

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.И. БОГДАНОВИЧ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
НА СТАДИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 629.76; 621.81-192

ББК 39.5

Б 735



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор В. В. С а л м и н,
зам. главного инженера ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»,
главный технолог Е. П. С е м е н е н к о

Богданович В.И.

Б 735 **Теоретические основы обеспечения надежности летательных аппаратов на стадии их производства: учеб. пособие / В.И. Богданович. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.- 90 с. : ил.**

ISBN 978-5-7883-0573-8

Пособие содержит современный учебно-методический материал по теоретическим основам теории надежности и использованию этих представлений в обеспечении надежности летательных аппаратов на стадии их производства. Соответствует учебным дисциплинам «Технологические методы обеспечения надежности»; «Теория надежности»; «Технология производства самолетов» по специальностям: Самолето- и вертолетостроение (160201); Ракетостроение (160801); Космические летательные аппараты и разгонные блоки (160802); Стандартизация и сертификация (200503). Предназначены для студентов очной и очно-заочной формы обучения факультета летательных аппаратов и может быть использовано для углубления знаний инженерно-технического персонала предприятий и КБ.

УДК 629.76; 621.81-192

ББК 39.5

ISBN 978-5-7883-0573-8

© Богданович В.И., 2007

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Надежность как прикладная научная дисциплина и её задачи по обеспечению качества летательных аппаратов.....	6
1.1 Роль надежности в обеспечении качества.....	6
1.2 Вероятностная природа показателей качества и надежности.....	7
1.3 Основные разделы и задачи прикладной научной дисциплины о надежности изделия.....	8
1.4 Этапы формирования надежности летательных аппаратов.....	9
2 Основные понятия и определения теории надежности.....	13
2.1 События, состояния и показатели.....	13
2.2 Отказы технических изделий и их классификация.....	16
2.3 Функция распределения вероятности случайных событий и отказов. Числовые характеристики функции распределения.....	19
2.4 Безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность. Единичные и комплексные показатели надежности.....	23
3 Математические модели надежности.....	30
3.1 Моделирование надежности изделий.....	30
3.2 Этапы функционирования изделия. Экспоненциальный закон и закон Вейбулла распределения вероятностей отказов изделий.....	31
3.3 Нормальный закон распределения вероятностей случайных величин.....	34
3.4 Дискретные распределения вероятностей случайных величин.....	38
3.5 Моделирование сложных технических систем прямым аналитическим методом.....	41
3.6 Моделирование сложных технических систем методом структурных схем.....	42
3.7 Повышение надежности летательных аппаратов и технологических систем их производства резервированием.....	45
4 Выбор показателей надежности технических изделий.....	49
4.1 Общая схема обоснования выбора показателей надежности.....	49
4.2 Основы параметрической теории надежности. Вероятность выполнения задания по параметру качества.....	50
4.3 Роль дисперсии случайных величин в обеспечении заданной вероятности безотказной работы изделия.....	52
5 Технологическое обеспечение надежности летательных аппаратов.....	55
5.1 Общая схема взаимосвязи параметров технологического процесса с показателями надежности.....	55
5.2 Взаимосвязь показателей надежности изделий с его эксплуатационными показателями. Общие требования к технологической системе производства.....	57
5.3 Взаимосвязь эксплуатационных показателей с показателями качества изготовления сборочных единиц и общие требования к технологическим операциям.....	61
5.4 Основные причины отказов, связанные с технологией изготовления изделий.....	64
5.5 Основные понятия о технологических системах и методах оценки их надежности.....	71

5.6 Оценка надежности выполнения задания технологической системой по параметрам качества продукции	75
6 Основные направления повышения надежности летательных аппаратов совершенствованием технологических систем их производства, испытания и контроля	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	89

Введение

Одними из основных показателей, характеризующих качество современных изделий, являются показатели надежности. В настоящее время в связи со своей многоплановостью и важностью наука о надежности определилась как самостоятельная отрасль знаний. Она изучает закономерности изменения показателей качества технических устройств и на основании этого разрабатывает методы, обеспечивающие с наименьшими затратами времени и средств необходимую продолжительность и безотказность их работы. Основными разделами науки о надежности являются: теория физико-химического старения (физика отказов), математическая теория надежности, методы конструирования и расчетов на надежность, технологические методы обеспечения надежности, экономика надежности изделий и др.

Учебное пособие содержит материал в соответствии с учебными дисциплинами «Технологические методы обеспечения надежности» и «Теория надежности» (специальности 160201, 160801, 160802, 200503). Содержит сведения о современном состоянии и теоретических основах прикладной научной дисциплины и ее роли в обеспечении качества изделий на стадии производства. Оно предназначено для закрепления и углубления знаний студентов и инженерно-технического персонала предприятий и КБ в области теоретических основ этих вопросов. В тоже время, в связи с объемом пособия в нем не отражены разделы, связанные с физикой отказов, экономикой и конкретными методами испытаний и контроля, которые излагаются в учебных дисциплинах и закрепляются при выполнении лабораторных работ.

При этом в отличие от существующего методического материала по этому вопросу в данном пособии с единых позиций рассматривается надежность изделий, надежность технологических систем и влияние технологии на формирование показателей надежности.

1 Надежность как прикладная научная дисциплина и её задачи по обеспечению качества летательных аппаратов

1.1 Роль надежности в обеспечении качества

Основной характеристикой любого технического изделия (самолета, космического аппарата, ракеты-носителя, технологического оборудования и т.д.) является его эффективность [1-5]. Под эффективностью понимают свойство изделия соответствовать своему назначению. Эффективность определяется качеством изделия и условиями его эксплуатации. Качество изделия определяется не всеми его свойствами, а только той совокупностью его свойств, которые обуславливают пригодность изделия для удовлетворения определенных потребностей в соответствии с его назначением. В зависимости от вида изделия и его назначения совокупность его свойств, определяющих качество изделия, может существенно изменяться. Однако абсолютно для всех изделий в эту совокупность свойств входит такое свойство изделия, как надежность.

Надежностью называется свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки (ГОСТ 27.002-83).

Надежность является комплексным свойством, состоящим из следующей совокупности свойств: безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность. В зависимости от вида изделия каждая из этих составляющих имеет различную относительную значимость.

Хотя надежность является только одним из свойств качества, тем не менее именно она в абсолютном большинстве случаев определяет эффективность (в том числе экономическую и тактико-техническую) и безопасность использования изделия. Так, из-за недостаточной надежности изделий стоимость затрат на их ремонты и техническое обслуживание может в несколько раз превышать стоимость нового изделия. Существенное недоиспользование потенциальных возможностей изделий имеет место при завышении требований к их безотказности, так как в этом случае изделия снимаются с эксплуатации при меньших сроках службы. Существуют и такие последствия ненадежности изделий, кото-

рые нельзя оценить никакими экономическими и техническими показателями - гибель людей и экологические катастрофы. Проблема надежности изделий, особенно, таких высокоответственных как летательные аппараты, в настоящее время всеми общепризнана, и на обеспечение надежности новых изделий вкладываются суммы, достигающие 80...90% всех затрат по техническому проекту, а сроки запуска изделия в серийное производство из-за его доводки до заданных значений показателей надежности могут возрастать в 3-5 раз и более [1,2,5-7].

1.2 Вероятностная природа показателей качества и надежности

При испытаниях любой партии деталей, изготовленных из одной плавки по одной технологии, всегда наблюдается разброс значений в измеренных характеристиках. Так, коэффициент вариации предела прочности специальных образцов из сталей достигает 0,07, коэффициент вариации предела выносливости образцов достигает 0,15, а коэффициент вариации интенсивности изнашивания может достигать 0,2. Значения же коэффициентов вариации этих же величин для деталей изделия могут быть существенно больше [1,2,6,9-13]. Поэтому, проводя расчет специального образца или детали изделия на предельные характеристики по какому-нибудь параметру, возникает вопрос: какое значение предела прочности (предела усталости, интенсивности изнашивания и т.д.) необходимо подставить в расчет? Если мы подставляем наименьшее возможное, то это заведомо приводит к снижению эффективности изделия. Подстановка же максимального значения будет приводить к слишком частому возникновению поломок. Реальное же значение рассматриваемой характеристики для выбранной детали неизвестно. Его можно получить только после её испытания, но при этом деталь уже будет непригодна для эксплуатации в составе изделия.

Правильный ответ на такой вопрос может быть сформулирован только в вероятностном аспекте - подставляя выбранное значение параметра в расчет, необходимо указать или рассчитать вероятность возникновения отказа для этого значения параметра.

Аналогичная ситуация возникает при испытании самих изделий - отказы одинаково изготовленных изделий и испытываемых в одинаковых условиях также возникают через различные промежутки времени. В

этом случае также возникает вопрос: какой ресурс назначить для этого изделия? Ответ на этот вопрос совпадает с ответом в предыдущем случае. Таким образом, анализ надежности изделия должен проводиться с учетом вероятностной природы обеспечения требуемого уровня характеристик материалов, изготовленных из них деталей и изделия в целом. При этом необходимо иметь в виду, что реально эксплуатируемое изделие (ракета, самолет, станок и т.д.) находится под воздействием внешних нагрузок, значения которых также имеют разброс. Не менее важное влияние на параметры надежности и их дисперсию оказывают внутренние физико-химические процессы, протекающие при работе самого изделия [1,4,7].

1.3 Основные разделы и задачи прикладной научной дисциплины о надежности изделия

Важнейшая роль надежности в обеспечении эффективности изделий, а также её методологические особенности привели к выделению надежности в самостоятельную прикладную научную дисциплину. Наука о надежности изучает закономерности изменения показателей качества изделий и на основании этого разрабатывает методы анализа и обеспечения показателей надежности при проектировании, изготовлении, испытании и эксплуатации изделий [1,2,7,8-10,14].

