа** (или удельная стоимость устранения отказа, отнесенная к одному часу работы машины, сум/ч или км. пробега). Этот фактор характеризует экономический ущерб от отказа данного элемента. Убытки от отказа отдельных элементов могут превышать стоимость самого элемента. Так, например стоимость замены некоторых резинотехнических изделий (сальники клапанов) могут намного превосходить стоимость самих отказавших элементов.

**Стоимость элемента.** В общем случае она характеризует его сложность. Дорогое изделие можно представить как сумму сравнительно дешевых (простых) составляющих изделий. Поэтому норматив безотказности дорогого (сложного) изделия, должен быть ниже норматива для простого (дешевого) изделия (при прочих равных условиях).

**Достигнутый уровень показателей безотказности элемента.** Этот фактор является базой, от которой можно рассчитывать рост безотказности.

**Перспектива повышения надежности элемента** (или наличие аналогов в других отраслях с более высоким уровнем безотказности). Тем элементам конструкции, которые включены в планы работ по повышению их надежности научно-исследовательскими, конструкторскими организациями и заводом изготовителем, логично назначать более высокие нормативы безотказности с учетом перспективы проводимых в этом направлении работ. Повышение норматива безотказности может быть обусловлено также возможностью заимствования опыта передовых отраслей промышленности.

**Базовая модель автомобиля на основе, которой проводится модернизация.** Решающее влияние на нормативы показателей безотказности оказывает выбор базовой модели автомобиля, поскольку от заложенных в нее качественных характеристик и степени

совершенствования модели будет зависеть прогнозируемая безотказность модернизируемого автомобиля.

При рассмотрении конкретных базовых моделей вводятся корректирующие коэффициенты, зависящие от природно-климатических условий места эксплуатации модернизируемого автомобиля.

**Оснащенность производства, на котором проводится модернизация автомобиля.** От оснащенности производства, на котором проводится модернизация автомобиля зависит точность изготовления, обеспечение требуемого качества деталей и сборочных единиц.

Могут быть учтены также и другие факторы.

Для определения «веса» факторов было признано, целесообразным провести экспертный опрос по специально разработанной анкете.

### **Анкета экспертного опроса.**

\_\_\_\_\_ 200\_г.

дата заполнения анкеты

---

Фамилия, имя, отчество.

---

Место службы, должность.

---

Стаж работы, связанный с машиностроением.

---

Ученое звание, степень

---

Количество публикаций по надежности и долговечности машин

Рассматривается задача, как распределить требования к надежности элементов модернизируемого автомобиля, чтобы обеспечить заданный норматив для автомобиля в целом. При этом предполагается учесть мнение экспертов о факторах, влияющих на надежность элементов.

1. Каково Ваше мнение о степени важности перечисленных факторов при определении безотказности элемента конструкции.

Оцените перечисленные факторы ранжированием по степени важности. Цифрой 1 обозначьте важнейший, по Вашему мнению, фактор, цифрой 2 - второй и т.д. Если Вы считаете какие-либо факторы равнозначными, то присвойте им одинаковые номера (например, двум факторам проставляется номер 3-4). Факторы в перечне приведены в случайном порядке.

2. Какова, по Вашему мнению, роль каждого фактора при определении норматива безотказности элемента конструкции?

Оцените эту роль по 10 – балльной шкале в графе «Б». Присвойте оценку 10 баллов фактору, которому установлен номер 1 по степени важности. Затем назначьте оценку в баллах второму по степени важности фактору сравнительно с первым и т.д.

Некоторые пояснения к анкете. Оценка факторов производится в два этапа. На первом этапе эксперт должен присвоить номер 1 (по левой графе) тому фактору, который, по мнению эксперта, является самым важным. Затем определяется второй по значимости и т.д. При этом все факторы будут ранжированы с интервалом, равным единице. После этого следует перейти к правой графе «Б» и в ней фактору, получившему первый номер, присвоить 10 баллов. Затем оценить по десятибалльной шкале следующий, второй фактор и т.д. Использование на втором этапе десятибалльной шкалы позволит лучше дифференцировать «вес» факторов, используя в случае необходимости неравномерный шаг (интервал) между факторами.

<b>№ по степени важности</b>	<b>Факторы, влияющие на нормативы показателей безотказности.</b>	<b>Б</b>
	Удельная стоимость устранения отказа элемента	
	Стоимость элемента конструкции	
	Достигнутый уровень значений показателей, безотказности элементов автомобиля	
	Перспектива повышения надежности элемента	

	конструкции.	
	Технико-экономические возможности по повышению надежности до нужного уровня	
	Базовая модель автомобиля на основе, которой проводится модернизация	
	Оснащенность производства, на котором проводится модернизация автомобиля	

По предложенной анкете было опрошено 25 экспертов (специалистов в области надёжности и конструирования автомобиля) о факторах, влияющих на нормативы показателей безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля.

Экспертами были выбраны 7 факторов, которые в результирующей матрице (таблица 2.24) обозначены следующим образом:

$X_1$  – удельная стоимость устранения отказа элемента;

$X_2$  – стоимость (или сложность) элемента конструкции;

$X_3$  – достигнутый уровень значений показателей безотказности элементов автомобиля;

$X_4$  – перспектива повышения надежности элемента конструкции;

$X_5$  – технико-экономические возможности по повышению надежности до нужного уровня;

$X_6$  – базовая модель автомобиля, на основе которой проводится модернизация;

$X_7$  – оснащённость производства, на котором проводится модернизация автомобиля.

Таблица 2.24.

Результирующая матрица опроса экспертов.

№ строки (эксперта)	Факторы, влияющие на нормативы показателей безотказности элементов конструкции тюнингового автомобиля.							$\sum_{j=1}^7 X_{ij}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	
1	5	8	7	4	3	10	8	45
2	9	9	10	7	9	8	8	60
3	5	8	7	4	3	10	8	45
4	10	10	10	10	10	8	8	66

5	5	8	7	4	3	10	8	45
6	8	4	9	5	10	7	6	49
7	5	8	7	4	3	10	8	45
8	5	5	10	4	8	6	7	45
9	8	10	9	8	5	6	6	52
10	10	8	7	5	4	6	3	43
11	4	4	10	8	8	6	5	45
12	7	9	7	10	8	7	6	54
13	7	8	6	9	10	3	6	49
14	5	5	10	7	8	9	7	51
15	5	10	5	5	8	10	8	51
16	5	8	7	4	3	10	8	45
17	7	10	9	6	5	5	5	47
18	5	8	7	4	3	10	8	45
19	6	6	10	8	8	10	8	56
20	4	5	6	8	9	10	7	49
21	10	9	8	10	9	9	9	64
22	8	8	5	2	3	10	10	46
23	7	6	10	4	5	9	8	49
24	5	8	7	4	3	10	8	45
25	5	8	7	4	3	10	8	45
$\sum_{l=1}^{25} X_{ij}$	160	190	197	148	151	209	181	1236

Как видно из результирующей матрицы, эксперты под номерами 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17 не достаточно хорошо знакомы с направлением по модернизации конструкции автомобиля и их оценка может снизить шаг ранжирования (в баллах) между факторами, влияющими на нормативы показателей безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля. Поэтому в дальнейших расчетах анкеты этих экспертов не будут учитываться.

В связи с этим составляется уточненная результирующая матрица (табл.2.25).

Таблица 2.25.

Уточненная результирующая матрица опроса экспертов.

№ строки эксперта)	Факторы, влияющие на нормативы показателей безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля.							$\sum_{j=1}^7 X_{ij}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	

1	5	8	7	4	3	10	8	45
2	9	9	10	7	9	8	8	60
3	5	8	7	4	3	10	8	45
4	5	8	7	4	3	10	8	45
5	5	8	7	4	3	10	8	45
6	5	5	10	7	8	9	7	51
7	5	10	5	5	8	10	8	51
8	5	8	7	4	3	10	8	45
9	5	8	7	4	3	10	8	45
10	6	6	10	8	8	10	8	56
11	4	5	6	8	9	10	7	49
12	10	9	8	10	9	9	9	64
13	8	8	5	2	3	10	10	46
14	7	6	10	4	5	9	8	49
15	5	8	7	4	3	10	8	45
16	5	8	7	4	3	10	8	45
$\sum_{j=1}^{16} X_j$	94	122	120	83	83	155	129	786

Порядок проведения экспертизы следующий.

1. По данным таблицы 2 факторы, влияющие на нормативы показателей безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля ранжируются следующим образом:

$$1) \quad X_6 = \sum_{i=1}^{16} X_{i6} = 155 ;$$

$$2) \quad X_7 = \sum_{i=1}^{16} X_{i7} = 129 ;$$

$$3) \quad X_2 = \sum_{i=1}^{16} X_{i2} = 122 ;$$

$$4) \quad X_3 = \sum_{i=1}^{16} X_{i3} = 120 ;$$

$$5) \quad X_1 = \sum_{i=1}^{16} X_{i1} = 94 ;$$

$$6) \quad X_5 = \sum_{i=1}^{16} X_{i5} = 83 ;$$

$$7) \quad X_4 = \sum_{i=1}^{16} X_{i4} = 83 .$$

По этим данным можно заключить, что на нормативы показателей безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля наибольшее влияние оказывает фактор  $X_6$ , а наименьшее – факторы  $X_{4,5}$ .

2. Проведем оценку степени согласованности экспертов с использованием коэффициента конкордации  $W$ , рассчитываемого по формуле (1.15), так как в матрице рангов имеются равные значения рангов для различных факторов у одного и того же эксперта.

Определим по формуле (1.17)  $T_i$  ( $i = \overline{1,12}$ ), а  $S$  - по (1.16).

У первого эксперта ранг 8 встречается 2 раза. В этом случае

$$T_1 = \frac{1}{12}(2^3 - 2) = \frac{1}{2}$$

У второго эксперта ранг 9 встречается 3 раза, а ранг 8 два раза. В этом случае

$$T_2 = \frac{1}{12}[(3^3 - 3) + (2^3 - 2)] = 2,5$$

У третьего эксперта ранг 8 встречается 2 раза, поэтому

$$T_3 = \frac{1}{12}(2^3 - 2) = \frac{1}{2}$$

Аналогичным образом определим

$$T_4 = T_5 = T_8 = T_9 = T_{15} = T_{16} = \frac{1}{2};$$

$$T_6 = T_{13} = 1;$$

$$T_7 = T_{10} = 3;$$

$$T_{12} = 5,5;$$

$$T_{11} = T_{14} = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n T_i = 20,0.$$

По формуле (1.16) вычисляется значение  $S$ .

Значение

$$\sum_{j=1}^1 \left( \sum_{i=1}^n X_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \right)^2 = \left( 94 - \frac{1}{7} \cdot 786 \right)^2 = 334,9;$$

Значение

$$\sum_{j=1}^2 \left( \sum_{i=1}^n X_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \right)^2 = \left( 122 - \frac{1}{7} \cdot 786 \right)^2 = 94,1;$$

Значение

$$\sum_{j=1}^3 \left( \sum_{i=1}^n X_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \right)^2 = \left( 120 - \frac{1}{7} \cdot 786 \right)^2 = 59,3;$$

Аналогично для  $j = 4 \div 7$ . Эти значения равны: 858,5; 858,5; 1823,3; 278,9.

$$S=4307,5$$

Коэффициент конкордации определяется по формуле (1.15)

$$W = \frac{4307,5}{\frac{1}{12} \cdot 16^2 (7^3 - 7) - 16 \cdot 20} = 0,63.$$

3. Проверим значимость отличия коэффициента конкордации от нуля.

Для этого вычисляем количественное значение z-критерия Фишера по формуле (1.19)

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{(16 - 1) \cdot 0,63}{1 - 0,63} = 1,6.$$

Кроме того, вычислим степени свободы  $g_1$  и  $g_2$  по формулам (1.20) и (1.21).

$$g_1 = (7 - 1) - \frac{2}{16} \approx 6$$

$$g_2 = (16 - 1) \cdot 6 = 90$$

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  для  $g_1 = 6$  и  $g_2 = 90$  по табл. П.5. найдем, что  $Z_\alpha = 0,37$ .

Поскольку полученное  $z=1,60$  больше  $Z_\alpha = 0,37$ , то с вероятностью  $p \geq 0,95$  можно утверждать, что имеется неслучайная согласованность во мнениях экспертов.

На основании проведенного статистического анализа экспертных мнений по степени влияния факторов, влияющих на нормативы показателей безотказности элементов конструкции модернизируемого автомобиля, факторы следует расположить следующим образом: (по возрастанию степени важности)

$$X_4, X_5, X_1, X_3, X_2, X_7, X_6.$$

Вес каждого из этих факторов  $Q_j$  определяется по формуле:

$$Q_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}}{n}$$

Значения  $\sum_{i=1}^n X_{ij}$  выбираются по уточненной результирующей матрице опроса экспертов (табл. 2.25).

$$Q_1=5,88; Q_2=7,63; Q_3=7,50; Q_4=6,92; Q_5=6,92; Q_6=9,69, Q_7=8,06.$$

Вычисленные значения  $Q_i$  используются в расчётах при распределении требований по безотказности между составными частями проектируемого или модернизируемого автомобиля.

## *2.4. Задачи по распределению требований по надёжности между составными частями модернизируемого или проектируемого автомобиля.*

### **2. 4.1. Применение теории полезности при распределении требований к безотказности составных элементов автомобиля на основе учёта их сложности.**

На этапе проектирования должны закладываться основы высокого качества автомобиля, фундамент его надёжности. При проектировании автомобиля и его основных составных частей конструкторы располагают информацией, позволяющей составить его структурно – функциональную схему.

По этой схеме можно установить сложность конструкции автомобиля и его основных составных частей.

Учёт такого признака, как сложность элементов, может привести к более объективному распределению требований к безотказности, а учитывая, что чем сложнее элемент, тем труднее обеспечить величину  $P_{эi}$  (вероятность безотказной работы элемента) и, следовательно, тем выше будет его стоимость – к снижению общей стоимости автомобиля.

В этом случае требуемая вероятность безотказной работы основных элементов конструкции рассчитывается по формуле

$$P_{эi} = P_{с\text{тр}}^{Ki}$$

где  $Ki$  – коэффициент, характеризующий количественную меру сложности  $i$  – го основного элемента автомобиля (коэффициент сложности);  $P_{с\text{тр}}$  – требуемая вероятность безотказной работы проектируемого автомобиля.

Определение величины  $Ki$  возможно при наличии таких исходных данных, как число категорий элементов по надёжности, количество элементов каждой категории надёжности в каждой составной части, зависимость показателей надёжности элементов от условий эксплуатации и др. Получение такой информации даже для образцов – аналогов весьма затруднительно, при наличии в системе принципиально новых элементов и вовсе невозможно.

В этой ситуации для определения количественной меры сложности элементов на ранних этапах проектирования автомобиля весьма продуктивным может оказаться применение теории полезности.

Рассмотрим возможный подход к получению оценки величин  $K_i$  на основе положений теории полезности [10, 11]. Полезность – субъективная оценка объекта (элемента), мера, с помощью которой определяется качество объекта. Она заменяет собой всё конечное множество признаков, характеризующих объект. Каждому объекту оценки  $\varphi_i$  соответствует действительное неотрицательное число  $U(\varphi_i)$ , которое рассматривается как показатель полезности. Если объект  $\varphi_i$  более важен, чем объект  $\varphi_j$ , то  $U(\varphi_i) > U(\varphi_j)$ .

Если множество альтернатив с точки зрения предпочтений представляет собой цепь (случай полной транзитивности) вида  $\varphi_1 \geq \varphi_2 \dots \geq \varphi_m$ , где  $m$  – количество рассматриваемых объектов, то для оценки значений функций полезности может использоваться выражение

$$U(\varphi_k) = 2(m - k + 1) / m(m + 1), \quad K = 1, \dots, m$$

Применительно к задаче распределения требований к надёжности, когда имеются достаточные основания для определения степени предпочтения элементов по сложности. Коэффициент сложности определяется выражением

$$K_i = 2(n - i + 1) / n(n + 1); \quad 0 < K_i < 1, \quad \sum_{i=1}^n K_i = 1$$

Вполне очевидно, что элементу большей сложности должен соответствовать меньший уровень безотказности, так как затраты на обеспечение безотказности такого элемента выше. [10]

Данный метод имеет значительные преимущества, которые заключаются в том, что его можно применять даже при отсутствии многих видов априорной информации. В реальных объектах машиностроения можно всегда произвести сопоставление элементов системы по их сложности. Применение этого метода позволяет уменьшить стоимость разработки изделий в сравнении с расчётом при обеспечении одинаковых уровней надёжности элементов. При этом достоверность расчёта зависит от

правильности оценки информационной ситуации и, следовательно, от выбранной (используемой) зависимости оценки.

Предлагаемый способ распределения требований к безотказности элементов автомобиля целесообразно использовать на ранних этапах проектирования, когда из-за отсутствия необходимых данных не удаётся найти оптимальное распределение норм безотказности элементов, обеспечивающих требуемую безотказность автомобиля в целом, но имеются основания для определения предпочтения между элементами по сложности или другой достоверной информации, позволяющей ранжировать элементы системы между собой.

Достоверной информацией по автомобилю – аналогу могут служить такие данные, как:

распределение элементов по сложности;

- распределение числа отказов по агрегатам автомобиля, %,
- средняя трудоёмкость работ по устранению одного отказа,
- распределение общей трудоёмкости устранения отказов по агрегатам автомобиля,
- распределение расхода запасных частей по агрегатам автомобиля.