В связи со спецификой различных видов технических изделий в науке о надежности есть самостоятельные направления, определяемые видом изделия. В этих направлениях много общего, но есть и отличия, связанные в основном с технологическими и конструктивными методами обеспечения надежности конкретных видов изделий [1,2,7,8-10,14].

Перед наукой о надежности стоят следующие основные задачи:

- 1) установление источников информации об изменении показателей надежности;
- 2) разработка методов диагностики и контроля изменения показателей качества;
- 3) исследование физико-химических закономерностей, приводящих к изменению показателей качества;
- 4) разработка математических методов расчета, прогнозирования и подтверждения значений показателей качества по результатам испытаний;
- 5) разработка технических рекомендаций, конструктивных и технологических методов и организационных мероприятий, обеспечивающих достижение заданного уровня надежности изделий на стадиях их разработки, производст-

ва и эксплуатации.

Как любая наука, надежность в своем развитии и становлении прошла сложный диалектический путь. На начальном этапе надежность развивалась по двум самостоятельным направлениям. Первое направление возникло в технологии машиностроения на основе изучения физико-химической природы изменения свойств материалов (усталости, старения, износа, деградации, коррозии и т.д.) при внешних (эксплуатационных и технологических) воздействиях. Это направление в настоящее время получило название "Физика отказов" [1,6,7].

Второе направление возникло в радиотехнике на основе разработки математических методов оценки показателей надежности сложных систем со статистической обработкой эксплуатационной информации методами теории вероятностей. Это направление заложило основы второго раздела науки о надежности - математической теории надежности [14].

Математическая теория надежности разрабатывает математические модели надежности технических систем и прогнозирует поведение таких систем методами теории вероятности и математической статистики. Физика отказов разрабатывает физические и математические модели изменения свойств материалов в результате внешних воздействий. Результаты этих двух разделов служат исходными данными для проектирования, расчета, испытаний и контроля изделий на надежность, а также для разработки технологий производства изделий с нужным уровнем надежности и качества.

1.4 Этапы формирования надежности летательных аппаратов

Действующими стандартами регламентирован единый порядок разработки, производства и эксплуатации создаваемых изделий, который состоит из трех основных стадий: разработка изделия; серийное производство; эксплуатация изделия.

Особенность решения вопросов по надежности заключается в том, что эти вопросы должны решаться на каждой из перечисленных стадий, так как изменить уровень надежности изготовленного изделия нельзя, как, например, изменить его товарный вид. Только после эксплуатации или специальных испытаний можно определить уровень его надежности, а затем, если это необходимо, внести коррективы в конструкторскую,

производственную или эксплуатационную документацию и изготовить новое изделие с более высоким уровнем надежности. В общем случае только в результате определенного цикла таких итераций можно гарантировать определенный уровень надежности изготавливаемого изделия. Естественно, такой итерационный путь длителен и требует больших материальных ресурсов. В связи с этим при создании новых изделий закладываются специальные мероприятия для ускорения и удешевления процесса отработки изделия на надежность, которые оформляются в виде комплексных программ [1,3-6,13].

Необходимость решения вопросов по надежности на каждой из трех стадий часто подчеркивается в так называемой формуле надежности изделия – надежность закладывается на этапе проектирования (разработки), обеспечивается на этапе производства и реализуется на этапе эксплуатации изделия [1,2,5,6]. Рассмотрим кратко основные особенности этих трех этапов с точки зрения надежности.

После получения задания на разработку изделия производится сбор и изучение данных по диапазонам нагрузки и внешних воздействий на разных стадиях эксплуатации изделий. Изучают фактически достигнутый уровень надежности в эксплуатации изделия и его узлов, выбранных прототипами. Особый интерес для надежности представляют изделия, снятые с эксплуатации из-за отказов или полной выработки ресурса. На основании этой информации уточняют требования к отдельным элементам изделия и производят подбор материалов с учетом их прочностных характеристик, обрабатываемости, производственных возможностей и стоимости. После этого разрабатывается комплексная программа достижения нужного уровня надежности изделия с конкретизацией выполняемых работ по отдельным узлам и изделию в целом на каждой стадии создания изделия.

При проектировании и конструировании закладывается надежность изделия. Она зависит от конструкции изделия и её узлов, применяемых материалов и технологий, методов защиты от внешних воздействий, систем смазки, приспособленности к ремонту и обслуживанию и т.д. Любой узел и агрегат можно сконструировать бесконечным числом способов, рассчитав надежность конструкции по статическим нагрузкам. Однако, в настоящее время существует не много расчетов, позволяющих прогнозировать поведение конструкции в реальных условиях эксплуата-

ции с учетом динамики и статистического характера внешних воздействий. Поэтому проектирование строится на основании использования конструкций, которые были в изделиях, прошедших эксплуатацию. Обычно при создании новых типов изделий используется до 50 и более процентов агрегатов и узлов, выполненных по ранее разработанным схемам и апробированных в серийной эксплуатации. Это, с одной стороны, ускоряет и удешевляет процесс запуска в серию изделия, но, с другой стороны, замедляет прогресс развития техники. Для вновь же проектируемых узлов и агрегатов проводится комплекс опережающих мероприятий по их изготовлению и испытанию на моделирующих установках, стендах и специальных летающих лабораториях. Опережающие мероприятия планируются таким образом, чтобы на сборку опытного образца поступали узлы и агрегаты с известными показателями надежности.

При производстве изделия должна быть обеспечена надежность, заложенная при её проектировании, т.е. технология изготовления определяет, насколько могут быть реализованы потенциальные возможности конструкции. Известно, что до 80% отказов в работе изделий возникает по вине заводов-изготовителей. На данном этапе надежность зависит от обоснованности и полноты требований конструкторской и технологической документации на показатели качества деталей, сборочных единиц и изделий в целом, технологических процессов изготовления и сборки деталей, методов контроля испытаний, возможностей управления технологическими процессами, соответствия оборудования и технологической дисциплины серийного завода опытно-экспериментальному заводу, а также других технологических показателей, таких как технологическая наследственность, взаимозаменяемость, стабильность параметров оборудования на серийном заводе и т.д. Пока летательные аппараты подвергались эксплуатационным нагрузкам небольшого уровня, делались из среднепрочных материалов, имели большие коэффициенты безопасности и небольшие ресурсы, статические расчеты и существующие технологии обеспечивали надежность изделий. Однако переход на высокопрочные материалы для обеспечения более высокой эффективности изделия показал, что такие материалы значительно более чувствительны к любым изменениям внешних воздействий как при эксплуатации, так и при изготовлении [1-6].

В этих условиях выяснилось, что технологические процессы очень сильно влияют на надежность. В очень небольшой степени это учитывается в чертежах по шероховатости и покрытиям, а также ссылками на соответствующие технологические инструкции по изготовлению. Однако это совершенно недостаточно, так как два изделия, изготовленные на разных заводах по одинаковым чертежам, будут иметь совершенно разные показатели надежности. В связи с этим во всех высокоразвитых странах мира достаточно давно пришли к пониманию того, что практически все основные элементы "know how" новых изделий связаны с технологией их изготовления. Как отмечается в [1,6] ссылка в чертежах на технологические инструкции "отражает в основном печальный опыт конструкторов и конструкторских подразделений", но в малой степени обеспечивает такую регламентацию технологии, при которой гарантирован определенный уровень надежности изделия. Обеспечение гарантированного уровня надежности изделия, особенно в условиях серийного производства, является сложной технической задачей, решаемой в течение достаточно длительного периода запуска изделия в производство с помощью специальных программ или политики обеспечения качества.

Важнейшей особенностью и отличием показателей надежности от других показателей качества является то, что их уровень выявляется только при эксплуатации, причем их значения нельзя измерить с помощью прибора на готовом изделии и указать, сколько времени осталось до наступления отказа. Надо отметить, что по некоторым частным направлениям диагностики (спектры акустической эмиссии, наличие частиц износа в смазках, визуальный контроль и т.д.) намечается прогресс в оперативной диагностике изделий по текущему состоянию.

Приведенная общая схема отработки изделия на надежность конкретизируется в зависимости от вида летательного аппарата и опыта, накопленного в подразделении, обеспечивающем его выпуск.

2 Основные понятия и определения теории надежности

2.1 События, состояния и показатели

Прикладная научная дисциплина надежность, как любая научная дисциплина оперирует специальными терминами и понятиями. Объектом исследований науки о надежности являются любые технические устройства, сборочные единицы, их детали, средства оснащения технологических процессов и т.д. Для формализованного описания этих объектов вводятся понятия систем и элементов, которые отражают только некоторые оговоренные представления об этих объектах. В соответствии с общепринятыми положениями в настоящем пособии термин «изделие» будет применяться в самом широком смысле, обозначая любое техническое устройство, которое, в зависимости от конкретного рассмотрения, может быть представлено как система структурно связанных элементов, так и элемент, структура которого не конкретизируется. Следовательно, наука о надежности рассматривает надежность не только самого технического устройства, но и надежность технологических систем изготовления этих устройств.

Наука о надежности выделяет состояния изделий (исправное и неисправное, работоспособное и неработоспособное и т.д.) и события (повреждение, отказ и т.д.), которые могут происходить с этими изделиями. При этом наука о надежности изучает вполне определенные свойства изделий, характеризующие их надежность: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Каждое из этих свойств характеризуется набором конкретных количественных показателей. Например, для безотказности – вероятность безотказной работы, вероятность выполнения технологического задания, интенсивность отказов и т.д. Для количественного определения этих показателей используется математический аппарат теории вероятностей и математической статистики. При этом величины показателей качества изделий рассматриваются как случайные величины, рассеивание значений которых возникает из-за стохастической природы технологических процессов и процессов их измерения и диагностики.