#### **2.4.2. Примеры обоснования и расчёта нормативов безотказности основных составных частей проектируемого автомобиля.**

В основу настоящей методики положено требование о том, что значения показателей безотказности составных частей проектируемого автомобиля должны различаться между собой в зависимости от объективного фактора – сложность изделия. Значения вероятностей безотказной работы для конкретных составных частей зависят от трёх переменных: вероятности безотказной работы системы  $P_{c_{np}}$ , числа составных частей  $n$  и места

(номера)  $i$ -ой составной части в ряду предпочтений (в ранжированном ряду соответствующего уровня иерархии структурно-функциональной схемы автомобиля), т.е.

$$P_{эi} = f(P_{сmp,n,i}), i = 1, n$$

Расчет вероятностей безотказной работы составных частей проектируемого автомобиля, от которых можно затем перейти к определению средних наработок на отказ предлагается проводить в следующей последовательности:

1. Выбирается (или назначается на основании данных о безотказности автомобилей-аналогов) время  $T$  (наработка), для которого определяется  $P_{сmp}$  - вероятность безотказной работы системы (автомобиля, агрегата);

2. Составляется структурно-функциональная схема системы (автомобиля, агрегата);

3. Производится ранжирование основных составных элементов конструкции по соответствующим уровням иерархии структурно-функциональной схемы (автомобиля, агрегата);

4. С использованием формулы  $K_i = 2(n-i+1)/n(n+1)$  определяются значения коэффициентов  $K_i$ ;

5. По формуле  $P_{эi} = P_{сmp}^{K_i}$  находятся требуемые значения вероятностей безотказной работы элементов системы (по уровням иерархии структурно-функциональной схемы автомобиля, агрегата). (табл.2.25)

6. Производится коорректирование требуемых вероятностей безотказной работы элементов  $P_{эi}$  в зависимости от статистического материала

7. Средняя (нормативная) наработка на отказ  $T_{эi}$   $i$ -ой составной части системы (автомобиля, агрегата) определяется по известной функции или плотности распределения наработок на отказ  $i$ -го элемента системы. Числовые значения параметров распределения принимаются по

справочникам или на основе статистических материалов по исследованию надёжности аналогов  $i$ -го элемента системы.

$$T_{\text{Э}i} = \int_0^{\infty} P_{\text{Э}i}$$

8. Проводятся оценки отклонения результирующей кривой убыли  $\prod_{i=1}^n P_{\text{Э}i}$  от кривой убыли системы, (автомобиля) -  $P_c$ .

Оценка отклонения может быть произведена по критерию согласия Колмогорова.

При использовании критерия согласия Колмогорова принято считать, что теоретическое распределение не противоречит экспериментальным данным.

$$P_c = \prod_{i=1}^n P_{\text{Э}i}$$

Теоретическим распределением считается кривая убыли системы (автомобиля), а экспериментальной, считается результирующая кривая

убыли -  $\prod_{i=1}^n P_{\text{Э}i}$ .

По графикам двух кривых-убылей определяется максимальное значение модуля (абсолютной величины) разности между теоретическими и экспериментальными данными.

$$\lambda = \max \left| \prod_{i=1}^n P_{\text{Э}i} - P_c \right|,$$

После этой процедуры, определяется критическое значение  $\lambda_a$  критерия Колмогорова при уровне значимости  $\alpha$ .

Для стандартных уровней значимости критические значения равны:  
 $\lambda_{0,05} = 0,895$ ;  $\lambda_{0,01} = 1,035$

Если  $\lambda \geq \lambda_a$ , то экспериментальная кривая-убыли не соответствует теоретической кривой-убыли на уровне значимости  $\alpha$ .

Требуется произвести расчет нормативов безотказности основных элементов конструкции 2-го уровня структурно-функциональной схемы грузового автомобиля особого большого класса (грузоподъемность 8,0 т и более).

В качестве автомобиля – аналога принимается грузовой автомобиль особого большого класса Камаз-5320.

Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Задаётся требуемый уровень безотказности для автомобиля в целом ( $P_c$  или  $T_c$ );

2. Составляется структурно-функциональная схема проектируемого автомобиля по уровням иерархии (рис. 2.27);

3. На основании данных о распределении отказов по агрегатам автомобиля, % [6] (рис. 1.19) производится ранжирование элементов конструкции автомобиля (табл. 2.26)

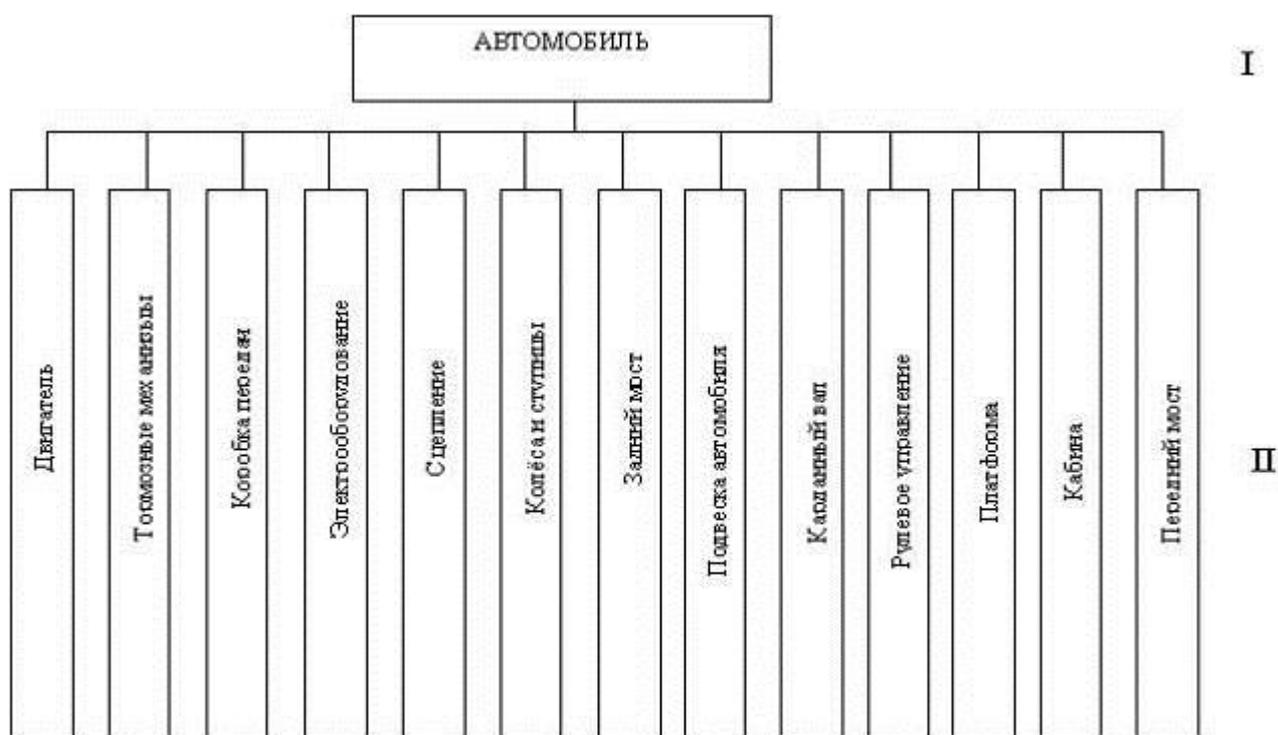


Рис 2.27 Структурно-функциональная схема проектируемого автомобиля

Таблица 2.26

## Ранжирование основных элементов конструкции автомобиля

<b>Наименование основных элементов конструкции автомобиля</b>	<b>Номер основного элемента конструкции автомобиля в ранжированном ряду.</b>
<b>1</b>	<b>2</b>
Двигатель	1
Тормозные механизмы	2
Коробка передач	3
Электрооборудование	4
Сцепление	5
Колеса и ступицы	6
Задний мост	7
Провеска автомобиля	8
Карданный вал	9
Рулевое управление	10
Платформа	11
Кабина	12
Передний мост	13

4. Определяются коэффициенты сложности  $K_i$  элементов конструкции автомобиля, (табл.2.27), по формуле 1.10

Таблица 2.27

<b>Номер элемента в ранжированном ряду</b>	<b>Значение коэффициента <math>K_i</math></b>
1	0,143
2	0,132
3	0,121
4	0,110
5	0,099

6	0,088
7	0,077
8	0,066
9	0,055
10	0,044
11	0,033
12	0,022
13	0,011

5. Определяются требуемые вероятности безотказной работы элементов конструкции автомобиля, для различных требуемых  $P_c$  (табл. 2.28). Как видно из значения  $P_{Эi}$  для определенного значения  $P_{стр}$  отличаются друг от друга по определённой закономерности, зависящей только от номера элемента в ранжированном ряду.

Однако в реальных условиях такой закономерности не наблюдается. Например, как видно из рис.2.28, отказы по двигателю имеют наибольший процент, чем у остальных элементов.

Обеспечение безотказности связано с капиталовложениями, поэтому рассчитанные нормативы  $P_{Эi}$  должны отражать тот уровень безотказности, который не повлечёт завышенных или заниженных расходов. В связи с этим рассчитанные значения  $P_{Эi}$  подвергаются корректировке.

В данном примере произведем корректировку значений  $P_{Эi}$  в зависимости от информации, представленной на рис. 1.19

6.Корректирование значений вероятностей безотказной работы  $P_{Эi}$  (табл.2.28, графа 5) проводится в следующей последовательности:

1. Для каждого элемента, на основании априорной информации определяются его значение (табл.2.28, графа 2);
2. Устанавливается соотношение между численными показателями графы 2, (графа 3);
3. По данным графы 4 определяется интервал значений  $P_{Эi}$ , соответствующих  $P_{стр} = 0,8$ .

$$P_{Эн} - P_{Э1} = 0,998 - 0,969 = 0,029.$$

4. Определяется шаг увеличения  $P_{Эi}$  от  $P_{Э1}$  до  $P_{Эн}$ .

$$S = \frac{P_{Эн} - P_{Э1}}{X_n};$$

$$S = \frac{0,029}{32,92} = 0,00088$$

где  $S$  – шаг увеличения  $P_{Эi}$  от  $P_{Э1}$  до  $P_{Эн}$ ;  $X_n$  – максимальное значение, соотношений числа отказов элементов.

5. Производится корректирование  $P_{Эi}$ , в зависимости от шага увеличения  $S$ .

$$P_{Эi}^* = P_{Э1} + S X_i$$

Рассчитанные значения  $P_{Эi}^*$  представлены в графе 5 (табл.2.28).

Как видно значение  $P_c = \prod_{i=1}^n P_{Эi}$ , рассчитанное по данным графы 5 ( $P_{Стр}^*$ ), меньше соответствующего значения, рассчитанному по данным графы 4 ( $P_{Стр}$ ).

Соотношение значений  $P_c^*$  и  $P_c$  составляет

$$Y = \frac{P_{Стр}}{P_{Стр}^*}$$

$$Y = \frac{0,8}{0,765} = 1,046$$

Таблица 2.28

Требуемые значения вероятностей безотказной работы элементов конструкции при заданном требовании к вероятности безотказной работы автомобиля в целом

Автомобиль в целом		Вероятность безотказной работы $P_c$									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
Основные элементы автомобиля	Требуемая вероятность безотказной работы, $P_{э}$	Двигатель	0,719	0,794	0,842	0,877	0,906	0,903	0,950	0,969	0,985
		Тормозные механизмы	0,738	0,809	0,853	0,886	0,913	0,935	0,954	0,971	0,986
		Коробка передач	0,758	0,823	0,864	0,895	0,920	0,940	0,958	0,973	0,987
		Электрооборудование	0,776	0,838	0,876	0,904	0,927	0,945	0,962	0,976	0,988
		Сцепление	0,796	0,853	0,888	0,913	0,934	0,951	0,965	0,978	0,990
		Колёса и ступицы	0,817	0,868	0,899	0,923	0,941	0,956	0,969	0,981	0,991
		Задний мост	0,838	0,883	0,911	0,932	0,948	0,961	0,973	0,983	0,992
		Подвеска автомобиля	0,859	0,899	0,924	0,941	0,955	0,967	0,977	0,985	0,993
		Карданный вал	0,881	0,915	0,936	0,951	0,963	0,972	0,981	0,988	0,994
		Рулевое управление	0,904	0,932	0,948	0,960	0,970	0,978	0,984	0,990	0,995
		Платформа	0,927	0,948	0,961	0,970	0,977	0,983	0,988	0,993	0,997
		Кабина	0,951	0,965	0,974	0,980	0,985	0,989	0,992	0,995	0,998
		Передний мост	0,975	0,982	0,987	0,990	0,992	0,994	0,996	0,998	0,999

Для выполнения условия

$$P_{стр}^* = \prod_{i=1}^n P_{Эi}^* = 0,8$$

значение  $Y$  пропорционально распределяем на элементы, по которым имеется перспектива повышения безотказности, т.е. для этих элементов значения  $P_{Эi}^*$  умножаются на коэффициент, позволяющий выполнить требуемое условие.

$$r = y^{\frac{1}{k}}$$

где  $r$  – коэффициент коррекции;

$k$  – число корректируемых элементов (в данном пример  $k=5$ )

$$r = 1,046^{\frac{1}{5}} = 1,0089$$

Значения вероятностей безотказной работы таких элементов вычисляются по формуле

$$P_{Эi}^{**} = P_{Эi}^* r$$

Рассчитанные значения вероятностей безотказной работы элементов  $P_{Эi}^{**}$  представлены в графе 6 (табл.2.28).

Для окончательного расчетов должно выполняться условие

$$P_{стр} = \prod_{i=1}^n P_{Эi}^{**}$$

Графическая иллюстрация зависимости  $P_{Эi}$ ,  $P_{Эi}^{**}$  при  $P_{стр}=0,8$  показаны на рис. 2.29 (по данным таблицы 2.29).

Таблица 2.29

Расчёт значений вероятностей безотказной работы основных элементов конструкции автомобиля ( $P_i=0,8$ ).

Показатели Наименование элементов	Число отказов, %	Соотношение отказов, элементов	Значения $P_{Эi}$		
			$P_{Эi}$	Корректированные $P_{Эi}^*$	Принятые к расчету $P_{Эi}^{**}$
1	2	3	4	5	6
Двигатель	42,8	1	0,969	0,969	0,969
Тормозные механизмы	8,4	5,10	0,971	0,9735	0,9735
Коробка передач	7,5	5,71	0,973	0,9740	0,9828
Электрооборудование	7,5	5,71	0,976	0,9740	0,9740
Сцепление	6,4	6,69	0,978	0,9749	0,9837
Колёса и ступицы	5,7	7,51	0,981	0,9756	0,9756
Задний мост	5,2	8,23	0,983	0,9762	0,9850
Подвеска автомобиля	4,7	9,11	0,985	0,9770	0,9819
Карданный вал	3,4	12,59	0,988	0,9800	0,9850
Рулевое управление	3,4	12,59	0,990	0,9800	0,9800
Платформа	2,4	17,83	0,993	0,9847	0,9847
Кабина	1,3	32,92	0,995	0,9980	0,9980
Передний мост	1,3	32,92	0,998	0,9980	0,9980
$P_c = \prod_{i=1}^n P_{Эi}$	-	-	0,8	0,765	0,794

Как видно из таблицы 2.29 и из рис. 2.29 рассчитанные значения  $P_{Эi}$  при заданном требовании к Рстр отличаются друг от друга (по мере возрастания численных значений) с некоторым равномерным шагом. В реальных технических системах, состоящих из различных по конструкции элементов, такой закономерности не наблюдается.

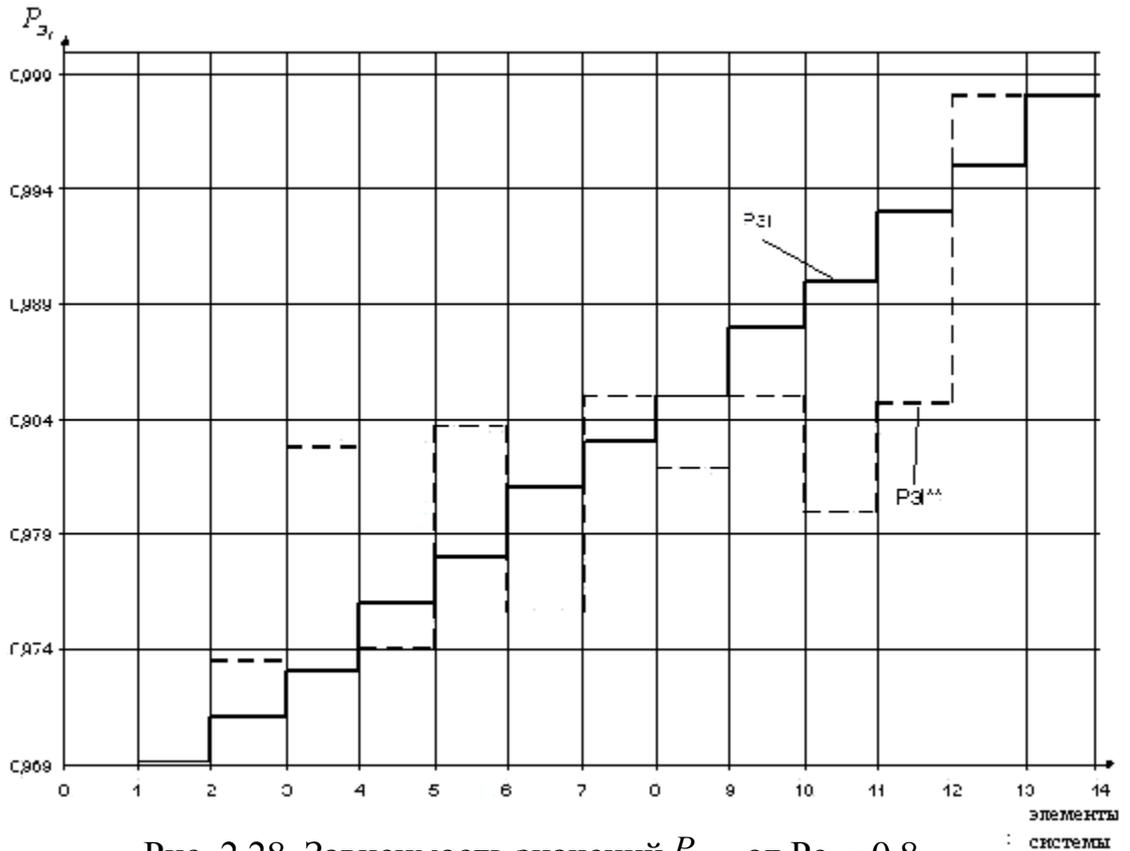


Рис. 2.28. Зависимость значений  $P_{эi}$  от  $R_{с,тр}=0,8$

Корректирование  $P_{эi}$  в зависимости от достоверной априорной информации позволяет установить более реальные требуемые  $P_{эi}^{**}$  достижения которых помогут избежать заниженных или завышенных расходов при обеспечении требуемого уровня  $P_{эi}^{**}$  на стадии изготовления основных элементов конструкции.