Например, летательный аппарат и технологическая система его изготовления характеризуется определенным набором свойств. Для коли-

качественной оценки определенного свойства вводится понятие показателя. Например, показатели качества, показатели надежности, показатели точности функционирования, показатели экономичности и т.д. Показатель характеризует в количественном виде, в какой степени эти свойства присущи конкретному изделию. При рассмотрении показателя следует различать: его наименование; его формулировку, содержащую указание о способе экспериментального или расчетного определения его численного значения; размерность показателя; его численное значение, которое может изменяться в зависимости от условий измерения, условий эксплуатации или стадии разработки изделия.

Показатели могут быть единичными или комплексными и они оговариваются в нормативных документах на изделие. При этом также оговаривается допустимая величина отклонения этих параметров от установленных значений, уровень внешних нагрузок при измерении параметра и необходимость проведения измерений при обязательном соблюдении методов и сроков технического обслуживания и ремонта изделия.

Свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения параметров, оговоренных в нормативно-технической документации, характеризует техническое состояние изделия. Различают следующие шесть основных видов технического состояния изделий: исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное, предельное и состояние списания (рис. 1).

В исправном состоянии изделие соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Если же изделие не соответствует хотя бы одному требованию этой документации, то его состояние неисправное. В неисправном состоянии изделие переходит вследствие возникновения дефекта. Однако, в неисправном состоянии изделие может быть работоспособным и неработоспособным. Работоспособное состояние накладывает меньше ограничений на изделие, чем исправное состояние, и требует, чтобы только те значения параметров, которые характеризуют способность изделия выполнять заданные функции, соответствовали документации на изделие. При этом в документации должно оговариваться, какие параметры обеспечивают работоспособное состояние.

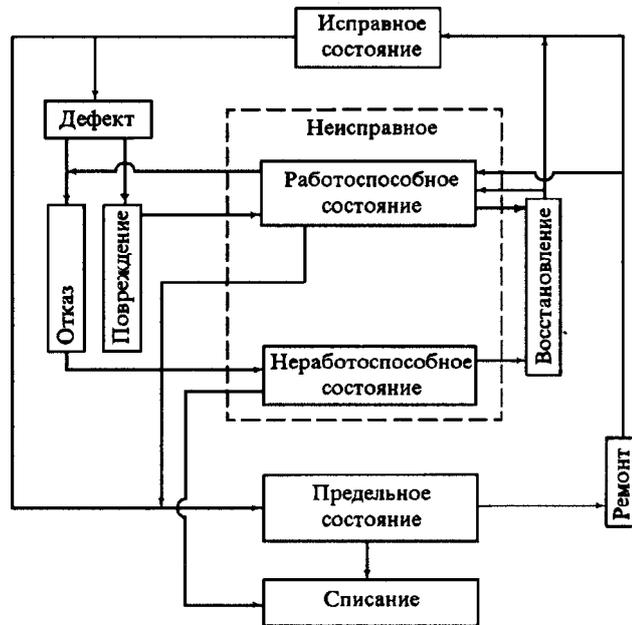


Рис. 1 – Виды состояний изделий

Дефект, приводящий к переходу изделия из исправного состояния в неисправное, но работоспособное, получил название повреждения. В неработоспособном состоянии хотя бы один параметр изделия, характеризующий его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации. Дефект, приводящий к переходу изделия из исправного или работоспособного неисправного состояния в неработоспособное состояние, получил название отказа. Таким образом, повреждение изделия сохраняет его способность выполнять заданные функции, а отказ - нет.

Предельное состояние – это такое состояние, при котором его эксплуатация должна быть прекращена в соответствии с требованиями документации. Т.е. переход в предельное состояние определяется нецелесообразностью или недопустимостью дальнейшего применения изделия по его назначению. Обычно переход в предельное состояние задается выработкой изделием ресурса или срока службы. Для изделия в предельном состоянии ставится вопрос либо о целесообразности проведения его ремонта для перевода изделия в исправное или работоспособное со-

стояние, либо о его списании.

Переход изделия из неработоспособного (предельного) состояния в работоспособное осуществляется с помощью операций восстановления или ремонта. К операциям восстановления в основном относят операции идентификации отказа (определение его места и характера), замены, регулирования и контроля технического состояния и контроля работоспособности изделия в целом. При ремонте же происходит восстановление ресурса изделия в целом. В основном термин ремонт применяется при восстановлении работоспособности изделия из предельного состояния.

В зависимости от вида изделия подразделяют на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Восстанавливаемые изделия - это те, для которых в рассматриваемой ситуации (вид дефекта) восстановление работоспособности предусмотрено нормативно-технической и конструкторской документацией. Таким образом, восстанавливаемое изделие может при определенных видах дефектов не подлежать восстановлению.

В зависимости от того, предусмотрено ли документацией проведение ремонта на изделие в предельном состоянии, все изделия подразделяют на ремонтируемые или неремонтируемые. Причиной списания ремонтируемого изделия из предельного состояния или восстанавливаемого изделия из неработоспособного состояния может быть: невозможность обеспечения нужного уровня эффективности или надежности после восстановления или ремонта; неоправданно большие затраты на восстановление или ремонт; моральное старение изделия.

В настоящее время значительная часть авиационных изделий эксплуатируется по фактическому состоянию. При этом в процессе планового технического обслуживания проводится дефектация и восстановление исправного состояния без отправки изделия в специализированные ремонтные предприятия. Для применения этого прогрессивного метода необходимо оснащать изделия эффективными средствами контроля и диагностики работоспособности основных частей, отказы которых влияют на безопасность полетов, а также обеспечивать контролепригодность, доступность, взаимозаменяемость и идентичность функциональных характеристик отдельных узлов и агрегатов.

2.2 Отказы технических изделий и их классификация

В нормативно-технической документации на изделие указываются

признаки, позволяющие установить факт нарушения его работоспособности. Эти признаки по своей сути являются критериями отказа технического изделия.

Отказ любого технического изделия всегда происходит внезапно в том смысле, что точно предсказать момент времени его возникновения невозможно. Поэтому с точки зрения математики отказы всегда моделируются случайными событиями. Однако это случайное событие может быть предопределено либо грубыми ошибками на этапе разработки, изготовления или эксплуатации изделия, либо произойти из-за неблагоприятного сочетания множества различных факторов. И хотя, как уже отмечалось, момент времени возникновения отказа в первом и втором случае предсказать невозможно, принято отказы, возникающие из-за грубых ошибок, называть детерминированными (предопределенными).

При классификации отказов необходимо различать классификацию, проведенную для правильного применения математического аппарата теории надежности, и классификацию, проведенную для применения её в инженерном анализе.

С точки зрения инженерного анализа выявления причин возникновения отказа принята следующая классификация:

1. По месту проявления отказа (например, в полете или на земле);
2. По их последствиям (например, летное происшествие, невыполнение полетного задания или без последствий);
3. По причинам возникновения (конструкционный, производственный, эксплуатационный из-за внешних или случайных причин, эксплуатационный из-за ошибок наземного технического персонала, эксплуатационный из-за ошибок летного состава и т.д.);
4. По способу устранения (например, восстановление на месте эксплуатации, восстановление в ремонтных организациях, списание).

В зависимости от периода эксплуатации изделия выделяют отказы, возникающие в начальный период (приработочные отказы), в период нормального функционирования и в период естественного старения материалов конструкции.

Кроме того, отказы подразделяют на отказы функционирования, при которых выполнение своих функций изделием прекращается, и параметрические отказы, при которых значения некоторых параметров изделия достигли оговоренных допусков, но само изделие еще могло бы

выполнять свои функции. Этим определяется особая опасность отказов функционирования в отличие от параметрических отказов. В связи с этим важной задачей науки о надежности является разработка диагностических методов, позволяющих перевести отказы функционирования в параметрические. Например, постоянный контроль содержания металла (частиц износа) в смазке узла трения позволяет прогнозировать износ узла трения и исключить его заклинивание и создание условий для возникновения другого совместного отказа функционирования. Также весьма перспективными являются методы акустической эмиссии определения накопления микроповреждений в конструкции.

С позиций математического аппарата теории надежности отказы моделируют случайными событиями, для описания которых, используют случайные величины (числа). Эти случайные величины могут принимать либо дискретные значения (число отказов на заданном промежутке времени, число бракованных деталей в партии, число промахов и т.д.), либо принимать значения, непрерывно заполняющие некоторый промежуток (момент времени возникновения отказа, геометрический размер изготовленной детали, величина износа поверхности трения и т.д.). Эти отказы могут быть совместными или несовместными, зависимыми или независимыми.

Отказы технических устройств могут зависеть или не зависеть от времени их работы до момента отказа. В связи с этим в технической литературе по надежности вводят понятия постепенного и внезапного отказа [1,4,9]. При этом под постепенным отказом понимают отказ, у которого вероятность его возникновения в данный промежуток времени зависит от длительности времени его работы до этого момента времени. Эти отказы часто называют также "износными", вкладывая в этот термин изменение свойств изделия по мере его эксплуатации (износ поверхностей сопряжения, старение материалов, накопление усталостных повреждений и т.д.), а сами изделия называют «стареющими». Вместе с тем, надо иметь в виду, что у одного изделия по каким-то параметрам возможны постепенные (износные) отказы, а по каким-то – внезапные, а все постепенные отказы также по своей сути возникают внезапно в случайные моменты времени. Поэтому в этом случае было бы более правильно использовать термины, применяемые при описании потока случайных событий, и использовать, например, для постепенных отказов термин

нестационарный поток отказов, а для внезапных – стационарный.

2.3 Функция распределения вероятности случайных событий и отказов. Числовые характеристики функции распределения

При многократных наблюдениях за случайными событиями выявляется, что они подчиняются определенным закономерностям. Эти закономерности описываются законами теории вероятности. Случайная величина может быть непрерывной (время, длина и т.д.) или принимать дискретные значения (число отказов). Из-за невозможности заранее указать, какое конкретное значение примет случайная величина, для её характеристики вводится понятие вероятности.