**Пример 2.195.** Расчет вероятностей безотказной работы элементов легкового автомобиля с использованием веса факторов  $Q_i$ .

Расчет  $R_{эi}$  при заданном значении  $R_c$  проводится в следующей последовательности:

1. Задается требуемый уровень безотказности проектируемого автомобиля,  $R_c=0,7$
2. Составляется структурно-функциональная схема проектируемого автомобиля, согласно рис 1.19.
3. Рассчитываются коэффициенты предпочтения элементов системы  $A_i$ . Процедура расчетов коэффициентов  $A_i$  представлена в методике (таблица П 6).

В работе [16] определены «веса» факторов  $Q_i$ , влияющих на нормативы безотказности основных элементов проектируемого автомобиля.

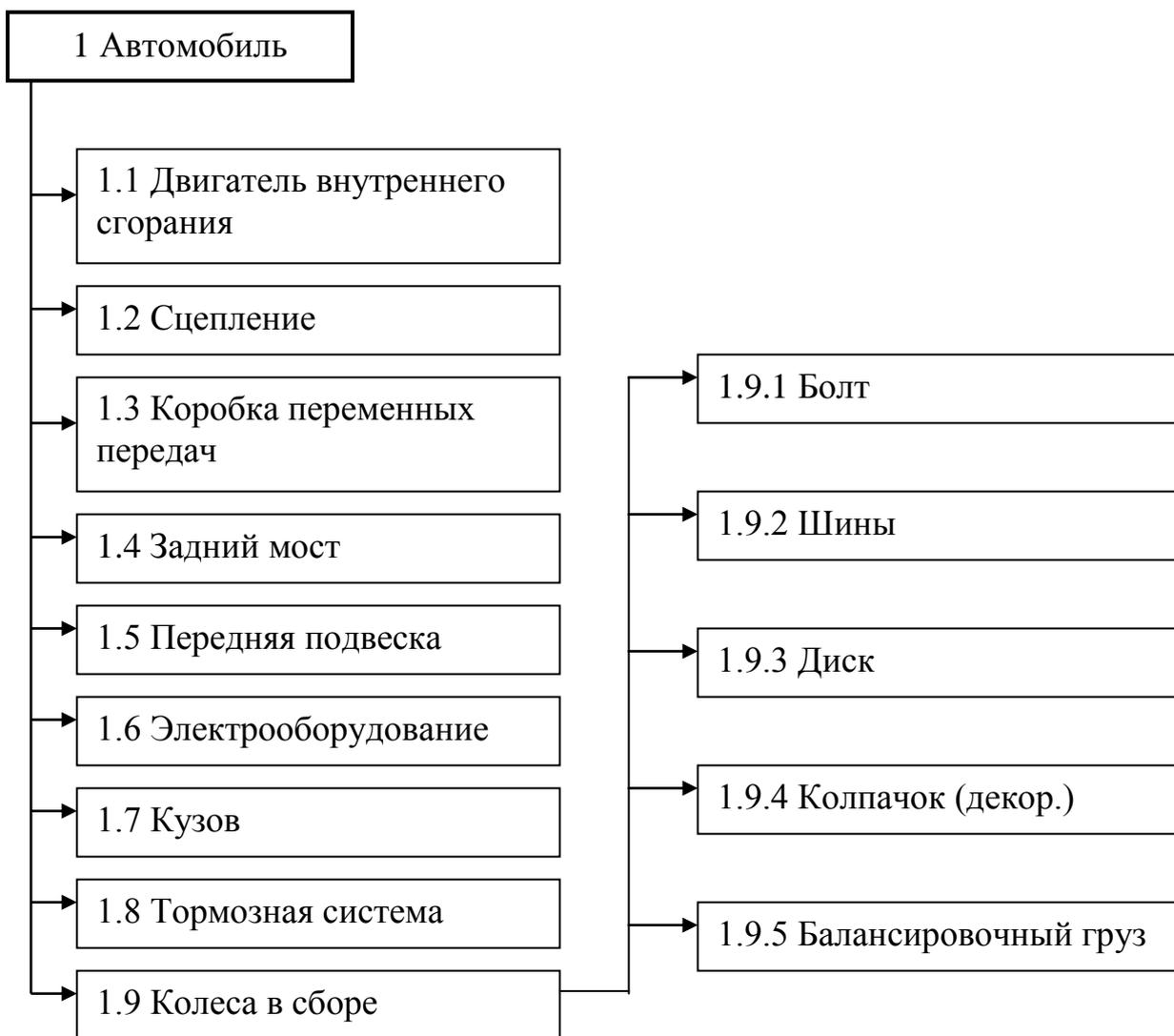


Рис. 2.29

Результаты расчета коэффициентов  $A_i$  для II и III уровня иерархии, представлены в (таблицах 2.30, 2.31).

Таблица 2.30

	ДВС	Сцепление	КП	Задний мост	Передний мост	Электрооборудование	Кузов	Тормозная система	Колеса	Сумма
Кол-во	1920	34	300	70	312	463	299	353	36	3787
%	50,69	0,8976	7,92	2,268	8,237	11,2242	7,8936	9,3192	1,550	100
$A_i$	386,764	6,8486	60,429	17,3048	62,8483	85,641	60,2282	71,105	11,826	1970,6

Таблица 2.31.

	Болты	Шины	Диски	Колпачки (декор.)	Балансиру ющие груз
Кол-во	16	8	4	4	4
%	44,40	22,24	11,12	11,12	11,12
$A_i$	338,772	169,6912	84,846	84,846	84,846

4. Определяются численные значения вероятностей безотказной работы элементов II и III уровня иерархии. Расчет проводится в следующей последовательности:

- В зависимости от значения  $A_i$  производится ранжирование элементов в порядке значимости рис. 2.30

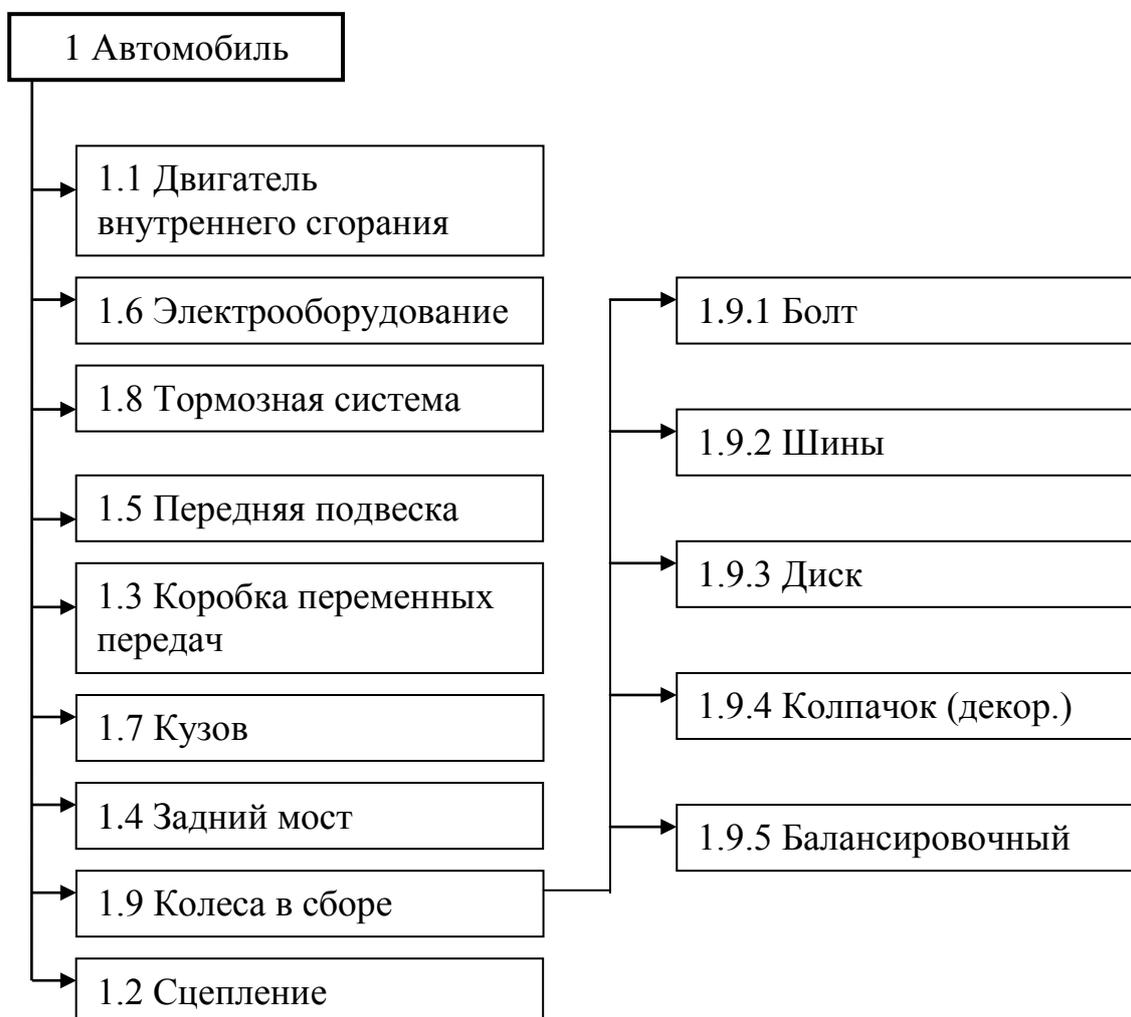


Рис. 2.30

- По формуле  $R_{эi} = P_c^{k_i}$  определяем  $R_{эi}$ , в зависимости от коэффициента  $k_i$ , который вычисляется по формуле:

$$\kappa_i = \frac{2(n - i + 1)}{n(n + 1)}$$

где  $n$ - число элементов в ранжированном ряду;  $i$  – место элемента в ранжированном ряду.

Для II уровня иерархии

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
0,2	0,18	0,16	0,13	0,11	0,09	0,07	0,04	0,02

$$P_{c1} = \prod_{i=1}^9 P_{\varepsilon_i}$$

$$P_{\varepsilon_1} = 0,7^{0,2} = 0,931$$

$$P_{\varepsilon_2} = 0,7^{0,18} = 0,938$$

$$P_{\varepsilon_3} = 0,7^{0,16} = 0,945$$

$$P_{\varepsilon_4} = 0,7^{0,13} = 0,955$$

$$P_{\varepsilon_5} = 0,7^{0,11} = 0,962$$

$$P_{\varepsilon_6} = 0,7^{0,09} = 0,968$$

$$P_{\varepsilon_7} = 0,7^{0,07} = 0,975$$

$$P_{\varepsilon_8} = 0,7^{0,04} = 0,986$$

$$P_{\varepsilon_9} = 0,7^{0,02} = 0,993$$

$P_1$  и  $P_2$  – это вероятности безотказной работы соответственно самого надежного и самого ненадежного элемента в ранжированном ряду.

Для того чтобы определить  $P_2 \dots P_3$  с использованием коэффициентов  $A_i$  расчет проводится в следующей последовательности согласно Таблицы 1.

$$P_1 = \frac{B_n - B_1}{\lg A_n - \lg A_1} (\lg A_n - \lg A_1) + B_1 \quad \frac{B_n - B_1}{\lg A_n - \lg A_1} = R$$

$$B_i = R(\lg A_n + \lg A_1) + B_1 \quad P_{\varepsilon_i} = B_1 = 0,931$$

$$R = 0,0354$$

$$P_1 = 0,931$$

$$P_2 = R(\lg A_8 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,07 - 0,836) + 0,931 = 0,939$$

$$P_3 = R(\lg A_7 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,24 - 0,836) + 0,931 = 0,945$$

$$P_4 = R(\lg A_6 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,78 - 0,836) + 0,931 = 0,964$$

$$P_5 = R(\lg A_5 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,78 - 0,836) + 0,931 = 0,964$$

$$P_6 = R(\lg A_4 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,80 - 0,836) + 0,931 = 0,965$$

$$P_7 = R(\lg A_3 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,85 - 0,836) + 0,931 = 0,967$$

$$P_8 = R(\lg A_2 + \lg A_1) + B_1 = 0,0354(1,93 - 0,836) + 0,931 = 0,970$$

$$P_9 = 0,993$$

$$\prod_{i=1}^9 P_{\text{э}_{iTP}} \approx 0,7$$

На рис. 2.31 показана графическая иллюстрация расчета.

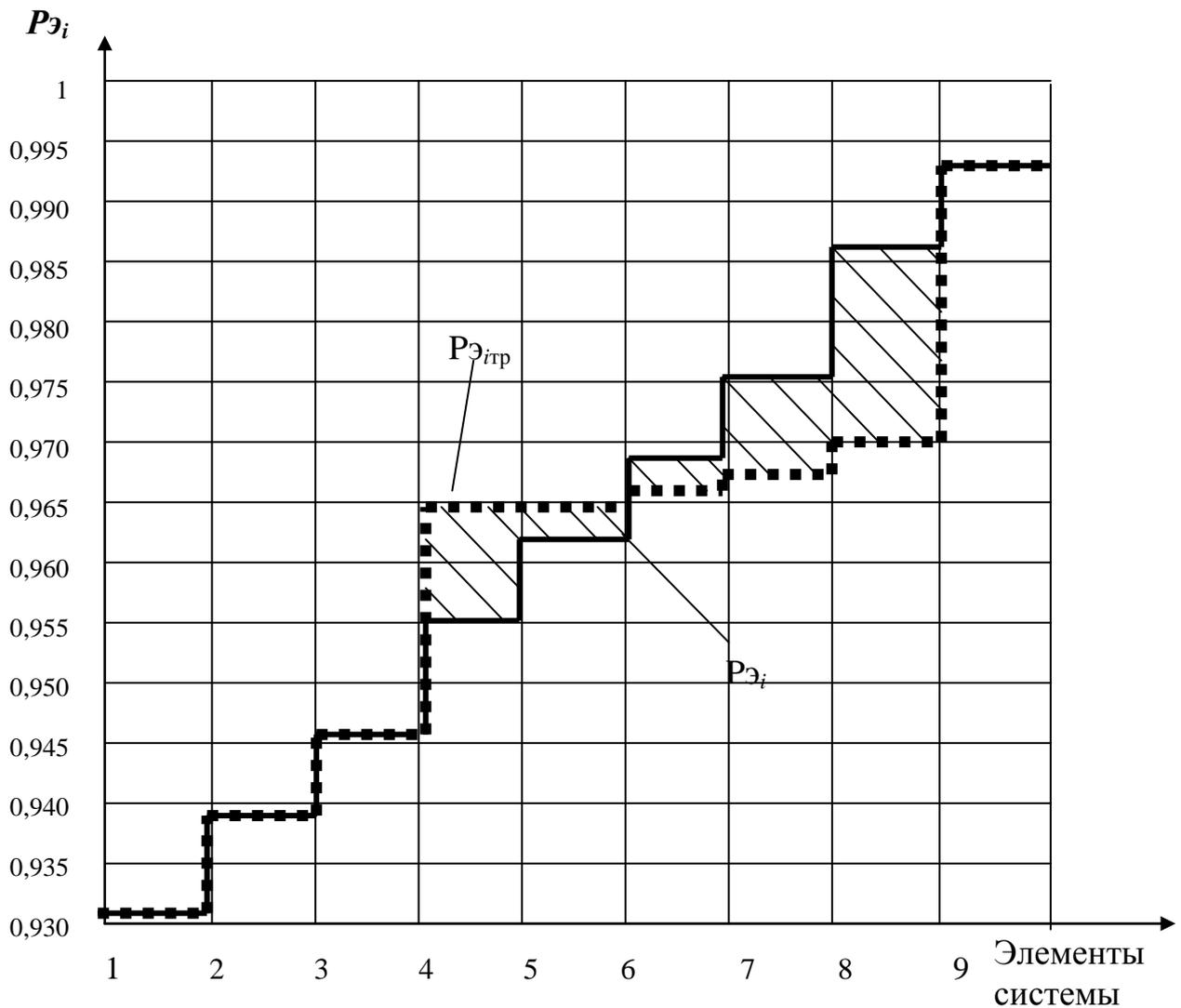


Рис. 2.31. Графическая иллюстрация расчета

Анализ рис. 2.31 показывает, что разница в значениях вероятности безотказной работы элементов при использовании двух методов расчетов получена значительная (заштрихованная область). Это подтверждает возможность разработанной методике по дифференциации нормативов безотказности составных частей в зависимости от объективных факторов,

которые целесообразно учитывать при расчете нормативов. Так как, разработанная методика учитывает экономику обеспечения безотказности элементов при заданном нормативе безотказности для машин в целом (через факторы, которые могут быть предложены экспертам), то этот подход позволяет избежать неоправданных затрат в сфере производства на обеспечение завышенных нормативов безотказности элементов машины при дополнительных затратах в сфере эксплуатации, если норматив безотказности занижен.