Вероятность – это численная мера объективно существующей возможности появления (или не появления) изучаемого события A , которая обычно обозначается через $P\{A\}$.

Классический способ определения вероятности основан на рассмотрении равновероятных событий, являющихся исходами данного испытания. В случае, когда такие испытания независимы, а события несовместны и образуют полную группу, вероятность события определяется как отношение числа случаев, благоприятных появлению данного события, к общему числу событий при неограниченном возрастании числа испытаний. При проведении конечного числа испытаний эта вероятность оценивается с помощью эмпирической (или статистической) оценки, которая получила название частота или частость случайного события. Частость равна отношению числа испытаний, в которых появилось данное событие, к общему числу испытаний. Величина частости сама является случайной величиной (в отличие от вероятности), так как в различных сериях испытаний её величина будет изменяться случайным образом, группируясь около своей вероятности. Из определения вероятности следует, что $0 \leq P\{A\} \leq 1$. Событие, вероятность которого $P\{A\}=1$, называется достоверным, а событие, вероятность которого $P\{A\}=0$, называется невозможным.

Если случайная величина может принимать конечное (более двух) или бесконечное число значений, то для её характеристики необходимо использовать функцию распределения вероятности (ФРВ) случайной

величины.

По определению ФРВ некоторой случайной величины ξ , имеющей область возможных значений реализации этой величины $[a_n, a_b]$, называется вероятность того, что случайная величина ξ принимает значения меньше, чем значение некоторой детерминированной величины x , т.е. $F(x) = P\{\xi < x\}$.

Например, пусть какое-нибудь изделие начинает работать в момент времени $t=0$, а в некоторый момент времени $t=T$ возникает случайное событие - отказ изделия. Тогда множество возможных реализаций этих событий характеризуется количественно множеством значений, которое может принимать случайная величина, которую в этом случае принято обозначать не через ξ , а через T . Это множество (генеральная совокупность) имеет границы $a_n=0, a_b=+\infty$. В теории надежности величина T получила название наработка до отказа, а ФРВ – функции распределения вероятности наработок до отказа или просто «функции отказов»:

$$F(t) = P\{T < t\}. \quad (1)$$

Статистической оценкой вероятности наступления отказа в интервале от $t=0$ до $t=k\Delta t$ будет величина:

$$F_k = \sum_{i=1}^{i=k} P_i, \quad (2)$$

где $P_k = \Delta n_k / N$ - частота или статистическая оценка вероятности наступления отказа на некотором k -ом интервале $t \in [(k-1)\Delta t, k\Delta t]$; Δn_k - число изделий, отказавших на k -ом интервале; N – полное число изделий, поставленный на испытание и отказавших в результате этих испытаний.

Из определения следует, что $F(0)=0$ и $F(\infty)=1$, а сама функция $F(t)$ является монотонной неубывающей функцией в этой области.

Аналогично вводится ФРВ при рассмотрении других случайных величин. Например, при выполнении технологического процесса получена партия одинаковых деталей, каждая из которых может быть охарактеризована некоторыми параметрами качества: геометрическими размерами, твердостью материала, пределом прочности и т.д. или отклонением этих параметров от заданного значения. При измерении этого параметра на одной из деталей мы получим его некоторое значение x . Очевидно, что

при проведении следующего измерения на этой же детали (если это возможно) измеренное значение этого же параметра будет иметь другое значение. Кроме того, значение этого же параметра на другой детали из этой партии тоже будет иметь значение отличное от уже полученного. Следовательно, величина этого параметра качества является случайной величиной, которую для удобства обозначим через ξ . Все множество возможных реализаций этой случайной величины, в зависимости от ее конкретного физического смысла, может иметь верхнюю и нижнюю границы в виде конечных значений, в том числе и отрицательных (отклонение параметра от заданного значения). Часто, в определенных случаях значения этих границ, для удобства расчетов не ограничивают конечными значениями, а продолжают до $-\infty$ или $+\infty$. Такое искусственное расширение области реализации в каждом конкретном случае должно иметь количественное обоснование. В этом случае, как следует из определения $F(x)$, она принимает значения $F(a_n)=0$ и $F(a_d)=1$ и является монотонной неубывающей функцией в этой области. Статистическое описание ФРВ для случайной величины ξ дается той же формулой (2), что и для случайной величины T , в которой вместо t надо подставить значение x , а Δn_k - число измеренных значений параметра качества, лежащих в каждом интервале.

В практических расчетах на надежность с помощью специальной процедуры стараются всегда перейти от значений, представляющих в этой области кусочно-непрерывную, ступенчатую функцию $\hat{F}_k(x)$ к непрерывной функции $F(x)$, которую также называют теоретической функцией распределения вероятности конкретной случайной величины. Это связано с тем, что, несмотря на большое разнообразие технических изделий, а, следовательно, бесконечное множество экспериментальных распределений, все они сводятся к небольшому числу теоретических распределений.

Дифференциальной характеристикой ФРВ отказов является плотность и интенсивность отказов:

$$f(t) = dF/dt, \quad \lambda(t) = f(t)/(1 - F(t)), \quad (3)$$

а их статистической оценкой являются величины:

$$f_k(t) = \Delta n_k / N \Delta t_k \text{ и } \lambda_k = \Delta n_k / \left[\Delta t_k \left(N - \sum_{i=1}^{k-1} \Delta n_i \right) \right], \quad (4)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяется как условная плотность ФРВ отказов невозстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не наступил. Следовательно, интенсивность отказов является дифференциальной характеристикой, учитывающей только возможность возникновения отказа в рассматриваемый момент времени, без учета предыстории функционирования изделия, в том смысле, что не учитывает отказы, которые произошли в предыдущие моменты времени.

Закон распределения случайной величины, представляемый в виде ФРВ этой случайной величины, полностью описывает случайную величину с вероятностной точки зрения. Однако во многих практических вопросах нет надобности в таком полном описании, а достаточно бывает указать только некоторые отдельные численные параметры, характеризующие существенные черты распределения. Основными числовыми характеристиками ФРВ являются: математическое ожидание, дисперсия, коэффициент вариации и квантиль.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины T , имеющей ФРВ (1), определяется одним из следующих соотношений:

$$M[T] = m_T = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF. \quad (5)$$

Дисперсия непрерывной случайной величины характеризует её рассеивание вокруг математического ожидания и определяется следующими выражениями:

$$D[T] = d_T = \int_0^{\infty} (t - m_T)^2 f(t) dt = \int_0^{\infty} (t - m_T)^2 dF. \quad (6)$$

В практических расчетах часто вместо дисперсии используют стандартное отклонение σ_T , имеющее ту же размерность, что и случайная величина. Стандартное отклонение равно $\sigma_T = \sqrt{d_T}$. Рассеивание случайной величины вокруг её математического ожидания в относительных единицах (долях математического ожидания) характеризуется коэффици-

циентом вариации: $v_T = \sigma_T / m_T$.

Квантиль порядка α случайной величины, имеющей ФРВ $F(t)$, это такое значение случайной величины, при котором функция распределения этой величины принимает значение, равное α т.е. квантиль t_α является корнем уравнения:

$$F(t_\alpha) = \alpha . \quad (7)$$

Квантиль порядка $\alpha=0,5$ называется медианой распределения, так как делит площадь под графиком функции плотности распределения пополам, модой случайной величины является такое значение квантиля, которое соответствует максимальной величине плотности распределения.

Аналогично приводятся все приведенные выше определения для любой другой случайной величины ξ , а не только для наработки до отказа T . При этом в приведенных формулах параметр t необходимо заменить на x , а в формулах (5) и (6) интегрирование проводить от нижнего (a_n) до верхнего (a_o) значения границы области возможной реализации случайной величины x .

2.4 Безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность. Единичные и комплексные показатели надежности

Надежность изделия является сложным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения состоит из сочетания свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Безотказность – это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторой наработки. Безотказность должна быть присуща изделию в любом из режимов его существования (в период работы, хранения и транспортировки), хотя часто безотказность рассматривается только применительно к режиму эксплуатации.

Долговечность – это свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодность – это свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения дефектов и поддержанию и восстановлению работоспособного

состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта. Свойство ремонтпригодности характеризует изделие не только при проведении ремонтов в предельном состоянии, но характеризует его приспособленность для профилактических мероприятий и восстановления после возникновения дефекта.

Сохраняемость – это свойство изделия сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение его хранения и транспортировки и после них. Сохраняемость характеризует свойство изделия противостоять отрицательным условиям хранения и транспортировки и представляется в виде двух составляющих: одна из них проявляется во время хранения и транспортировки, а другая - во время применения объекта после его хранения и транспортировки.

Каждое из перечисленных свойств надежности характеризуется набором показателей. Безотказность характеризуется следующими показателями: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентная наработка до отказа, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, параметр потока отказов.