Произведем расчет для элементов автомобиля III уровня иерархии

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
0,33	0,267	0,2	0,133	0,067

$$P_{c_{1,9}} = \prod_{i=1}^5 P_{\rho_i}$$

$$P_1 = \frac{B_n - B_1}{\lg A_n - \lg A_1} (\lg A_n - \lg A_1) + B_1 \quad \frac{B_n - B_1}{\lg A_n - \lg A_1} = R$$

$$R = 0.00615$$

$$P_1 = 0,986^{0,33} = 0,9954$$

$$P_2 = R(\lg A_2 - \lg A_1) + B_1 = 0,00615(2,229 - 2,529) + 0,9954 = 0,9972$$

$$P_3 = R(\lg A_3 - \lg A_1) + B_1 = 0,00615(1,928 - 2,529) + 0,9954 = 0,999$$

$$P_4 = R(\lg A_4 - \lg A_1) + B_1 = 0,00615(1,928 - 2,529) + 0,9954 = 0,999$$

$$P_5 = 0,986^{0,067} = 0,999$$

$$\prod_{i=1}^5 P_{\rho_i} \approx 0,986$$

Для определения вероятности безотказной работы одной шины воспользуемся формулой:

$$P_{\rho} = \sqrt[4]{P_2}$$

где-  $P_2$  – это вероятность безотказной работы четырех шин

$$P_{\rho} = \sqrt[4]{0,9972} = 0,999299$$

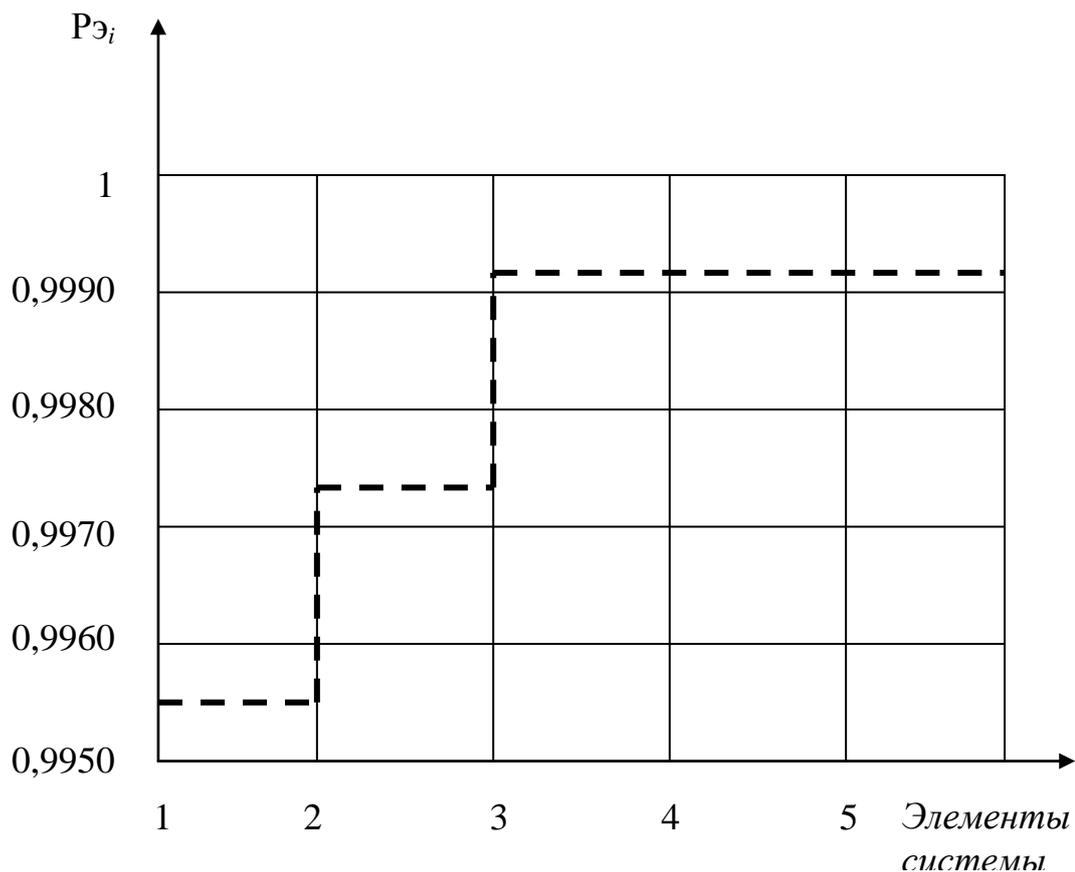


Рис. 2.32. Расчетные значения ВБР элементов колеса

Задача решена:  $P_{ср} = 0,4$ .

**Пример 2.196.** Расчет средних наработок на отказ элементов карданной передачи проектируемого автомобиля особо большого класса графическим методом.

Расчет средних наработок на отказ элементов конструкции проектируемого автомобиля, выполняются в следующей последовательности:

1. В качестве аналога проектируемого автомобиля принимается автомобиль КамАЗ-5320.

Информация о характеристиках надежности автомобиля приведена в литературе [9] (часть 1).

2. Применяем законы распределения наработок до отказа или между отказами для автомобиля и элементов его конструкции.

Распределение Вейбулла занимает центральное место при исследовании характеристик надежности машин, автомобилей и их

агрегатов. Формулы для определения показателей безотказности случайных величин, подчиняющихся этому распределению представлены в главе 3.

При известном коэффициенте вариации  $\nu$ , коэффициенты  $b$ ,  $K_b$ ,  $C_b$  определяются из приложения 3 [29].

Для данного примера принимаем  $\nu = 0.281$ . При этом значении  $\nu$ ,  $b = 4.0$ ,  $K_b = 0.906$ ,  $C_b = 0.255$ .

**3.** По принятому закону распределения наработок до отказа или между отказами и по заданному значению требуемой средней наработке на отказ, строится график вероятности безотказной работы проектируемого автомобиля.

Пример определения точечных значений графика «кривой убыли» проектируемого автомобиля.

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t-c}{a}\right)^d}$$

$$\nu = \frac{\sigma_t}{t_{cp}}$$

$t_{cp} = 10000$  км (требуемое значение средней наработки на отказ для проектируемого автомобиля).

$$\sigma_t = \nu * t_{cp} = 0,281 * 10000 = 2810 \text{ км}$$

$$\sigma_t = a * C_b$$

$$a = \frac{\sigma_t}{C_b} = \frac{2810}{0.255} = 11019.6 \text{ км}$$

$$t_{cp} = a * K_b + C$$

$$C = t_{cp} - a * K_b = 10000 - 11019.6 * 0.906 = 16.2 \text{ км}$$

$$P(t = 5000) = e^{-\left(\frac{5000 - 16.2}{11019.6}\right)^4} = 0.96$$

$$P(t = 10000) = e^{-\left(\frac{10000 - 16.2}{11019.4}\right)^4} = 0.5$$

Аналогично значение  $P(t)$  определяется для различных  $t$ .

Результаты расчета  $P(t)$  для различных  $t$ , представлены в таб. 2.32.

Таблица 2.32.

Расчетные значения вероятностей безотказной работы проектируемого автомобиля, при различных наработках  $t$ , км.

$t$ , км	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	1 0000	1 1000	1 2000	1 3000	1 4000	1 5000
(t)	,96	,92	,85	,76	,64	,5	,37	,25	,15	,07	,035

По данным таблицы 2.32 строится (в масштабе) «кривая убыли» проектируемого автомобиля (рис 2.33).

4. Составляется структурно-функциональная схема проектируемого автомобиля по уровням иерархии (рис. 2.34).

5. На основании информации представленной на рис. 1.19 (распределение числа отказов по агрегатам автомобиля, %) проводится ранжирование элементов второго уровня иерархии, представленных на рис.2.34 (табл.2.33).

6. По формуле (1.12) проводится расчет коэффициентов сложности  $K_i$  элементов конструкции второго уровня иерархии (табл. 2.33).

7. По формуле (1.11) проводится расчет требуемых вероятностей безотказной работы  $P_{э_i}$  элементов конструкции второго уровня иерархии (табл. 2.33), для различных значений вероятности безотказной работы автомобиля в целом

Таблица 2.33.

### Ранжирование основных элементов конструкции автомобиля.

Наименование основных элементов конструкции автомобиля	Номер основного элемента конструкции автомобиля в ранжированном ряду.
---	---

1	2
Двигатель	1
Тормозные механизмы	2
Коробка передач	3
Электрооборудование	4
Сцепление	5
Колеса и ступицы	6
Задний мост	7
Подвеска автомобиля	8
Карданный вал	9
Рулевое управление	10
Платформа	11
Кабина	12
Передний мост	13

Таблица 2.34.

Значения коэффициентов  $K_i$  элементов второго уровня иерархии в ранжированном ряду.

Номер элемента в ранжированном ряду	Значение коэффициента $K_i$
1	0,143
2	0,132
3	0,121
4	0,110
5	0,099
6	0,088
7	0,077
8	0,066
9	0,055
10	0,044
11	0,033
12	0,022
13	0,011

Как видно из таблицы 2.34 значения  $P_{Эi}$  для определенного значения  $P_{стр.}$  отличаются друг от друга по определённой закономерности, зависящей только от номера элемента в ранжированном ряду.

В реальных условиях такой закономерности не наблюдается. Например, как видно из рис.1.19, отказы по двигателю имеют наибольший процент, чем у остальных элементов.

Обеспечение безотказности связано с капиталовложениями, поэтому рассчитанные нормативы  $P_{Эi}$  должны отражать тот уровень безотказности, который не повлечёт завышенных или заниженных расходов. В связи с этим рассчитанные значения  $P_{Эi}$  требуют корректировки.

В данном примере произведем корректировку значений  $P_{Эi}$  в зависимости от информации, представленной на рис. 1.19.

**8.** Корректирование значений вероятностей безотказной работы  $P_{Эi}$  (табл.2.33) проводится в следующей последовательности (табл. 2.34)

1. Для каждого элемента, на основании априорной информации определяются его значение (графа 2);

2. Устанавливается соотношение между численными показателями графы 2, (графа 3);

3. В графе 4 по табл. 2.33, для каждого элемента выписываются с соответствующие значения  $P_{Эi}$  (в качестве примера  $P_{Эi}$  соответствуют  $P_C = 0,8$ ).

4. Определяется интервал значений  $P_{Эi}$ , соответствующих  $P_C = 0,8$ .

Таблица 2.35

Требуемые значения вероятностей безотказной работы элементов конструкции при заданном требовании к вероятности безотказной работы автомобиля в целом

Автомобиль в целом		Вероятность безотказной работы $P_c$									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
Основные элементы авто- мобиля	Требуемая вероятность безотказной работы, $P_{эi}$	Двигатель	0,719	0,794	0,842	0,877	0,906	0,903	0,950	0,969	0,985
		Тормозные механизмы	0,738	0,809	0,853	0,886	0,913	0,935	0,954	0,971	0,986
		Коробка передач	0,758	0,823	0,864	0,895	0,920	0,940	0,958	0,973	0,987
		Электрооборудование	0,776	0,838	0,876	0,904	0,927	0,945	0,962	0,976	0,988
		Сцепление	0,796	0,853	0,888	0,913	0,934	0,951	0,965	0,978	0,990
		Колёса и ступицы	0,817	0,868	0,899	0,923	0,941	0,956	0,969	0,981	0,991
		Задний мост	0,838	0,883	0,911	0,932	0,948	0,961	0,973	0,983	0,992
		Подвеска автомобиля	0,859	0,899	0,924	0,941	0,955	0,967	0,977	0,985	0,993
		Карданный вал	0,881	0,915	0,936	0,951	0,963	0,972	0,981	0,988	0,994
		Рулевое управление	0,904	0,932	0,948	0,960	0,970	0,978	0,984	0,990	0,995
		Платформа	0,927	0,948	0,961	0,970	0,977	0,983	0,988	0,993	0,997
		Кабина	0,951	0,965	0,974	0,980	0,985	0,989	0,992	0,995	0,998
		Передний мост	0,975	0,982	0,987	0,990	0,992	0,994	0,996	0,998	0,999

$$P_{Эн} - P_{Э1} = 0,998 - 0,969 = 0,029.$$

5. Определяется шаг увеличения  $P_{Эi}$  от  $P_{Э1}$  до  $P_{Эн}$ .

$$S = \frac{P_{Эн} - P_{Э1}}{X_n};$$

$$S = \frac{0,029}{32,92} = 0,00088$$

где  $S$  – шаг увеличения  $P_{Эi}$  от  $P_{Э1}$  до  $P_{Эн}$ ;  $X_n$  – максимальное значение, соотношений числа отказов элементов.

6. Производится корректирование  $P_{Эi}$ , в зависимости от шага увеличения  $S$ .

$$P_{Эi}^* = P_{Э1} + S X_i$$

Рассчитанные значения  $P_{Эi}^*$  представлены в графе 5.

Как видно из табл. 2.34 значение  $P_c = \prod_{i=1}^n P_{Эi}$ , рассчитанное по данным графы 5 ( $P_{Стр}^*$ ), меньше соответствующего значения, рассчитанному по данным графы 4 ( $P_{Стр}$ ).

Соотношение значений  $P_c^*$  и  $P_c$  составляет

$$Y = \frac{P_{Стр}}{P_{Стр}^*}$$

$$Y = \frac{0,8}{0,765} = 1,046$$

Для выполнения условия

$$P_{Стр}^* = \prod_{i=1}^n P_{Эi}^* = 0,8$$

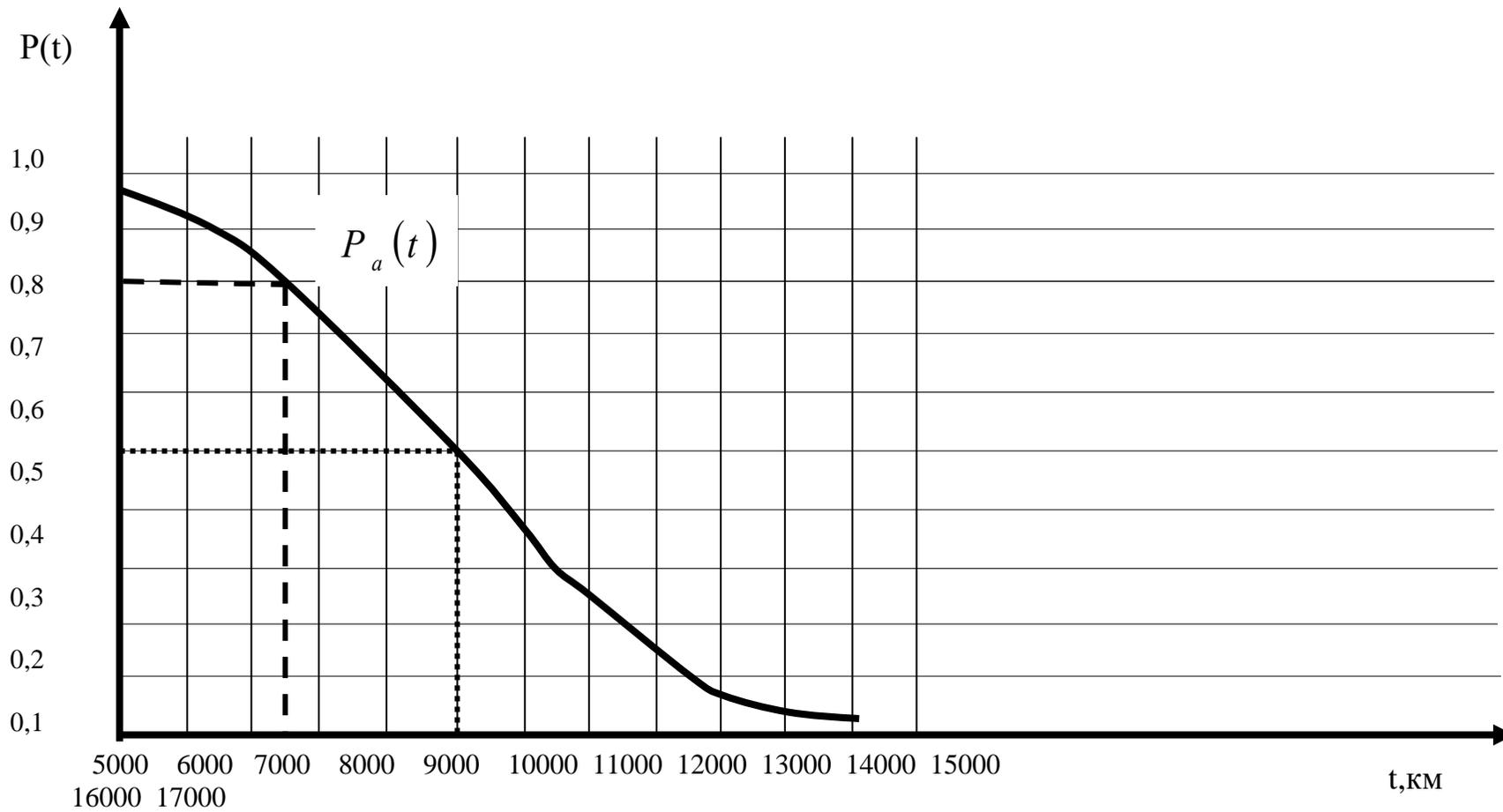


Рис. 2.33. «Кривая убыли» проектируемого автомобиля

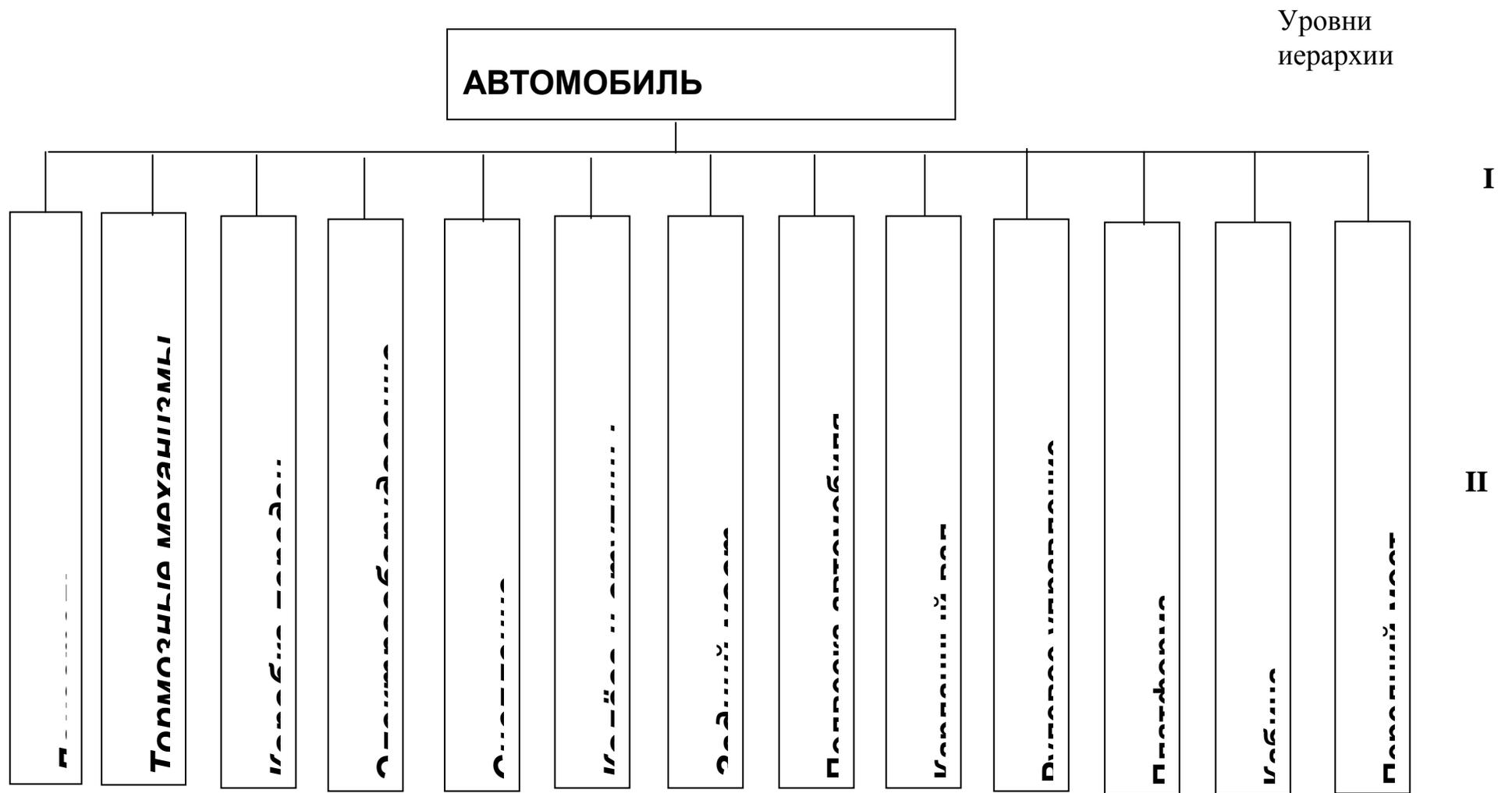


Рис. 2.34. Структурно-функциональная схема проектируемого автомобиля  
(элементы второго уровня иерархии соответствуют элементам представленным на рис. 1.19)

значение  $У$  пропорционально распределяем на элементы, по которым имеется перспектива повышения безотказности, т.е. для этих элементов значения  $P_{Эi}^*$  умножаются на коэффициент, позволяющий выполнить требуемое условие.

$$r = y^{\frac{1}{k}}$$

где  $r$  – коэффициент коррекции;

$k$  – число корректируемых элементов (в данном пример  $k=5$ )

$$r = 1,046^{\frac{1}{5}} = 1,0089$$

Значения вероятностей безотказной работы таких элементов вычисляются по формуле

$$P_{Эi}^{**} = P_{Эi}^* r$$

Рассчитанные значения вероятностей безотказной работы элементов  $P_{Эi}^{**}$  представлены в графе 6 .

Для окончательного расчетов должно выполняться условие

$$P_{стр} = \prod_{i=1}^n P_{Эi}^{**}$$

Графическая иллюстрация зависимости  $P_{Эi}$ ,  $P_{Эi}^{**}$  при  $P_{стр}=0,8$  показаны на рис. 2.35 (по данным табл. 2.33 и 2.34).

**9. Расчет средних наработок на отказ элементов конструкции второго уровня иерархии проектируемого автомобиля.**

По рис. 2.33 определяются текущие значение наработки  $t$ , соответствующее вероятности безотказной работы  $P(t) = 0.8$ , ( $t = 7500$  км).

Рассчитанные вероятности безотказной работы элементов конструкции (табл. 2.36) соответствуют текущему значению  $t = 7500$  км.

Условно принимая версию о том, что наработки до первого отказа или между отказами подчиняются закону распределения Вейбулла проводится,

расчет средних наработок на отказ элементов конструкции второго уровня иерархии.

Таблица 2.36.

Корректированные значения вероятностей безотказной работы,

$$P_{Эi} \text{ (при } P_{СТР} = 0,8)$$

Показатели Наименование элементов	Число отказов, %	Соотношение числа отказов, элементов, $X_i$	Значение $P_{Эi}$		
			По таблице $P_{Эi}$	Корректированные $P_{Эi}^*$	Принятые к расчету $P_{Эi}^{**}$
1	2	3	4	5	6
Двигатель	42,8	1	0,969	0,969	0,969
Тормозные механизмы	8,4	5,10	0,971	0,9735	0,9735
Коробка передач	7,5	5,71	0,973	0,9740	0,9828
<b>Электрооборудование</b>	7,5	5,71	0,976	0,9740	0,9740
Сцепление	6,4	6,69	0,978	0,9749	0,9837
Колеса и ступицы	5,7	7,51	0,981	0,9756	0,9756
Задний мост	5,2	8,23	0,983	0,9762	0,9850
Подвеска автомобиля	4,7	9,11	0,985	0,9770	0,9819
Карданный вал	3,4	12,59	0,988	0,9800	0,9850
Рулевое управление	3,4	12,59	0,990	0,9800	0,9800
Платформа	2,4	17,83	0,993	0,9847	0,9847
Кабина	1,3	32,92	0,995	0,9980	0,9980
Передний мост	1,3	32,92	0,998	0,9980	0,9980
$P_C = \prod_{i=1}^n P_{Эi}$	—	—	0,8	0,765	0,794

Например, требуется определить  $t_{cp}$  для двигателя (элемент №1 в ранжированном ряду, табл. 2.36).

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t-c}{a}\right)^6}$$

Условно принимаем  $C = 0$ , тогда

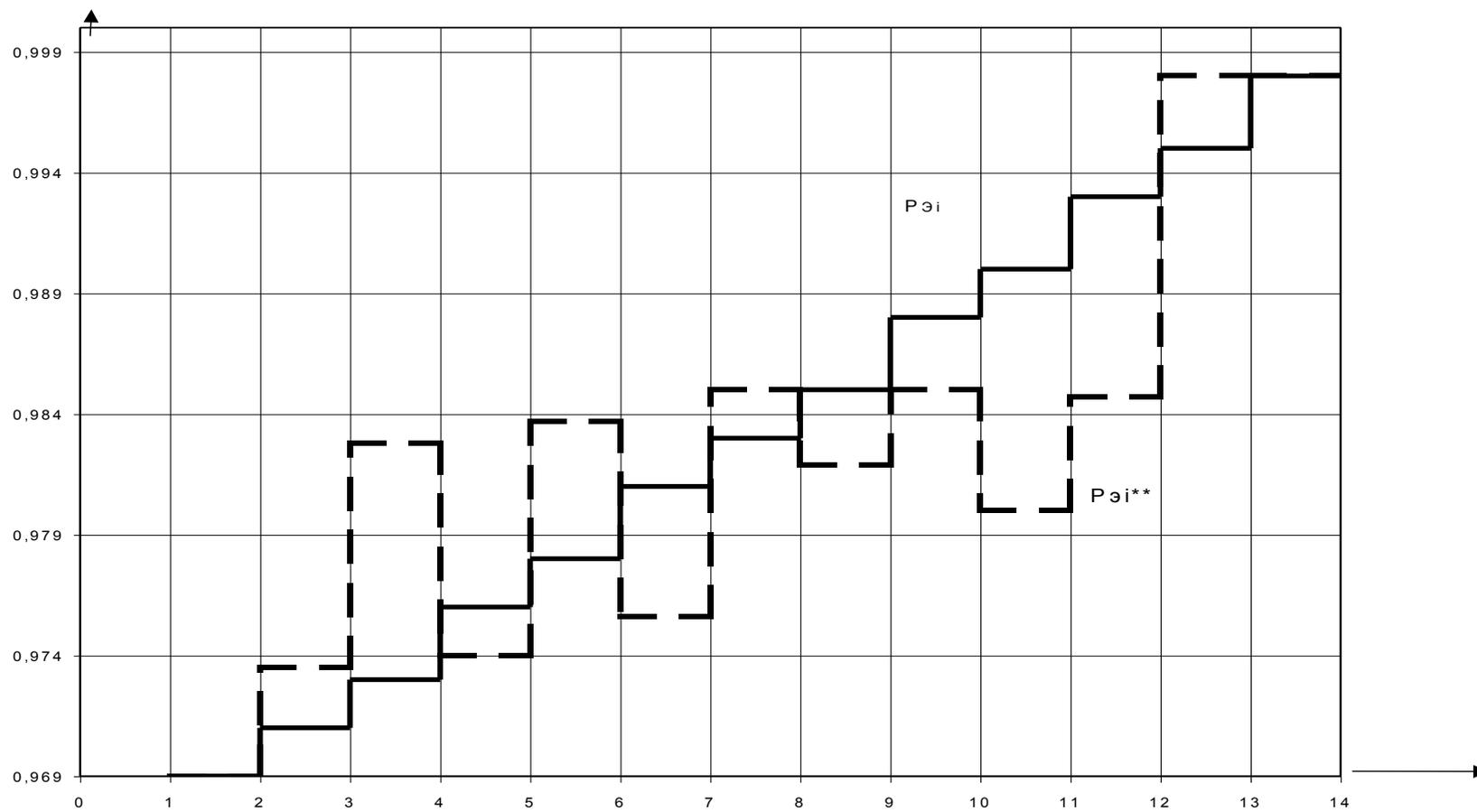


Рис. 2.35. Зависимость  $P_{эi}$  и  $P_{эi}^{**}$  от  $P_{СТР} = 0,8$

Основные элементы конструкции автомобиля (по табл. 2.34)

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^6}$$

$$t = 7500 \text{ км (рис.2.33)}$$

$$P(t) = 0,969 \text{ (табл. 2.36)}$$

$$0,969 = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^6}$$

Из определения логарифма следует

$$\ln 0,906 = -\left(\frac{t}{a}\right)^6$$

$$-0,031 = -\left(\frac{7500}{a}\right)^6$$

$$a = \frac{7500}{\sqrt[6]{0,031}} = \frac{7500}{0,42} = 17857 \text{ км}$$

$$t_{cp} = a * K_B$$

$$t_{cp} = 17857 * 0,906 = 16179 \text{ км}$$

Аналогичным образом  $t_{cp}$  определяется для других элементов конструкции второго уровня иерархии. Результаты расчетов  $t_{cp}$ , элементов конструкции второго уровня иерархии при заданной средней наработке на отказ  $t_{cp} = 10000$  км, представлены в табл. 2.37.

На рис. 2.35 представлен график изменения средних наработок на отказ элементов конструкции второго уровня иерархии.

Таблица 2.37.

Показатели безотказности элементов конструкции второго уровня иерархии структурно-функциональной схемы проектируемого автомобиля.

№	Показатели безотказности Элементы	$P_{Эi}$	$t_{cp}, \text{ км}$
1	Двигатель	0,9690	16179
2	Тормозные механизмы	0,9735	16573
3	Коробка передач	0,9828	18875

<b>4</b>	<b>Электрооборудовани е</b>	0,9740	16988
<b>5</b>	Сцепление	0,9837	18875
<b>6</b>	Колеса и ступицы	0,9756	16988
<b>7</b>	Задний мост	0,9850	19416
<b>8</b>	Подвеска автомобиля	0,9819	18365
<b>9</b>	Карданный вал	0,9850	19416
<b>10</b>	Рулевое управление	0,9800	17882
<b>11</b>	Платформа	0,9847	19416
<b>12</b>	Кабина	0,9980	32357
<b>13</b>	Передний мост	0,9980	32357

Расчет средних наработок на отказ основных элементов конструкции карданной передачи проектируемого автомобиля выполняется в следующей последовательности.

1. Составляется структурно функциональная схема основных элементов конструкции карданной передачи. Для этого рассмотрим вопросы устройства и работы карданных передач.

#### **Типы карданных передач.**

Для передачи крутящего момента от одного вала к другому при их несоосности или изменении взаимного положения во время движения автомобиля служит карданная передача.

Карданная передача состоит из валов, их опор и карданных шарниров.

Карданные передачи устанавливают: между сцеплением и коробкой передач, расположенной отдельно от двигателя; между коробкой передач и раздаточной или дополнительной коробкой; между главными передачами двух ведущих задних мостов трехосного автомобиля; между главной передачей и полуосями ведущих колес с независимой подвеской; в приводе к лебедке и другим вспомогательным механизмам.

Карданные передачи по числу карданных сочленений делят на одинарные и двойные. Если передача имеет только один карданный шарнир, то такую передачу называют одинарной. Подобные передачи применяют только в случае расположения валов под небольшим углом

и в настоящее время на автомобилях устанавливают редко. В двойной карданной передаче карданные шарниры расположены на обоих концах карданного вала.

Независимо от скорости движения автомобиля карданный вал не должен подвергаться сколько-нибудь значительным скручиванию и биению. Для уменьшения биения карданный вал в сборе с карданным шарниром динамически балансируют. Дисбаланс устраняют приваркой на концах труб карданных валов балансировочных пластин, а в случае необходимости и установкой балансировочных пластин под крышки клапанных шарниров.

Угловое перемещение карданных валов обеспечено конструкцией карданных шарниров, а изменение расстояний между шарнирами — наличием шлицевых соединений вилок карданных шарниров с карданным валом. Обычно у неподвижно стоящего автомобиля углы между валами, соединенными карданными шарнирами, не превышают  $5...9^\circ$ , но при движении они могут достигать  $15...20^\circ$ , а в приводе переднего ведущего моста между главной передачей и ведущими управляемыми колесами при повороте  $30...40^\circ$ .

### **Устройство и работа карданных валов и шарниров.**

В зависимости от углов между осями соединяемых валов можно применять мягкие и жесткие карданные шарниры. В первых угловое смещение валов происходит вследствие деформации упругих (обычно резиновых) элементов, а во вторых — благодаря шарнирным соединениям. В автомобилях применяют преимущественно жесткие карданные шарниры.

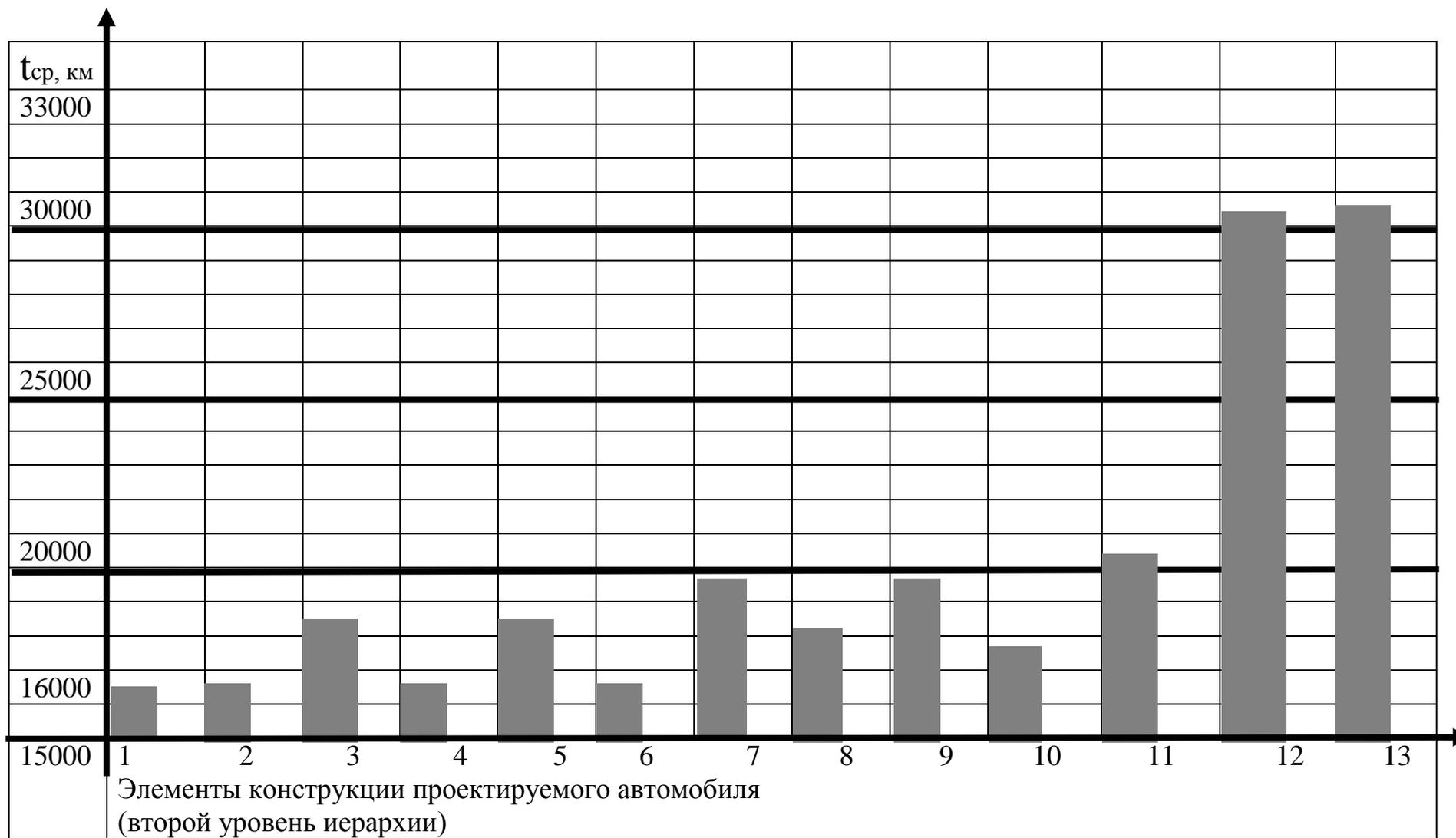


Рис. 2.36. График измерения средних наработок на отказ элементов конструкции второго уровня иерархии

## Устройство и работа карданных шарниров и валов.

По кинематическим схемам карданные шарниры делят на шарниры неравных и равных угловых скоростей. Обычно во всех автомобильных приводах, кроме привода к ведущим управляемым колесам, применяют шарниры неравных угловых скоростей.