Вероятность безотказной работы P_H - это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникает. Используя (1) и тот факт, что отказ и безотказная работа образуют полную группу несовместных событий, получаем:

$$P_H(t) = 1 - F(t) = 1 - P\{T < t\} = P\{T \geq t\}. \quad (8)$$

Вероятность безотказной работы выражается через плотность распределения на основе соотношения

$$P_H(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt, P_H(0) = 1, P_H(\infty) = 0. \quad (9)$$

Важной особенностью вероятности безотказной работы является то, что указание её величины без указания пределов наработки не имеет смысла, так как вероятность безотказной работы изделия изменяется с течением времени его эксплуатации (рис.2). Задавая допустимое значение γ вероятности безотказной работы изделия в период его эксплуатации $[0, T_\gamma]$ предполагается, что в этот период вероятность безотказной работы изделия должна удовлетворять условию $P_H(t) \geq \gamma$. В связи с тем, что $P_H(t)$ убывающая функция, верхняя граница ее наработки до отказа t

$= T_\gamma$ определится из условия $P_H\{t=T_\gamma\} = \gamma$ чем и гарантируется выполнение неравенства $P_H\{t \leq T_\gamma\} \geq \gamma$. Поэтому для изделия указание его вероятности безотказной работы без указания периода эксплуатации не имеет смысла. Например (рис.2), у одного и того же изделия вероятность безотказной работы $P_H(T_\gamma)=\gamma$ рассматриваемая в период наработки $[0, T_\gamma]$, во много раз больше вероятности безотказной работы $P_H(T_\gamma)=\gamma$, рассматриваемой за период наработки $[0, T_\gamma]$ при $T_\gamma > T_\gamma$

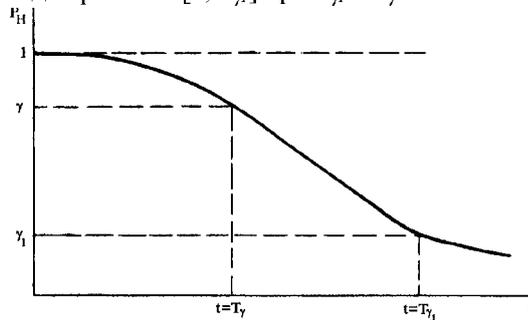


Рис. 2 – Вероятность безотказной работы изделия в зависимости от длительности времени его эксплуатации

Для режимов хранения и транспортировки могут также использоваться термины вероятность безотказного хранения или вероятность безотказной транспортировки.

На основе этого определения также вводятся показатели вероятность выполнения технологического задания для технологических систем и вероятность выполнения задания по параметру качества в расчетах на надежность. Эти понятия являются частными случаями понятий доверительная вероятность и доверительный интервал.

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание наработки изделия до отказа, т.е. средняя наработка до отказа определяется формулой (5). Показатель средняя наработка до отказа может применяться не только в период эксплуатации изделия, но и в период его хранения и транспортировки.

Гамма–процентная наработка до отказа – это наработка, в течение которой отказ изделия не возникает с вероятностью γ (при этом γ указывают в процентах), т.е. гамма–процентная наработка – это квантиль функции вероятности безотказной работы, определяемый как корень

одного из уравнений:

$$P_H(T_\gamma) = \gamma \text{ или } \int_{T_\gamma}^{\infty} f(t)dt = \gamma. \quad (10)$$

Величина гамма-процентной наработки T_γ и T_H для значений γ и λ представлена на рисунке 2.

Интенсивность отказов – это условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Используя (3 и 9), получаем:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P_H(t)} \cdot \frac{dP_H}{dt}. \quad (11)$$

Средняя наработка на отказ – это отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Средняя наработка на отказ и параметр потока отказов используются в качестве показателя безотказности восстанавливаемого изделия, например, технологического оборудования или обрабатывающего инструмента. Эксплуатация таких изделий может быть описана следующим образом. В начальный момент времени изделие начинает работу и работает до отказа, после отказа происходит его восстановление и изделие вновь работает до отказа. Моменты отказов на оси суммарной наработки или на оси непрерывного времени образуют поток отказов. В качестве характеристики потока отказов используют ведущую функцию $\Omega(t)$ данного потока – математическое ожидание числа отказов за время t , т.е.: $\Omega(t) = M[r(t)]$, где M – символ математического ожидания; $r(t)$ – число отказов за время t . Поэтому средняя наработка на отказ T_{CP} будет определяться из соотношения

$$T_{CP}(t) = t/\Omega(t) = t/M[r(t)]. \quad (12)$$

Поток отказов также характеризуют параметром потока отказов $\omega(t)$ – отношением среднего числа отказов восстанавливаемого изделия за произвольно малую его наработку к значению этой наработки, т.е.: $\omega(t) = d\Omega(t)/dt$.

Долговечность изделия характеризуется следующими показателями: ресурсом (средним, гамма-процентным, назначенным, техническим);

сроком службы (средним, гамма-процентным, назначенным).

Ресурс или технический ресурс – это время работы изделия от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Срок службы же определяется календарной наработкой до перехода в предельное состояние.

Технический ресурс для неремонтируемых изделий совпадает с продолжительностью пребывания в работоспособном состоянии в режиме применения по назначению, если переход в предельное состояние обусловлен только возникновением отказа. Поскольку средний или капитальный ремонт позволяет частично или полностью восстановить ресурс, отсчет времени работы, образующей ресурс, возобновляют по окончании такого ремонта, различая в связи с этим доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) ресурс. Аналогичным образом выделяют виды срока службы.

Средний ресурс и средний срок службы – это математическое ожидание ресурса или срока службы, соответственно.

Гамма-процентный ресурс (гамма-процентный срок службы) – это время (календарная продолжительность) от начала эксплуатации, в течение которого он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Величина гамма-процентного ресурса в случае аналитического задания вероятности безотказной работы определяется из соотношения (10) или графически из рисунка 2. Из этих соотношений следует, что увеличение вероятности безотказной работы изделия без его совершенствования возможно только за счет уменьшения величины гамма-процентного ресурса.

Назначенный ресурс (срок службы) определяется суммарным временем работы (календарной продолжительностью эксплуатации) изделия, при достижении которой его применение по назначению должно быть прекращено. Цель установления назначенного ресурса или назначенного срока службы - обеспечение принудительного заблаговременного прекращения применения изделия по назначению, исходя из требований безопасности или экономического анализа.

Для объектов, подлежащих длительному хранению, может быть установлен назначенный срок хранения, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо.

При достижении изделием назначенного ресурса или срока службы,

в зависимости от его назначения, особенности эксплуатации, технического состояния и других факторов изделие может быть: списано; направлено в средний или капитальный ремонт; передано для применения не по назначению; принято решение о продолжении эксплуатации.

Отметим, что ресурс и срок службы может быть задан не только временем, но и другой физической величиной, например, пробегом (километры), объемом выполненной работы (тонны) и т.д.

Ремонтопригодность изделия характеризуется следующими показателями: вероятностью восстановления работоспособного состояния; средним временем восстановления работоспособного состояния; средней трудоемкостью восстановления работоспособного состояния.

Вероятность восстановления работоспособного состояния – это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданного времени.

Среднее время (средняя трудоемкость) восстановления работоспособного состояния – это математическое ожидание времени (трудоемкости) восстановления работоспособного состояния.

Время восстановления отсчитывают либо непрерывно, либо из него по определенным правилам исключают интервалы времени, не обусловленные непосредственно выполнением восстановительных работ. В связи с этим различают общее время и оперативное время восстановления работоспособности изделия.

Сохраняемость характеризуется средним и гамма-процентным сроком сохраняемости.

Средний срок сохраняемости определяется как математическое ожидание срока сохраняемости, а гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый изделием с заданной вероятностью γ выраженной в процентах.

Необходимо отметить, что показатели безотказности и долговечности определялись на основе функции распределения вероятности отказов (или функции надежности), в то же время для ремонтпригодности необходимо знание функции распределения вероятности времени восстановления, а для сохраняемости – функции распределения вероятности срока сохраняемости. Причем различают сохраняемость изделия до ввода в эксплуатацию и сохраняемость изделия в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае срок сохраняемости входит со-

ставной частью в срок службы. Кроме того, для срока сохраняемости до ввода изделия в эксплуатацию выделяют срок сохраняемости в законсервированном виде, срок сохраняемости при монтаже и срок сохраняемости на более сложном законсервированном объекте.

К комплексным показателям надежности относят: коэффициент готовности; коэффициент оперативной готовности; коэффициент технического использования; коэффициент планируемого применения; коэффициент сохранения эффективности.

При оценке надежности технологических систем вводятся показатели по параметрам качества продукции, параметрам производительности процесса и параметрам затрагиваемых ресурсов, которые будут рассмотрены в п. 5.3.

3 Математические модели надежности

3.1 Моделирование надежности изделий

Прогнозировать потерю работоспособности любого изделия можно только тогда, когда создана математическая модель процесса потери работоспособности [1,5,7.9]. Применительно к задачам теории надежности изделий такая математическая модель [1,2,15] представляет собой совокупность аналитических, графических и табличных зависимостей выходных параметров от входных, управляющих и возмущающих (внешних воздействий) параметров, а также параметров состояния изделия (рис. 3). Причем, в отличие от физико-химических, технологических или конструктивных моделей [15] математические модели теории надежности [1,5] обладают повышенной сложностью, так как включают в себя все перечисленные модели (рис. 3).

Математическое моделирование, по сути, решает две задачи – получение формализованного описания функционирования изделия и исследование изделия при помощи вычислительного эксперимента над математической моделью.

Решение сформулированных статистических моделей (рис. 3) в общем случае представляет значительные математические трудности. Это связано со следующими обстоятельствами.

Летательный аппарат имеет примерно $10^3 \dots 10^6$ деталей. Количество отдельных параметров, определяющих качество детали и её положение в изделии (размеры, допуски, характеристики материала и т.д.), равно примерно 10^2 . Таким образом, летательный аппарат в целом характеризуется $10^5 \dots 10^8$ параметрами. Несоответствие хотя бы одного из них номинальным значениям может привести к отказу всего изделия. Кроме того, каждый из этих параметров является случайной величиной, которая через функциональную зависимость зависит от большого числа других случайных параметров.

Поэтому в теории надежности разработаны специальные подходы, позволяющие упростить решение поставленных задач. Первое упрощение связано с введением понятия элемент, под которым понимают любую систему, не подлежащую разбиению на более простые элементы в рамках данного исследования. В зависимости от поставленной задачи элементом может быть агрегат, отсек, панель, узел, любая деталь и места

их соединения или сопряжения, любое из сечений детали или конструкции, а также само изделие. Статистическое изучение этого элемента позволяет построить функцию распределения вероятности для рассматриваемого параметра (обычно это параметры, определяющие отказ или точность функционирования). С помощью этого распределения можно найти все показатели надежности элемента. В связи с тем, что ЛА состоит из большого числа описанных элементов, их анализ проводится с помощью приближенного метода, получившего название метода структурных схем.