Шарнир неравных угловых скоростей характеризуется тем, что при равномерном вращении ведущего вала скорость ведомого вала постоянно изменяется. При соединении валов шарнирами равных угловых скоростей ведомый вал вращается равномерно с постоянной угловой скоростью, соответствующей угловой скорости ведущего вала.

Различные карданные шарниры представлены на рис. 2.38.

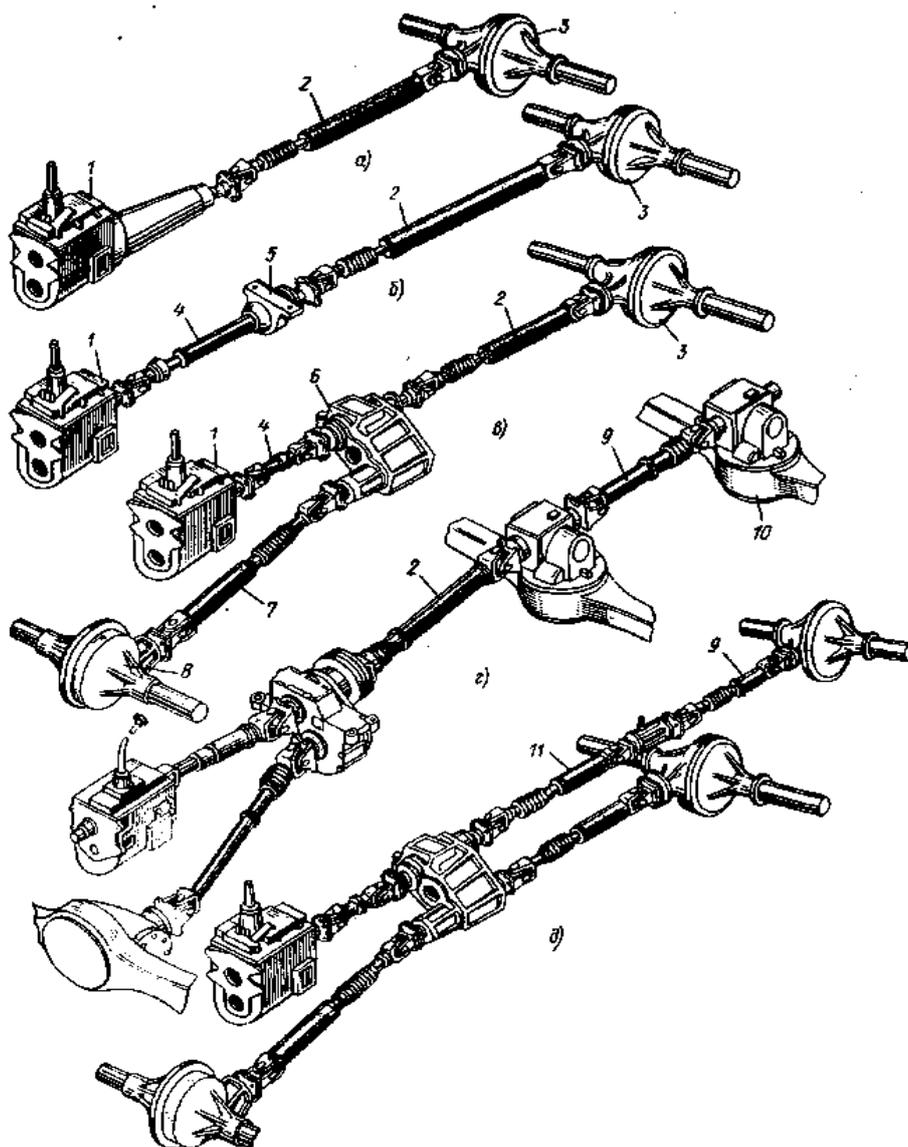


Рис. 2.37. Расположение карданных передач на автомобилях:

*а*—легковом; *б*—грузовом; *в*—*д*—грузовом повышенной проходимости; 1—коробка передач; 2, 4, 7, 9 и 11 — карданные валы; 3 и 10—задние ведущие мосты; 5 — промежуточная опора; 6—раздаточная коробка; 8— передний ведущий мост.

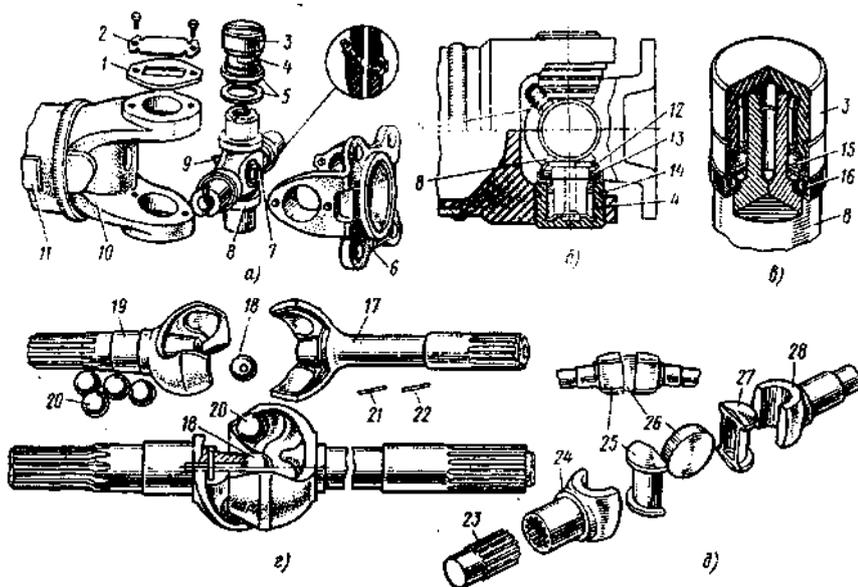


Рис 2.38. Карданные шарниры: *а* — *в* — неравных угловых скоростей; *г* и *д* — равных угловых скоростей; 1—крышка; 2—стопорная пластина; 3—стакан подшипника; 4 — иголки; 5— войлочные манжеты; 6, 10, 24 и 28 — вилки, 7 — предохранительный клапан; 8— крестовина; 9 —масленка; 11--карданный вал; 12—отражатель; 13— самоподжимная манжета, 14— стопорное кольцо; 15 и 16— манжеты радиального и торцового уплотнений, 17 — внутренний кулак; 18 —центральный шарик, 19— наружный кулак; 20— ведущие шарики; 21 — штифт; 22—шпилька; 23 — полуось; 25 и 27— полуцилиндрические кулаки; 26 — центральный диск.

Конструкция одного из входящих в карданную передачу шарниров должна допускать осевое перемещение карданного вала. Обычно для этой

Простой жесткий карданный шарнир при больших углах между осями соединяемых им валов не может обеспечить равномерное

вращение ведомого вала. При равномерном вращении ведущей вилки ведомая вращается неравномерно. За один оборот карданного вала ведомая вилка при вращении дважды обгоняет ведущую и дважды отстает от нее. Вследствие неравномерности возникают дополнительные нагрузки на детали главной передачи, дифференциала, полуосей и колес, увеличивается их износ. Чтобы устранить неравномерность вращения ведомого вала применяют двойную карданную передачу с жесткими карданными шарнирами или одинарную карданную передачу с карданным шарниром равных угловых скоростей. Если двойной карданной передаче угол между осями ведомого вала коробки передач и карданного вала будет равен углу между осями карданного вала и ведущего вала главной передачи, то при равномерном вращении ведомого вала коробки передач ведущий вал главной передачи будет вращаться также равномерно. При этом обе вилки, установленные на карданном валу, необходимо располагать в одной плоскости.

Обеспечивающие равномерное вращение ведомого вала карданные шарниры равных угловых скоростей чаще всего бывают шариковые и кулачковые.

Для достижения достаточной прочности при небольшой массе карданные валы обычно изготавливают в виде стальных труб. Вилки карданных шарниров приваривают к валам или надевают на шлицы приваренного к трубе наконечника. Это скользящее соединение закрывают резиновым чехлом.

На рис. 2.39 представлены виды карданных передач применяемых на автомобилях.

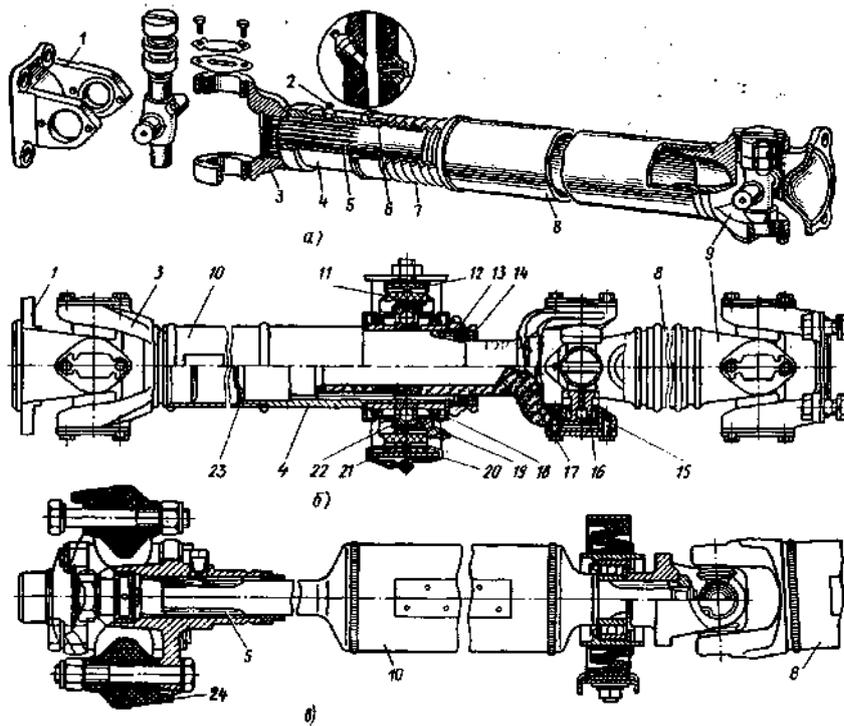


Рис. 2.39. Карданные передачи:

а - с одним валом; б — с двумя валами (автомобиль, ЗИЛ-431410); в — с двумя валами и упругим сочленением (автомобили ВАЗ); 1 и 3 вилки, 2 и 19 - масленки; 4—шлицевая втулка; 5-наконечник со шлицами; 6, 14 и 18—манжеты; 7— чехол; 8 — карданный вал; 9 — карданный шарнир; 10— промежуточный карданный вал; 11 —подушка опоры; 12 -скоба крепления подушки; 13—гайка крепления подшипника промежуточной опоры; 15 - игольчатый подшипник крестовины; 16 - крестовина; 17—скользящая вилка; 20 -хомут; 21 — кронштейн опоры; 22—шарикоподшипник; 23- заглушка; 24 упругая резиновая муфта

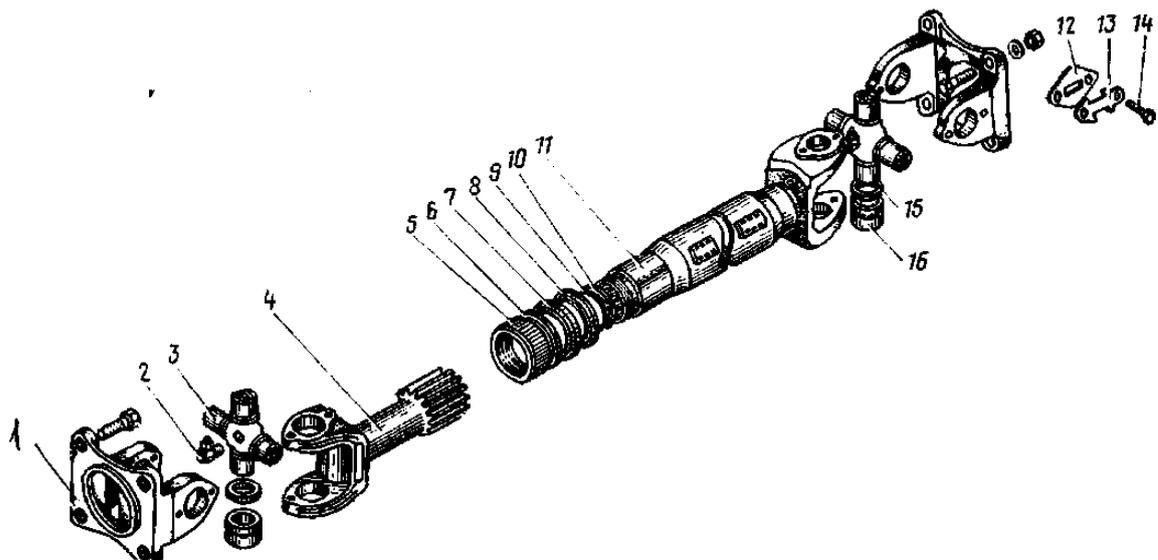


Рис. 2.40. Карданный вал автомобиля аналога КамАЗ 5320:

- |   |  |
|---|--|
| 1—вилка-фланец                                  | 10 — шайба разрезная                           |
| 2—масленка со штуцером под углом 90 ° втулки    | 11 — вал карданный                             |
| 3—крестовина вала                               | 12 — пластина опорная игольчатого подшипника   |
| 4 — вилка, скользящая вала                      | 13 — пластина стопорная                        |
| 5 — гайка крепления сальника шлицевой втулки    | 14 — болт М8Х20                                |
| 6, 8 — шайба наружного сальника шлицевой втулки | 15—уплотнение подшипника вала торцовое в сборе |
| 7 — кольцо войлочное сальника шлицевой втулки   | 16—подшипник игольчатый                        |
| 9 — кольцо уплотнительное                       |  |

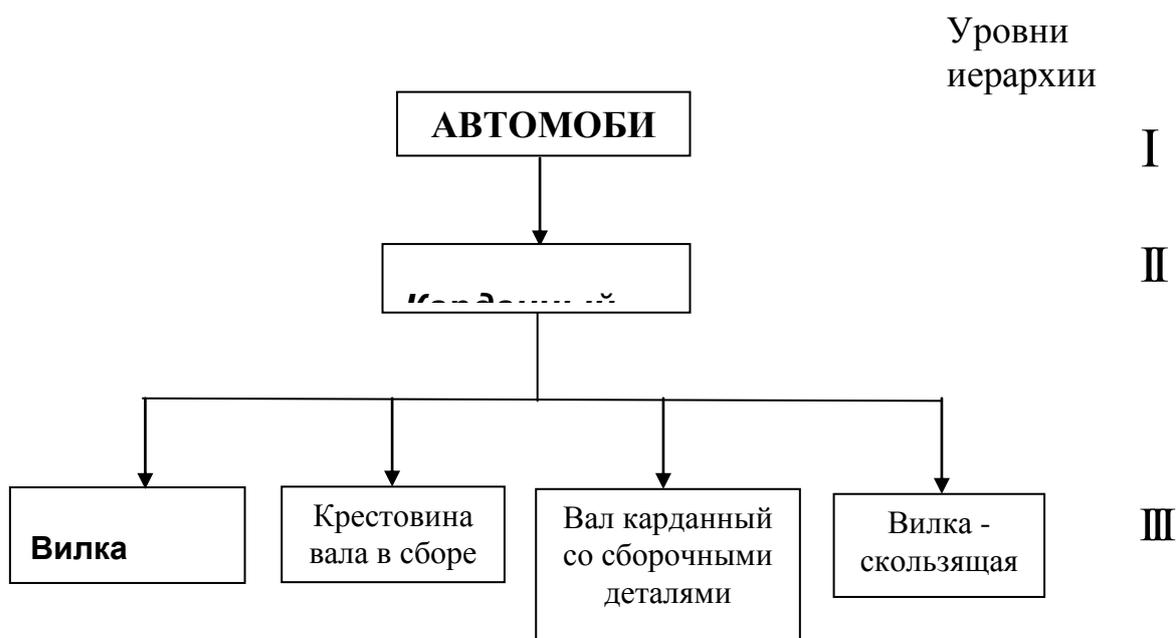
Конструкция одного из входящих в карданную передачу шарниров должна допускать осевое перемещение карданного вала. Обычно для это цели используют шлицевое соединение одной из вилок карданного шарнира с валом. Простой жесткий карданный шарнир при больших углах между осями соединяемых им валов не может обеспечить равномерное вращение ведомого вала. При равномерном вращении ведущей вилки ведомая вращается неравномерно. За один оборот карданного вала ведомая вилка, при вращении дважды обгоняет ведущую, и дважды отстает от нее. Вследствие неравномерности возникают дополнительные

нагрузки на детали главной передачи, дифференциала, полуосей и колес, увеличивается их износ. Чтобы устранить неравномерность вращения ведомого вала применяют двойную» карданную передачу, жесткими карданными шарнирами или одинарную карданную передачу с карданным шарниром равных угловых скоростей.