Рис. 3 – Структурная схема математической модели потери работоспособности изделия

Два описанных вида упрощений (элемент и структурная схема из элементов) позволяют решать основные задачи прикладной теории надежности.

3.2 Этапы функционирования изделия. Экспоненциальный закон и закон Вейбулла распределения вероятности

стей отказов изделий

На практике установлено, что изменение интенсивности отказов в течение всего жизненного цикла изделия можно представить обобщенной зависимостью в виде рисунка 4. На этой зависимости можно выделить три различных участка. На первом участке, называемом периодом приработки, интенсивность отказов в зависимости от времени эксплуатации уменьшается. В этот период выявляются и устраняются случайные отказы, вызванные явными ошибками производства (неправильная регулировка, неточная сборка и т.д.), отказы, связанные с отклонениями фактических условий работы и нагрузок от предполагаемых при выполнении проектных работ, а также отказы, связанные с приработкой различных узлов и сопряжений. Период приработки обычно включают в продолжительность обкаточных или приработочных испытаний.

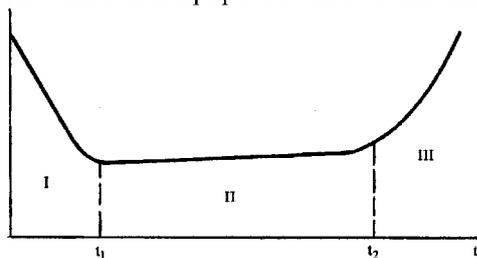


Рис. 4 – Зависимость интенсивности отказа изделия от времени его эксплуатации

На втором участке интенсивность отказов для технического изделия остается примерно постоянной. Этот период получил название периода нормальной эксплуатации. В этот период постепенные (износные) отказы еще не проявляются, а могут возникать только внезапные отказы.

Третий период получил название периода естественного старения материалов. В этот период кроме случайных отказов начинают возникать постепенные отказы, вызванные накоплением износных, коррозионных, усталостных, деструкционных и других повреждений. Вероятность возникновения отказа изделия с течением времени возрастает, поэтому эксплуатация изделия становится небезопасной или нерентабельной, следовательно, она должна быть прекращена.

Установим зависимость вероятности безотказной работы от времени, используя в качестве основного параметра интенсивность отказов. С этой

целью используем соотношение (11) для интенсивности отказов, из которого получим дифференциальное уравнение и проведя интегрирование в пределах от 0 до t с учетом того факта, что $P_H(0) = 1$, будем иметь:

$$P_H(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right\}. \quad (13)$$

Соотношение (13) получило название основного уравнения теории надежности. Для периода нормальной эксплуатации $\lambda = \text{const}$. Подставляя это значение в (13), получим экспоненциальный закон:

$$P_H = e^{-\lambda t}, \quad F(t) = 1 - P_H(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (14)$$

Распределение (14) является однопараметрическим, так как зависит от одного параметра λ , который выражается через математическое ожидание и дисперсию на основе следующих соотношений: $m_t = 1/\lambda$, $d_t = 1/\lambda^2$.

В связи с простотой аналитического выражения экспоненциальное распределение нашло очень широкое применение в теории надежности. Его применяют – для всех систем в период нормального функционирования при возникновении только внезапных отказов; для всех систем при рассмотрении небольших отрезков времени, на которых можно считать $\lambda \approx \text{const}$; для сложных систем, состоящих из большого числа элементов.

На первом и третьем участке (рис. 4) интенсивность отказов зависит от времени, и для аппроксимации этой зависимости используется степенная функция в виде:

$$\lambda(t) = m \cdot t^{m-1} / t_0, \quad (15)$$

где параметр $m > 0$ получил название параметра формы, а параметр $t_0 > 0$ получил название параметра масштаба.

Подставляя (15) в (13) и выполнив интегрирование, получим для функции вероятности безотказной работы и ФРВ отказов соотношения:

$$P_H(t) = \exp\{-t^m/t_0\}, \quad F(t) = 1 - \exp\{-t^m/t_0\}. \quad (16)$$

ФРВ в виде (16) получила название распределение Вейбулла (табл.1). Это двухпараметрическое распределение, которое в зависимости от значения параметра формы позволяет описывать другие известные распределения. Так при $m < 1$ это распределение используется для описания приработки изделия (интенсивность отказов убывает со време-

нем), при $m=1$ это распределение совпадает с экспоненциальным распределением (14), при $m>1$ это распределение используется для описания этапа естественного старения материала изделия, причем в случае $m=2$ оно совпадает с распределением Рэлея, а при $m \cong 3,3$ близко к нормальному распределению.

3.3 Нормальный закон распределения вероятностей случайных величин

Наиболее широкое применение в теории вероятностей и различных её прикладных приложениях, в том числе и в теории надежности, имеет нормальный закон распределения вероятностей случайных величин. Такое широкое применение данного закона связано с центральной предельной теоремой теории вероятностей, суть которой сводится к следующему утверждению: если некоторая случайная величина ξ является

суммой большого числа независимых случайных величин ξ_i : $\xi = \sum_{i=1}^n \xi_i$

и если среди слагаемых ξ_i нет таких, влияние которых на дисперсию ξ является преобладающим (или проще – нет отдельных слагаемых, ξ_i величина которых сравнима с величиной суммы ξ), то при неограниченном возрастании числа слагаемых закон распределения вероятности случайной величины ξ все с более высокой точностью приближается к нормальному закону вне зависимости от того, каким законом распределения подчиняются слагаемые ξ_i .

Исходя из формулировки этой теоремы легко привести большое число примеров из различных областей знаний, когда априори можно утверждать, что некоторый рассматриваемый параметр имеет нормальное распределение.

Нормальный закон распределения вероятностей некоторой случайной величины ξ , имеющей область возможных реализаций $[a, b]$, имеет плотность распределения, определяемую следующим выражением:

$$f(x) = \frac{C}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x - m_x}{\sigma_x} \right)^2 \right\}, \quad (17)$$

где C – параметр, определяемый из условий нормировки ФРВ (1), m_x и

σ_x – математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины, что легко устанавливается с помощью соотношений (5) и (6).

Используя определение ФРВ и ее связь с плотностью распределения (3), получим:

$$F(x) = P\{a \leq \xi < x\} = \int_a^x f(\zeta) d\zeta. \quad (18)$$

Подставляя в (18) выражение (17) и проведя необходимые преобразования, получим:

$$F(x) = C \{ \Phi(U_p(x)) - \Phi(U_p(a)) \}, \quad (19)$$

где $\Phi(U_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_p} \exp(-\frac{1}{2}z^2) dz$ – интеграл ошибок или интеграл

Лапласа, $U_p(x) = ((x - m_x)/\sigma_x)$ – квантиль нормального распределения.

Используя условия нормировки ФРВ $F(x)$, заключающиеся в выполнении условия $F(b) = 1$, получим в явном виде выражение для нормировочной константы:

$$C = \{ \Phi(U_p(b)) - \Phi(U_p(a)) \}^{-1}. \quad (20)$$

Интеграл ошибок $\Phi(U_p)$, через который выражается в явном виде ФРВ $F(x)$, является табличной функцией, значения которой приведено в справочной литературе. Он обладает следующими основными свойствами: $\Phi(U_p) = -\Phi(-U_p)$ – является нечетной функцией; $\Phi(0) = 0$; $\Phi(\infty) = 0,5$ – интеграл Пуассона.

Если множество возможных реализаций случайной величины ξ совпадает с действительной осью, то есть нижняя граница $a = -\infty$, а верхняя – $b = \infty$, то $\Phi(-\infty) = -0,5$ и $\Phi(\infty) = 0,5$ и нормировочная константа C принимает значение равное 1 (20). Поэтому только для случайной величины, имеющей область возможных реализаций в виде всего множества действительных чисел возможно применение формул (17) и (19) с $C=1$. Если же интервал возможных реализаций случайной величины конечен, то в (17) и (19) необходимо использовать константу C в виде

(20). Однако, если величина $U_p(b) \geq 3$ и $U_p(a) \leq -3$, то $\Phi(U_p(b)) \geq 0,4986$, а $\Phi(U_p(a)) \leq -0,4986$ и величина константы C отличается от 1 на величину меньшую 0,0028. Следовательно, в этом случае можно использовать упрощенный вид функций (17) и (19) с $C \cong 1$, допуская погрешность меньшую 0,3%.

Нормальное распределение также используется для описания распределения случайной величины T – наработки до отказа, имеющей область возможных реализаций $[0, \infty]$. Подставляя значения верхней и нижней границ в интеграл ошибок ($\Phi(U_p(\infty)) = 0,5$ и $\Phi(U_p(0)) = \Phi(-m_T/\sigma_T)$), получим выражение для ФРВ отказов (19) и (20) в виде:

$$F(x) = \frac{\Phi(U_p(t)) - \Phi(-m_T/\sigma_T)}{0,5 - \Phi(-m_T/\sigma_T)}, \quad (21)$$

$$C = \{0,5 - \Phi(-m_T/\sigma_T)\}^{-1}. \quad (22)$$

В таблице 1 приведены численные значения интеграла ошибок и константы C (22) в зависимости от значения параметра m_T/σ_T .

Таблица 1

Численные значения интеграла ошибок и нормировочной константы для ФРВ отказов в зависимости от параметра m_T/σ_T

№	1	2	3	4	5
1	m_T/σ_T	1	2	3	4
2	$-\Phi(-m_T/\sigma_T)$	0,3413	0,4772	0,4986	0,49997
3	C	1,189	1,023	1,001	1,00003

Из таблицы 1 видно, что только при $m_T/\sigma_T \geq 3$ с погрешностью менее 0,1% ФРВ отказов можно записать в виде:

$$F(t) = 0,5 + \Phi(U_p(t)), \quad (23)$$

Отметим, что во многих учебниках по надежности ФРВ отказов используют в виде (23) и (17) с $C=1$ не указывая, что это приближенный вид распределения, а величина допускаемой погрешности зависит от коэффициента вариации этого параметра $\nu_T = \sigma_T/m_T$.

Из соотношения (23) следует, что в этом случае функцию распреде-

ления вероятности безотказной работы (8) можно представить в виде:

$$P_H(t) = 1 - F(t) = 0,5 - \Phi(U_p(t)), \quad (24)$$

где выражение для квантиля распределения имеет вид:

$$U_p(t) = (t - m_T) / \sigma_T. \quad (25)$$

Нормальное распределение вероятности случайной величины двух-параметрическое, содержащее в явном виде в качестве параметров m – математическое ожидание и σ – стандартное отклонение.

Нормальное распределение случайной величины обладает важным свойством, которое называется устойчивостью нормального распределения. Суть этого свойства сводится к следующему. Если случайная величина ξ является линейной композицией других случайных величин ξ_i :

$$\xi = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \xi_i + a_0, \quad (26)$$

(здесь a_i и a_0 – детерминированные величины), распределенных по нормальному закону с параметрами распределения m_{ξ_i} и σ_{ξ_i} , то случайная величина ξ распределена также по нормальному закону с математическим ожиданием:

$$m_\xi = \sum_{i=1}^n a_i \cdot m_{\xi_i} + a_0, \quad (27)$$

и стандартным отклонением:

$$\sigma_\xi^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sigma_{\xi_i}^2. \quad (28)$$

Это свойство нормального распределения широко используется в теории надежности и других прикладных приложениях теории вероятности, например, при оценке производственных погрешностей, в управлении качеством продукции и т.п. Кроме того, при малых значениях коэффициента вариации нормальное распределение хорошо аппроксимирует биномиальное, Пуассоново и логарифмическое нормальное распределение.

Основные виды непрерывных распределений случайной величины, используемых в теории надежности, представлены в таблице 2. В таблице использовано обозначение: $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$ – гамма-функция.

Логарифмическое нормальное распределение (№3 табл. 2) используют для описания наработки до отказа деталей по усталости. Распределение Вейбулла (№4 табл. 2) используют для описания надежности изделий по приработочным отказам и усталостным разрушениям. Распределение χ^2 (№6 табл. 2) в основном используется для оценки границ доверительных интервалов и проверки правдоподобия гипотез. Распределение Стьюдента (№7 табл. 2) применяют для оценки границ доверительных интервалов при конечном числе измерений.

3.4 Дискретные распределения вероятностей случайных величин

Большинство контрольных или испытательных процедур в теории надежности осуществляется в соответствии со схемой последовательных независимых испытаний Бернулли. Суть этой схемы сводится к следующему. Имеется N изделий, которые последовательно испытываются. Каждое такое испытание может завершиться одним из двух несовместных событий – некоторое событие A или наступает или не наступает. Например, изделие признается годным или бракуется. Обозначим вероятность наступления события A через p , тогда вероятность ненаступления этого события будет $q = 1 - p$. Если можно считать, что вероятность p не зависит от номера испытаний, то такая схема и носит название схемы последовательных независимых испытаний Бернулли.

Обозначим через ξ случайное событие заключающееся в появлении события A ровно k раз при N испытаниях. Можно доказать, что вероятность появления события A ровно k раз при N испытаниях определяется следующим соотношением:

Таблица 2

Основные непрерывные распределения теории надежности.

№	Название распределения	Область значений	Плотность распределения	Функция распределения вероятности	Математическое ожидание	Дисперсия
1	Равномерное	(a, b)	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{x-a}{b-a}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
2	Нормальное (Гаусса)	$(-\infty, \infty)$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$0,5 + \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$	μ	σ^2
3	Логарифмическое нормальное	$(0, \infty)$	$\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$0,5 + \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)$	$e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$	$e^{2\sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$
4	Вейбулла	$(0, \infty)$	$\frac{r}{t_0} e^{-\frac{r}{t_0} x^k}$	$1 - e^{-\frac{r}{t_0} x^k}$	$\frac{1}{t_0} \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$\frac{2}{t_0^2} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
5	Экспоненциальное	$(0, \infty)$	$\lambda e^{-\lambda x}$	$1 - e^{-\lambda x}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
6	χ^2 -распределение	$(0, \infty)$	$\frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} x^{\frac{\nu}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}$	$\int_0^x f(x^2) dx$	ν	2ν
7	Стьюдента	$(-\infty, \infty)$	$\frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu\pi} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}$	$2 \int_0^x f(x) dx$	0	$\frac{1}{\nu-2}$

$$P(N, k) = P\{\xi = k\} = C_k^N p^k q^{N-k}, \quad (29)$$

где $C_k^N = N!/[k!(N-k)!]$ – коэффициенты бинома Ньютона, $N! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot N$ – факториал числа N и $0! = 1$ – по определению.

ФРВ случайной величины ξ , отражающей появление события A не более k раз при N испытаниях, по определению (2) равна:

$$F(k) = P\{\xi < k\} = \sum_{i=0}^{k-1} P(N, i). \quad (30)$$

Распределение случайной величины, описываемое соотношениями (29) или (30) носит название биномиального распределения.

Математическое ожидание и дисперсия этого распределения определяется соотношениями:

$$M[\xi] = m_\xi = \sum_{i=0}^N i \cdot P(N, i) = N \cdot p, \quad (31)$$

$$D[\xi] = d_\xi = \sum_{i=0}^N (i - M[\xi])^2 \cdot P(N, i) = N \cdot p \cdot q. \quad (32)$$

Часто при использовании схемы независимых последовательных испытаний Бернулли для большого числа испытываемых изделий вместо случайной величины $\xi = k$ используют другую случайную величину \hat{p} , описывающую частоту или частоту наступления события ξ ,

$$\hat{p} = \xi / N. \quad (33)$$

Оказывается, что частота \hat{p} наступления события A реализуется с той же вероятностью (29), что и число ξ событий A :

$$P\{\xi = k\} = P\left\{\frac{\xi}{N} = \frac{k}{N}\right\} = P(N, k). \quad (34)$$

Поэтому ФРВ случайных величин ξ и \hat{p} имеют одинаковый вид (30), однако математическое ожидание и дисперсия для \hat{p} имеют вид отличный от этих параметров для ξ .

$$M[\hat{p} = (\xi/N)] = M[\xi]/N = p, \quad (35)$$

$$D[\hat{p} = (\xi/N)] = D[\xi]/N^2 = pq/N. \quad (36)$$

В связи с тем, что $D[\hat{p}] \rightarrow 0$, а $M[\hat{p}] = p$ при $N \rightarrow \infty$, следует важное заключение о том, что частота наступления события является состоятельной, несмещенной и эффективной оценкой вероятности P в последовательных независимых испытаниях Бернулли (см. п. 2.3).

При использовании биномиального распределения в прикладных расчетах из-за сложности вычисления факториалов в (29) при больших N используют приближенные формулы.

Так, при $p < 0,1$ и $pN \cong 1$ используется распределение Пуассона:

$$P\{\xi = k\} \cong P_\lambda(k) = \lambda^k e^{-\lambda} / k!, \quad \lambda = pN \quad (37)$$

Если $pN > 4$ и $Nq > 4$, то биномиальное распределение часто заменяют на нормальное с параметрами $m_\xi = pN$ и $\sigma_\xi = \sqrt{pNq}$ (теорема Муавра-Лапласа):

$$F(k) \cong 0,5 + \Phi(U_p(k)), \quad U_p(k) = (k - m_\xi) / \sigma_\xi \quad (38)$$

Кроме рассмотренных дискретных распределений в теории надежности также используются и некоторые другие распределения.

3.5 Моделирование сложных технических систем прямым аналитическим методом

В предыдущем разделе при построении функций распределения вероятности некоторого параметра элемента мы не учитывали, что этот параметр может быть функцией большого числа аргументов x_i , распределенных с некоторыми плотностями вероятности $f(x_i)$. Необходимость решения задач такого типа в теории надежности возникает всегда, когда надо ответить на следующие вопросы: Из-за каких причин получена недостаточная надежность элемента или изделия? Каким образом можно повысить показатели надежности?

Сформулируем задачу моделирования следующим образом. Выходной параметр Y некоторого технического элемента является случайной величиной, зависящей через функциональную зависимость $Y = \varphi(X_1, \dots, X_N)$ от случайных аргументов $X_1 \dots X_N$. Из результатов исследований известны плотности распределения $f(x_1) \dots f(x_N)$. Требуется найти плотность распределения $f(y)$.

Необходимо отметить, что в замкнутом аналитическом виде решение такой задачи может быть получено только в некоторых частных случаях [1,4,5,9]. Причем, даже в случае простых функциональных зависимостей между выходными и входными параметрами законы распределения входных параметров претерпевают изменение на выходе системы. Законы распределения, которые при определенных функциональных

преобразованиях не претерпевают изменений, носят название устойчивых. Как уже было отмечено при композиции случайных величин $Y=X_1+\dots+X_N$ устойчивыми будут только законы нормального распределения, Пуассона и биномиальный закон.