Если в двойной карданной передаче угол между осями ведомого вала коробки передач и карданного вала будет равен углу между осями карданного вала и ведущей) вала главной передачи, то при равномерном вращении ведомого вала коробки передач ведущий вал главной передачи будет вращаться также равномерно. При углом обе вилки, установленные на карданном валу, необходимо располагать в одной плоскости. Обеспечивающие равномерное вращение ведомого вала карданные шарниры равных угловых скоростей чаще всего бывают шариковые и кулачковые.

Для достижения достаточной прочности при небольшой массе карданные валы обычно изготавливают в виде стальных труб Вилки карданных шарниров приваривают к валам или надевают на шлицы при варенного к трубе наконечника. Это скользящее соединение закрывают резиновым чехлом.

На основании рис.2.41 составляется структурно-функциональная схема карданного вала. Основные элементы карданного вала располагаются на третьем уровне иерархии.



**Рис. 2.41**

2. Определяется количество элементов в каждом основном элементе третьего уровня иерархии. На основании этой информации проводится ранжирование элементов третьего уровня иерархии (табл. 2.38). Более сложному элементу присваивается более сложный номер.

Таблица 2.38

Ранжирование элементов третьего уровня иерархии конструкции карданного вала автомобиля.

Наименование основных элементов	Количество элементов в сборочном соединении	Номер элемента в ранжированном ряду
Вилка фланец (2 шт.)	2	3
Крестовина вала в сборе (2 шт.)	8	1
Вал карданный со сборочными деталями	7	2
Вилка - скользящая	1	4

2. По формуле(1.12) проводится расчет коэффициентов сложности  $K_i$  элементов конструкции третьего уровня иерархии (табл. 2.39)

Таблица 2.39

Значение коэффициентов  $K_i$  элементов третьего уровня иерархии в ранжированном ряду.

Номер элемента в ранжированном ряду	Значение коэффициента $K_i$
1	0,4
2	0,3
3	0,2
4	0,1

4. По формуле(1.11) проводится расчет требуемых вероятностей безотказной работы  $P_{эi}$  элементов конструкции третьего уровня (табл. 2.40) при известном значении вероятности безотказной работы карданного вала в сборе  $P(t) = 0,5$  соответствующей ей средней наработки на отказ 19416 км (табл. 2.39)

Таблица 2.40

Требуемые вероятности безотказной работы элементов третьего уровня иерархии.

Номер элементов в ранжированном ряду	Требуемые вероятности безотказной работы сборочных единиц, $P_{эi}$
1	0,758
2	0,812
3	0,871
4	0,933
$P_c = \prod_{i=1}^n P_{эi}$	0,5

5. Расчет средних наработок на отказ элементов конструкции третьего уровня иерархии проектируемого автомобиля.

Условно принимаем версию о том, что наработки на отказ крестовины в сборе карданного вала (элемент №1 в ранжированном ряду). Сборный карданный вал автомобиля КамАЗ-5320 (см. рис. 2.40) имеет две одинаковые крестовины.

Значение  $P_{эi} = 0,758$  (табл. 2.40) соответствует вероятности безотказной работы двух крестовин. Вероятность безотказной работы первой крестовины определяется по формуле (1.9).

$$P_{э1} = \sqrt{0,758} = 0,871$$

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^B}$$

$$t = 19416 \text{ км.}$$

$$P(t) = 0,871$$

$$V = 0,281; \nu = 4,0; K_B = 0,906; C_B = 0,255$$

$$0,871 = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^B}$$

из определения логарифма следует:

$$\ln 0,871 = -\left(\frac{t}{a}\right)^B$$

$$-0,138 = -\left(\frac{19416}{a}\right)^4$$

$$a = \frac{19416}{\sqrt[4]{0,138}} = \frac{19416}{0,609} = 31882 \text{ км.}$$

$$t_{CP} = a * K_B = 31882 * 0,906 = 28885 \text{ км.}$$

Аналогичным образом  $t_{CP}$  определяется для других элементов конструкции третьего уровня иерархии.

Результаты расчетов  $t_{CP}$  элементов представлены в табл. 2.41.

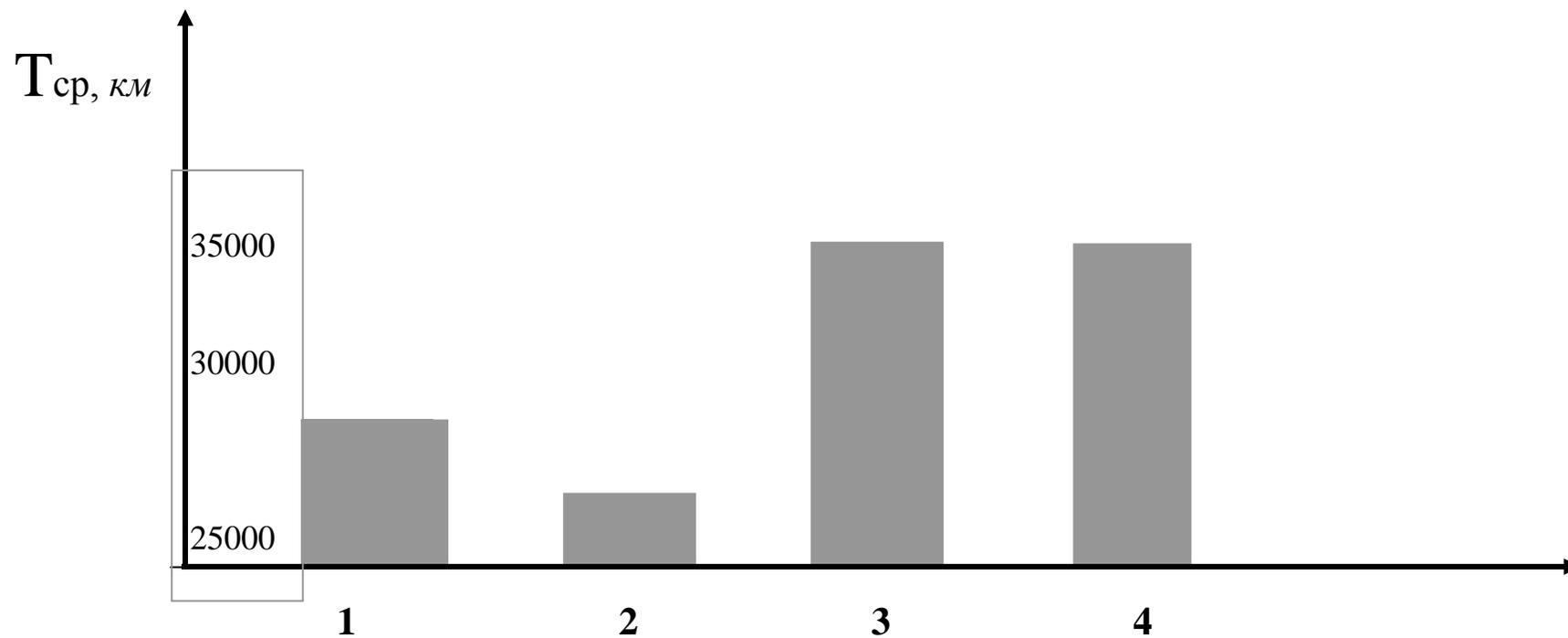
Таблица 2.41

Показатели безотказности элементов конструкции третьего уровня иерархии структурно-функциональной схемы проектируемого автомобиля.

№ п/п	Элементы	Показатели безотказности	
		$P_{эi}$	$T_{CP}$ , км.
1	Крестовина в сборе	0,871	28885
2	Вал карданный	0,812	26060

3	Вилка фланец	0,933	34357
4	Вилка скользящая	0,933	34357

На рис. 2.42 представлен график изменения средних наработок на отказ элементов конструкции третьего уровня иерархии.



Элементы конструкции автомобиля (третий уровень иерархии).

Рисунок 2.42. График изменения средних наработок на отказ элементов карданной передачи

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Таблица значений функции  $e^{-x}$

x										
	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,00	1,0000	0,9990	0,9980	0,9970	0,9660	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	0,9910
0,01	0,9900	0,9891	0,9881	0,9871	0,9861	0,9851	0,9841	0,9831	0,9822	0,9812
0,02	0,9802	0,9792	0,9782	0,9773	0,9763	0,9753	0,9743	0,9734	0,9724	0,9714
0,03	0,9704	0,9695	0,9685	0,9675	0,9666	0,9656	0,9646	0,9637	0,9627	0,9618
0,04	0,9608	0,9598	0,9588	0,9579	0,9570	0,9560	0,9550	0,9541	0,9531	0,9522
0,05	0,9512	0,9502	0,9493	0,9484	0,9474	0,9465	0,9455	0,9446	0,9436	0,9427
0,06	0,9418	0,9408	0,9399	0,9389	0,9380	0,9371	0,9361	0,9352	0,9343	0,9333
0,07	0,9324	0,9315	0,9305	0,9226	0,9287	0,9277	0,9258	0,9259	0,9250	0,9240
0,08	0,9231	0,9222	0,9213	0,9204	0,9194	0,9185	0,9176	0,9167	0,9158	0,9148
0,09	0,9139	0,9130	0,9121	0,9112	0,9103	0,9094	0,9085	0,9076	0,9066	0,9057
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6839	0,6771
0,4	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126
0,5	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5825	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5016
0,7	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538

0,8	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
0,9	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3535	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	0,3329	0,3296	0,3263	0,3230	0,3198	0,3166	0,3135	0,3104	0,3073	0,3042
1,2	0,3012	0,2982	0,2952	0,2923	0,2894	0,2865	0,2837	0,2808	0,2780	0,2753
1,3	0,2725	0,2698	0,2671	0,2645	0,2618	0,2592	0,2567	0,2541	0,2516	0,2491
1,4	0,2466	0,2441	0,2417	0,2393	0,2369	0,2346	0,2322	0,2299	0,2276	0,2254
1,5	0,2231	0,2209	0,2187	0,2165	0,2144	0,2122	0,2101	0,2080	0,2060	0,2039
1,6	0,2019	0,1999	0,1979	0,1959	0,1940	0,1920	0,1901	0,1882	0,1864	0,1845
1,7	0,1827	0,1809	0,1791	0,1773	0,1755	0,1738	0,1720	0,1703	0,1686	0,1670
1,8	0,1653	0,1637	0,1620	0,1604	0,1588	0,1572	0,1557	0,1541	0,1526	0,1511
1,9	0,1496	0,1481	0,1466	0,1451	0,1437	0,1423	0,1409	0,1395	0,1381	0,1367
2,0	0,1353	0,1340	0,1327	0,1313	0,1300	0,1287	0,1275	0,1262	0,1249	0,1237
2,2	0,1108	0,1097	0,1086	0,1075	0,1065	0,1054	0,1044	0,1033	0,1023	0,1013
2,3	0,1003	0,0993	0,0983	0,0975	0,0963	0,0954	0,0944	0,0935	0,0926	0,0916
2,4	0,0907	0,0898	0,0889	0,0880	0,0872	0,0863	0,0854	0,0846	0,0837	0,0829
2,5	0,0821	0,0813	0,0805	0,0797	0,0789	0,0781	0,0773	0,0765	0,0758	0,0750
2,6	0,0743	0,0735	0,0728	0,0721	0,0714	0,0707	0,0699	0,0693	0,0686	0,0679
2,7	0,0672	0,0665	0,0659	0,0652	0,0646	0,0639	0,0633	0,0627	0,0620	0,0614
2,8	0,0608	0,0602	0,0596	0,0590	0,0584	0,0578	0,0573	0,0567	0,0561	0,0556
2,9	0,0550	0,0542	0,0539	0,0534	0,0529	0,0523	0,0518	0,0513	0,0508	0,0503
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3	0,0498	0,0450	0,0408	0,0368	0,0334	0,0302	0,0273	0,0247	0,0024	0,0200

4	0,0183	0,0166	0,0150	0,0136	0,0123	0,0111	0,0101	0,0091	0,0082	0,0074
5	0,0067	0,0061	0,0055	0,0050	0,0045	0,0041	0,0037	0,0033	0,0030	0,0027
6	0,0025	0,0022	0,0020	0,0018	0,0017	0,0015	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010
7	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
8	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001

Таблица П.2

Значения функции  $F_0(x)$

$x$		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	6536	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,3	0,	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
0,4	0,	6551	6594	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,5	0,	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
0,6	0,	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,7	0,	7580	7611	7642	7673	7704	7734	7764	7794	7823	7852
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133

0,9	0,	8159	8186	8238	8212	8264	8389	8315	8340	8365	8389
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8631
1,1	0,	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810	8830
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	9844	8962	8980	8997	9015
1,3	0,9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621	1774
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,5	0,9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295	4408
1,6	0,9	4520	4630	4738	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246	6327
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7588	7615	7670
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,3	0,99	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134	9158
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,5	0,99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060	5201
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319	6427
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282	7365
2,8	0,99	7415	7523	7599	7673	774	7814	7882	7948	8012	8074
2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559	8605
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,9 <sup>3</sup>	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886

3,2	0,9 <sup>3</sup>	3129	3363	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,3	0,9 <sup>3</sup>	5166	5335	5499	5658	5811	5959	6103	6242	6336	6505
3,4	0,9 <sup>3</sup>	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7493	7585
3,5	0,9 <sup>3</sup>	7674	7760	7842	7922	7999	8074	8146	8215	8282	8347
3,6	0,9 <sup>3</sup>	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,7	0,9 <sup>3</sup>	8922	8964	9004	9043	9080	9116	9150	9184	9216	9247
3,8	0,9 <sup>4</sup>	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
3,9	0,9 <sup>4</sup>	5190	5385	5573	5753	5926	6092	6252	6406	6554	6696
4,0	0,9 <sup>4</sup>	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,1	0,9 <sup>4</sup>	7934	8022	8160	8186	8264	8338	8409	8477	8542	8606
4,2	0,9 <sup>4</sup>	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
4,3	0,9 <sup>5</sup>	1460	1837	2198	2544	2876	3193	3497	3788	4066	4332
4,4	0,9 <sup>5</sup>	4588	4832	5065	5288	5502	5706	5902	6089	6268	6439
4,5	0,9 <sup>5</sup>	6602	6759	6908	7051	7187	7318	7442	7561	7675	7784
4,6	0,9 <sup>5</sup>	7888	7987	8081	8172	8258	8340	8419	8494	8566	8634
4,7	0,9 <sup>5</sup>	8699	8761	8821	8877	8931	8983	9032	9079	9124	9166
4,8	0,9 <sup>6</sup>	2067	2454	2882	3173	3508	3827	4131	4420	4696	4958
4,9	0,9 <sup>6</sup>	5208	5446	5673	5888	6094	6289	6475	6652	6821	6981
5,0	0,9 <sup>6</sup>	7134	7278	7416	7548	7672	7791	7904	8011	8113	8210
5,1	0,9 <sup>6</sup>	8302	8389	8472	8551	8626	8698	8765	8830	8891	8949
5,2	0,9 <sup>7</sup>	004	056	105	152	197	240	280	318	354	388
5,3	0,9 <sup>7</sup>	421	452	481	509	539	560	584	606	628	648
5,4	0,9 <sup>7</sup>	667	685	702	718	734	748	762	775	787	799

5,5	0,9 <sup>7</sup>	810	821	831	840	849	857	865	873	880	886
5,6	0,9 <sup>7</sup>	893	899	906	910	915	920	924	929	933	936
5,7	0,9 <sup>8</sup>	40	445	47	50	53	55	58	60	63	65
5,8	0,9 <sup>8</sup>	67	69	71	72	74	75	77	78	79	81
5,9	0,9 <sup>8</sup>	80	83	84	85	86	87	87	88	98	90
6,0	0,9 <sup>8</sup>	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица П.3

Значения функции  $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	0,	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2926	2943	2920
0,8	0,	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,	2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	0,	2179	2155	2131	2107	3083	2059	2036	2012	1989	1965

1,2	0,	1942	1919	1895	1872	1849	1823	1804	1781	1758	1736
1,3	0,	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0	9405	9246	9089	8933	8780	8628	8478	8329	8183	8038
1,8	0,0	7895	7754	7614	7477	7341	7206	7074	6943	6814	6687
1,9	0,0	6562	6438	6316	6195	6077	5959	5844	5730	5618	5508
2,0	0,0	5399	5292	5186	5082	4980	4879	4780	4682	4586	4491
2,1	0,0	4398	4307	4217	4128	4041	3955	3871	3788	3706	3626
2,2	0,0	3547	3470	3394	3319	3246	3174	3103	3034	2965	2898
2,3	0,0	2833	2768	2705	2643	2582	2522	2463	2406	2349	2294
2,4	0,0	2239	2186	2134	2083	2033	1984	1936	1888	1842	1797
2,5	0,0	1753	1709	1667	1625	1585	1545	1506	1468	1431	1394
2,6	0,0	1358	1324	1289	1256	1223	1191	1160	1130	1100	1071
2,7	0,0	1042	1014	0987	0961	0935	0909	0885	0861	0837	0814
2,8	0,00	7915	7696	7483	7274	7071	6873	6679	6491	6307	6127
2,9	0,00	5952	5782	5616	5454	5296	5143	4993	4847	4705	4567
3,0	0,00	4432	4301	4173	4049	3928	3810	3695	3584	3475	3370
3,	0,00	4432	3267	2384	1723	1232	0873	0612	0425	0292	0199
4,	0,0 <sup>3</sup>	1338	0893	0589	0385	0249	0160	0101	0064	0040	0024
5,	0,0 <sup>5</sup>	1487	0897	0536	0317	0186	0108	0062	0035	0020	0011

Таблица П.4

Значения гамма – функции

$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906
1	0,99433	6	0,90440	1	0,88659	6	0,92137
2	0,98884	7	0,90250	2	0,88704	7	0,92376
3	0,98355	8	0,90072	3	0,88757	8	0,92623
4	0,97844	9	0,89904	4	0,88818	9	0,92877
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93138
6	0,96874	1	0,89600	6	0,88964	1	0,93408
7	0,96415	2	0,89464	7	0,89049	2	0,93685
8	0,95973	3	0,89338	8	0,89142	3	0,93369
9	0,95546	4	0,89222	9	0,89243	4	0,94261

Таблица П.5

Значения  $z_\alpha$  при 5%-ном уровне значимости  $z$ -критерия Фишера.

v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	2,45	2,65	2,69	2,69	2,72	2,73	2,74	2,75	2,76	2,77
2	1,46	1,47	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,49
3	1,58	1,13	1,11	1,11	1,10	1,09	1,09	1,08	1,08	1,07
4	1,02	0,97	0,94	0,94	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86
5	0,94	0,88	0,84	0,84	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,74
6	0,90	0,82	0,78	0,78	0,74	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65
7	0,86	0,78	0,74	0,74	0,69	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59
8	0,84	0,75	0,70	0,70	0,65	0,64	0,63	0,59	0,57	0,54
9	0,82	0,72	0,68	0,68	0,62	0,61	0,59	0,56	0,53	0,50
10	0,80	0,71	0,66	0,66	0,60	0,58	0,56	0,54	0,50	0,47
11	0,79	0,69	0,64	0,64	0,58	0,56	0,54	0,51	0,48	0,44
12	0,78	0,68	0,62	0,62	0,57	0,55	0,52	0,49	0,46	0,42
13	0,77	0,67	0,61	0,61	0,55	0,54	0,51	0,48	0,44	0,40
14	0,76	0,66	0,60	0,60	0,54	0,52	0,50	0,46	0,43	0,38
15	0,76	0,65	0,60	0,60	0,53	0,51	0,48	0,45	0,41	0,36
16	0,75	0,64	0,59	0,59	0,52	0,50	0,48	0,44	0,40	0,35
17	0,75	0,64	0,58	0,58	0,52	0,50	0,47	0,43	0,39	0,34
18	0,74	0,63	0,58	0,58	0,51	0,49	0,46	0,43	0,38	0,32
19	0,74	0,63	0,57	0,57	0,50	0,48	0,45	0,42	0,37	0,32
20	0,74	0,63	0,56	0,56	0,50	0,48	0,45	0,41	0,37	0,31
21	0,73	0,62	0,56	0,56	0,50	0,47	0,44	0,41	0,36	0,30
22	0,73	0,62	0,56	0,56	0,49	0,47	0,44	0,40	0,35	0,29
23	0,73	0,62	0,55	0,55	0,48	0,46	0,43	0,40	0,34	0,28
24	0,72	0,61	0,55	0,55	0,48	0,46	0,43	0,39	0,34	0,27
25	0,72	0,61	0,55	0,55	0,48	0,46	0,42	0,39	0,34	0,27
26	0,72	0,61	0,54	0,54	0,48	0,45	0,42	0,38	0,33	0,26

27	0,72	0,60	0,54	0,54	0,47	0,45	0,42	0,38	0,38	0,26
28	0,72	0,60	0,54	0,54	0,47	0,45	0,42	0,38	0,32	0,25
29	0,72	0,60	0,54	0,54	0,47	0,44	0,41	0,37	0,32	0,25
30	0,71	0,60	0,54	0,54	0,46	0,44	0,41	0,37	0,32	,24
60	0,69	0,57	0,51	0,46	0,43	0,41	0,37	0,32	0,26	0,16
∞	0,67	0,55	0,48	0,43	0,40	0,37	0,33	0,28	0,21	0,00

Таблица.П.6.

Методика прогнозирования требуемого уровня безотказности элементов конструкции модернизируемой машины (тюнингового автомобиля).

№	Название этапа.	Принятые предположения и ограничения, содержание процедуры и математические зависимости.
1	2	3
1	Составление структурно-функциональной схемы надежности проектируемого тюнингового автомобиля.	<p>Отказ элемента вызывает отказ системы; элементы отказывают независимо друг от друга.</p> <p>Система расчленяется на n составных элементов 1-го уровня иерархии сопоставимой сложности. Каждый элемент 1-го уровня иерархии в свою очередь может быть представлен через последовательность элементов 2-го уровня иерархии и т.д. Процедура может быть продолжена до деталей.</p> $P_c = \prod_{i=1}^n P_{\varepsilon_i}, \quad i = \overline{1, n}$ <p>где PC – заданная вероятность безотказной</p>

		<p>работы системы;</p> <p><math>P_{э_i}</math> - требуемая вероятность безотказной работы <math>i</math>-го элемента системы;</p> <p><math>n</math> – число элементов на рассматриваемом уровне иерархии системы.</p> <p><math>P_{э_i}</math> определенная на 1-ом уровне системы, является РС для соответствующего уровня иерархии расчленения этого элемента.</p>
2.	<p>Выявление, анализ и оценка «веса» факторов <math>Q_j</math>, влияющих на значения нормативов безотказности (долговечности) элементов конструкции тюнингового автомобиля.</p>	<p>Методом экспертного опроса (по специально разработанной анкете) оценивается влияние некоторых объективных факторов на значения нормативов безотказности основных элементов тюнингового автомобиля.</p> <p>Процедура выявления, анализа и расчет «веса» факторов <math>Q_i</math>, представлены в разделе 4.</p> <p>Коэффициенты <math>Q_i</math> применяются при расчете коэффициентов предпочтения элементов <math>A_i</math>.</p> <p>Коэффициенты <math>A_i</math> позволяют ранжировать и нормировать неравную безотказность основных составных частей по уровням иерархии тюнингового автомобиля.</p>

1	2	3
3	<p>Расчет коэффициентов предпочтения</p>	<p>Пусть <math>X\{X_{ji}\}</math> – матрица безразмерных величин значений <math>j</math>-го фактора для <math>i</math>-го элемента системы. Тогда вектор <math>A_i</math>, - коэффициента</p>

элементов системы  $A_i$ , количественно выражающих требования к определенной пропорции соотношений вероятностей безотказной работы элементов системы между собой.

предпочтения  $i$ -го элемента системы определяется

как произведение  $Q_j \cdot X_{ji}$ , т.е.

$$\{A_i\} = \{Q_j\} \cdot \{X_{ji}\}$$

Безразмерная величина  $X_{ji}$  представляет собой значение  $j$ -го фактора для  $i$ -го элемента системы. Для определения  $X_{ji}$  составляется матрица из  $j$  строк (число факторов) и  $i$  столбцов (число элементов). Каждая  $j$ -я строка делится на три подстроки и им присваиваются индексы, например,  $j_{11}$ ,  $j_{12}$ ,  $j_{13}$ . В строке  $j_{11}$  для каждого  $X_{ji}$  записывается ее значение в первичном измерении (стоимость - в сумах; средняя наработка на отказ - в часах и т.д.). В строке  $j_{12}$  вычисляется доля  $X_{ji}$  от

$$\sum_{i=1}^n X_{j_{11},i}$$

суммы. В строке  $j_{13}$  значения  $X_{ji}$  умножаются на «вес»  $Q_j$  соответствующего  $j$ -го фактора,  $X_{j_{13},i}$ . Сумма значений  $X_{j_{13},i}$  по каждому  $j$  являются коэффициентами предпочтения при ранжировании элементов системы  $A_i$ . В зависимости от численных значений  $A_i$  производится их ранжирование от больших значений к меньшим, и каждому  $i$ -му элементу системы в ранжированном ряду присваивается номер. Большему значению в настоящей методике соответствует большая безотказность.

1	2	3																																																														
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%; text-align: center;"><i>i</i></td> <td style="width: 25%; text-align: center;"><i>i</i><sub>1</sub></td> <td style="width: 25%; text-align: center;">.....</td> <td style="width: 20%; text-align: center;"><i>i</i><sub><i>n</i></sub></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><del><i>j</i></del></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><i>i</i><sub>1</sub></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><i>i</i><sub><i>n</i></sub></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><del><i>j</i><sub>11</sub></del></td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub>11</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub>11</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>j</i><sub>1</sub></td> <td style="text-align: center;"><i>j</i><sub>12</sub></td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub>12</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub>12</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><i>j</i><sub>13</sub></td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub>13</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub>13</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;">...</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><i>j</i><sub><i>m</i></sub></td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub>,<i>i</i><sub>1</sub></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub>,<i>i</i><sub>2</sub></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub>,<i>i</i><sub>3</sub></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><i>X</i><sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>A</i><sub><i>i</i></sub></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><math>A_1 = \sum_{j=1}^m X_{j_3, i_1}</math></td> <td style="text-align: center;">.....</td> <td style="text-align: center;"><math>A_n = \sum_{j=1}^m X_{j_3, i_n}</math></td> </tr> </table>		<i>i</i>	<i>i</i> <sub>1</sub>	.....	<i>i</i> <sub><i>n</i></sub>	<del><i>j</i></del>		<i>i</i> <sub>1</sub>	.....	<i>i</i> <sub><i>n</i></sub>		<del><i>j</i><sub>11</sub></del>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>11</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>11</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub>	<i>j</i> <sub>1</sub>	<i>j</i> <sub>12</sub>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>12</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>12</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub>		<i>j</i> <sub>13</sub>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>13</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>13</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub>		...	...	...	...		...	...	...	...		...	...	...	...		<i>j</i> <sub><i>m</i></sub>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub>1</sub>	...	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub><i>n</i></sub>			<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub>2</sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub><i>n</i></sub>			<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub>3</sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub><i>n</i></sub>	<i>A</i> <sub><i>i</i></sub>		$A_1 = \sum_{j=1}^m X_{j_3, i_1}$	.....	$A_n = \sum_{j=1}^m X_{j_3, i_n}$		
	<i>i</i>	<i>i</i> <sub>1</sub>	.....	<i>i</i> <sub><i>n</i></sub>																																																												
<del><i>j</i></del>		<i>i</i> <sub>1</sub>	.....	<i>i</i> <sub><i>n</i></sub>																																																												
	<del><i>j</i><sub>11</sub></del>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>11</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>11</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub>																																																												
<i>j</i> <sub>1</sub>	<i>j</i> <sub>12</sub>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>12</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>12</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub>																																																												
	<i>j</i> <sub>13</sub>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>13</sub>,<i>i</i><sub>1</sub></sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub>13</sub>,<i>i</i><sub><i>n</i></sub></sub>																																																												
	...	...	...	...																																																												
	...	...	...	...																																																												
	...	...	...	...																																																												
	<i>j</i> <sub><i>m</i></sub>	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub>1</sub>	...	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub><i>n</i></sub>																																																												
		<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub>2</sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub><i>n</i></sub>																																																												
		<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub>3</sub>	.....	<i>X</i> <sub><i>j</i><sub><i>m</i></sub></sub> , <i>i</i> <sub><i>n</i></sub>																																																												
<i>A</i> <sub><i>i</i></sub>		$A_1 = \sum_{j=1}^m X_{j_3, i_1}$	.....	$A_n = \sum_{j=1}^m X_{j_3, i_n}$																																																												
		$X_{j_{12}, i} = \frac{X_{j_{11}, i}}{\sum_{i=1}^n X_{j_{11}, i}} ; \quad \sum_{i=1}^n X_{j_{12}, i} = 1 ;$ $X_{j_{13}, i} = X_{j_{12}, i} \cdot Q_j ; \quad A_i = \sum_{j=1}^m X_{j_{13}, i}$ $j = \overline{1, m} ; \quad i = \overline{1, n} .$																																																														

4	<p>Определение численных значений вероятностей безотказной работы для 2-го и последующих уровней структурно-функциональной схемы надежности тюнингового автомобиля, для заданного уровня безотказности по автомобилю в целом.</p>	<p>Данная процедура выполняется при любом законе распределения наработок на отказ элементов системы. Определение численных значений вероятностей безотказной работы элементов системы - <math>P_{э_i}</math> проводится в два этапа. На 1-ом этапе, используя математический аппарат теории полезности [12], связанный с ранжированием элементов по их количественным оценкам (больше-меньше), определяются максимальная <math>P_{э_n}</math> и минимальная <math>P_{э_1}</math> вероятности безотказной работы элементов системы. На 2-ом этапе определяются численные значения вероятностей безотказной работы промежуточных элементов, расположенных по уровню безотказности между элементами с максимальной и минимальной вероятностями безотказной работы. Для каждого значения вероятностей безотказной работы элемента системы <math>P_{э_i}</math> вводится вспомогательная характеристика <math>\beta_i</math>.</p>
1	2	3
		<p>Число <math>\beta_i</math> необходимо для промежуточных расчетов при распределении пропорций внутри интервала <math>P_{э_1}, \dots, P_{э_n}</math>, так как окончательные значения <math>P_{э_i}</math> должны удовлетворять условию</p>

$\prod_{i=1}^n P_{\beta_i} = P_{C_{TP}}$ , в то время как  $\prod_{i=1}^n \beta_i$  может быть не равно  $P_{C_{TP}}$ . Интервал  $\beta_1 \dots \beta_n$  делится пропорционально величина разности логарифмов коэффициентов предпочтений  $A_i$  (значения  $\beta_i = P_{\beta_i}$  совпадает только в концах интервала).

$$P_{\beta_i} = f(P_{C_{TP}}, n, i)$$

где  $P_{C_{TP}}$  - требуемая вероятность работы системы;  $n$  - число элементов системы;  $i$  - номер элемента системы в ранжированном ряду.

$$P_{\beta_i} = P_{C_{TP}}^{K_i}$$

где  $K$  - коэффициент, характеризующий количественную меру сложности  $i$ -го элемента системы.

$$K_i = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)}; \quad 0 < K_i < 1; \quad \sum_{i=1}^n K_i = 1;$$

$$P_{\beta_i} = P_{C_{TP}}^{\frac{2(n-i+1)}{n(n+1)}}; \quad P_{\beta_1} = P_{C_{TP}}^{\frac{2}{n(n+1)}}; \quad P_{\beta_n} = P_{C_{TP}}^{\frac{2}{n(n+1)}};$$

$$P_{\beta_i} = f(P_{C_{TP}}, n, i, A_i); \quad \beta_1 = P_{\beta_1}; \quad \beta_n = P_{\beta_n};$$

$$\beta_i = \frac{\beta_n - \beta_1}{\lg A_n - \lg A_1} (\lg A_i - \lg A_1) + \beta_1; \quad i = 2, (n-1)$$

Постоянная величина  $\frac{\beta_n - \beta_1}{\lg A_n - \lg A_1}$  обозначается через  $R$ , тогда  $\beta_i = R \cdot (\lg A_i - \lg A_1) + \beta_1$

		<p>далее обеспечивается переход от <math>\beta_i</math> к <math>P_{\varepsilon_i}</math>.</p> $P_{\varepsilon_i} = \beta_i \sqrt[n]{\frac{P_c}{\prod_{i=1}^n \beta_i}}; \quad i = \overline{1, n}$ <p>Коэффициент <math>\sqrt[n]{\frac{P_c}{\prod_{i=1}^n \beta_i}}</math> обеспечивает равенство <math>P_{c_{тр}} = \prod_{i=1}^n P_{\varepsilon_i}</math>, обозначив его через Z получим</p> $P_{\varepsilon_i} = \beta_i \cdot Z, \quad P_c < P_{\varepsilon_i} < 1$
1	2	3
5	<p>Определение средней (нормативной) наработки на отказ для каждого элемента системы <math>T_{\varepsilon_i}</math>.</p>	<p>Известен норматив средней наработки на отказ системы и вероятности безотказной работы элементов для этого времени. Известен или принят по аналогии вид закона распределения наработок на отказ элементов системы.</p> <p>Средняя (нормативная) наработка на отказ элемента системы определяется по известной функции (плотности) распределения наработок на отказ данного элемента, путем расчетов на ЭВМ.</p> $T_{\varepsilon_i} = \int_0^{\infty} P_{\varepsilon_i}$ <p>где <math>T_{\varepsilon_i}</math> - средняя (нормативная) наработка на отказ элемента системы.</p> <p>Закон распределения наработок на отказ для</p>

		<p>системы и ее элементов может оцениваться по результатам испытаний на надежность; по известным законам распределения наработок на отказ аналогов; приближенно по коэффициентам вариации аналогов и по другой априорной информации.</p>
6	<p>Оценка отклонения результирующей кривой убыли <math>\prod_{i=1}^n P_{\Delta_i}</math> от кривой убыли системы.</p>	<p>Оценка отклонения может быть произведена по критерию Колмогорова. Определяется максимальное отклонение результирующей кривой убыли <math>\prod_{i=1}^n P_{\Delta_i}</math> от кривой убыли системы <math>P_{C_{TP}}</math>. По критерию Колмогорова <math>\lambda_n</math> оценивается приемлемость отклонений (<math>\gamma</math>). Длина отрезка на оси средних наработок на отказ между приемлемыми максимальными отклонениями обозначает ширину интервала, на котором допустимы расчеты по настоящей методике.</p> $P_{C_{TP}} = \prod_{i=1}^n P_{\Delta_i}$ $D_n = \max \left  \prod_{i=1}^n P_{\Delta_i} - P_{C_{TP}} \right $ $\lambda_n = D_n \cdot \sqrt{n^*}$ $\gamma = \text{Вер} \{ \lambda_n \leq \lambda_n^* \}$ <p>где <math>n^*</math> - число интервалов на оси средних наработок на отказ;  <math>\lambda_n^*</math> - табличное значение критерия</p>

		Колмогорова.
--	--	--------------