3.6 Моделирование сложных технических систем методом структурных схем

Сущность метода структурных схем заключается в том, что рассматриваемое изделие или система представляется в виде расчетной схемы, состоящей из отдельных элементов, которые в результате последовательного или параллельного их соединения образуют соответствующую структурную схему. Разбивка сложного изделия на отдельные элементы может быть произведена сколь угодно большим числом способов. Однако при этом необходимо соблюдать следующие принципы: 1) Каждый элемент должен выполнять вполне определенные функции и формировать определенный выходной параметр. 2) Каждый элемент должен иметь вполне определенные характеристики надежности. 3) Все элементы изделия могут иметь только по одному отказу. 4) Изделие представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных соединений. События, изображенные в виде элементов и звеньев структурной схемы, должны быть независимы. 5) В структурной схеме не должно быть событий, среди которых одно событие является отрицанием другого. Одно и то же событие должно представляться в виде одного звена.

Основой структурных схем являются условные виды последовательных и параллельных соединений звеньев, выражающих событие безотказности действия отдельных элементов системы. Эти виды соединений не всегда совпадают с монтажными названиями соединений.

Последовательным соединением элементов с точки зрения надежности называется такое соединение, при котором для безотказной работы системы требуется безотказная работа всех элементов. Последовательное соединение графически представляют в виде рисунка 5,а.

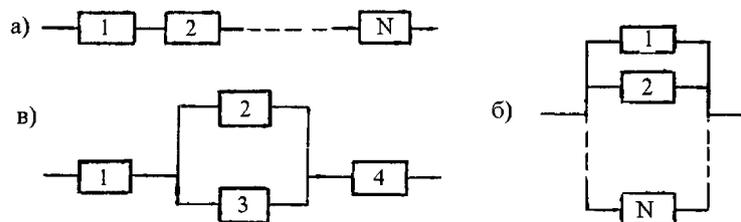


Рис. 5 – Виды соединения элементов по надежности: а - последовательное соединение, б - параллельное соединение, в - смешанное соединение

Обозначим через Y_i случайное событие, заключающееся в безотказности работы i -элемента. Тогда событие Y_c , заключающееся в безотказности работы всей системы, наступит тогда и только тогда, когда наступят события Y_1, Y_2, \dots, Y_N . Используя независимость событий Y_i и то, что событие Y_c представлено в виде произведения исходных событий, получим для вероятности безотказной работы соотношение:

$$P_H(Y_c) = \prod_{i=1}^N P_H(Y_i) \text{ или } P_{H,C} = \prod_{i=1}^N P_{H,i}, \quad (39)$$

где $P_H(Y_c) = P_{H,C}$, $P_H(Y_i) = P_{H,i}$.

Параллельным соединением элементов с точки зрения надежности называется такое соединение, при котором для безотказной работы системы требуется безотказная работа хотя бы одного элемента. Параллельное соединение графически представлено в виде рисунка 5,б.

Для установления связи между вероятностью безотказной работы системы и вероятностью безотказной работы элемента обозначим через Q_i случайное событие, заключающееся в отказе i -го элемента. Тогда для наступления отказа всей системы Q_c необходимо, чтобы отказали все элементы или наступило событие, равное произведению событий Q_1, Q_2, \dots, Q_N . Используя независимость событий Q_i и теорему умножения вероятностей, получим для вероятности наступления отказа и вероятности безотказной работы системы соотношения:

$$F_c = P(Q_c) = \prod_{i=1}^N P(Q_i) = \prod_{i=1}^N F_i, \quad P_{H,C} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{H,i}). \quad (40)$$

С помощью последовательного и параллельного соединения элементов можно смоделировать структурную схему для любой технической системы. Например, систему выпуска шасси некоторых самолетов можно представить в виде рисунка 5,в, где элемент 1 моделирует основ-

ную гидросистему, элементы 2 и 3 моделируют основную и аварийную системы выпуска шасси, а элемент 4 моделирует шасси. Обозначая вероятности безотказной работы каждого элемента через $P_H(i)$, получим вероятность безотказной работы $P_{H,C}$ для этой системы в виде $P_{H,C} = P_H(1)P_H(4)[1 - (1 - P_H(2))(1 - P_H(3))]$.

Рассмотрим расчетные формулы для вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа сложной системы, состоящей из N элементов, в период нормального её функционирования.

Учитывая, что в период нормального функционирования вероятность безотказной работы i -го элемента подчиняется экспоненциальному закону $P_{H,i} = \exp\{-\lambda_i t\}$, получим для последовательного соединения:

$$P_{H,C} = \prod_{i=1}^N P_{H,i} = \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i t}. \quad (41)$$

При $\lambda_1 = \lambda_N = \lambda$ получим $P_{H,C} = e^{-\frac{t}{m_{t,c}}}$, где $m_{t,c} = m_t/N$, $\lambda = 1/m_t$.

Из этих соотношений видно, что последовательное соединение элементов по надежности очень сильно снижает как вероятность безотказной работы системы, так и среднюю наработку до отказа. Например, системы из 10 последовательных элементов в 10 раз уменьшит величину средней наработки до отказа, а вероятность безотказной работы системы за наработку $t = m_t$ уменьшится почти в 10^3 раз.

Для случая параллельного соединения N элементов с одинаковой интенсивностью отказов λ получим:

$$P_{H,C} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{H,i}) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda t}) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^N. \quad (42)$$

Из этого соотношения видно, что система параллельно соединенных элементов с экспоненциальными законами надежности не подчиняется экспоненциальному закону. Средняя наработка до отказа такой системы определяется выражением:

$$m_{t,c} = m_t \sum_{k=1}^N k^{-1}. \quad (43)$$

Из соотношений (42) и (43) видно, что параллельное соединение элементов по надежности увеличивает вероятность безотказной работы системы и среднюю наработку до отказа. Видно, что применение в системе параллельных элементов по надежности позволяет очень сильно

повысить вероятность безотказной работы системы, однако средняя наработка до отказа с увеличением числа элементов возрастает существенно медленнее. Использование параллельного подключения элементов по надежности является одним из способов повышения показателей надежности сложных изделий резервированием.

3.7 Повышение надежности летательных аппаратов и технологических систем их производства резервированием

Как было отмечено в предыдущем разделе, любое техническое изделие с позиций надежности может быть разбито на элементы, соединенные последовательно, параллельно или смешанно. Например, топливный бак ракеты имеет сварные швы, соединяющие обечайку с верхним и нижним днищем. С позиций надежности топливный бак может быть представлен как последовательное соединение элементов, описывающих безотказную работу обечайки, верхнего и нижнего днища, всех сварных швов на баке, так как с отказом любого из этих элементов отказывает весь отсек. С другой стороны, хвостовой отсек состоит из обшивки и большого числа стрингеров. Стрингеры как элементы, обеспечивающие надежность отсека, можно считать соединенными параллельно, так как с разрушением одного стрингера нагрузка, действующая на отсек, с помощью торцевых шпангоутов перераспределяется на неотказавшие стрингеры, и весь отсек не теряет работоспособность. Однако отказавший стрингер не является лишним, потому что без него надежность отсека уменьшается. Если при сжатии отсека допускается образование волны (частичная потеря устойчивости), то стрингеры и обшивку можно считать соединенными параллельно, если образование волны недопустимо, то соединение – последовательное.

Конструктивные элементы могут быть зависимыми и независимыми. Примером зависимых элементов является пример со стрингерами, когда надо учитывать изменение надежности отсека при отказе одного из стрингеров. Если с определенным допуском такое изменение надежности можно не учитывать, тогда стрингеры можно считать независимыми элементами.

Как было отмечено при выводе соотношений (42) и (43), существует эффективный способ повышения надежности изделий за счет параллельного включения эквивалентных элементов. Такой способ связан с

резервированием. Сущность резервирования заключается в том, что в системах предусматриваются избыточные (резервные) агрегаты, детали, узлы, блоки, вступающие в работу при появлении неисправностей основных рабочих элементов. В летательных аппаратах имеется много примеров резервирования. Например, в самолетах предусматривается установка двух подкачивающих насосов в топливных системах, двух заборников топлива из баков, резервное питание тормозной системы, аварийный выпуск шасси и щитков закрылков, аварийное управление стабилизатором и т.д. Примерами резервирования являются также статически неопределимые силовые элементы конструкций планера, ракеты или космического корабля. Большое количество резервных элементов, агрегатов и блоков имеется в бортовом радио- и радиотехническом оборудовании летательного аппарата.

Существует два метода резервирования – общее резервирование (резервируется вся система) и резервирование системы по элементам. Сравним эти два метода с позиций повышения вероятности безотказной работы всей системы. Считая (для простоты анализа), что вероятность безотказной работы P_H всех элементов одинакова, и используя (42), получим для системы с общим и поэлементным резервированием соотношения: $P_{H,0} = 1 - (1 - P_H^k)^n$, $P_{H,\varepsilon} = [1 - (1 - P_H)^n]^k$. Перейдя в этих соотношениях к вероятности отказа $F = 1 - P_H$ и воспользовавшись тем, что $(1 - F)^n \cong 1 - nF$ (при $F \ll 1$), получим для вероятности отказа при общем $F_{C,0}$ и поэлементном $F_{C,\varepsilon}$ резервировании:

$$F_{C,0} = 1 - P_{H,0} \cong nkF, \quad F_{C,\varepsilon} = 1 - P_{H,\varepsilon} \cong kF^n. \quad (44)$$

Полученные соотношения (44) показывают, что поэлементное резервирование дает выигрыш в увеличении вероятности безотказной работы. Например, при $F=0,1$ и $n=3$ получим: $F_{C,\varepsilon}/F_{C,0} = F^{n-1}/n \cong 3 \cdot 10^{-4}$, таким образом, вероятность отказа снижается в $3 \cdot 10^4$ раза.

Однако надо учитывать, что при поэлементном резервировании возникает существенно большее число дополнительных элементов, обеспечивающих включение каждого элемента в систему. Эти элементы подключения являются элементами системы по надежности, обладающими вероятностью безотказной работы $P_H \neq 1$, которую необходимо учитывать при расчете и которая, естественно, снизит полученный выигрыш.

рыш.

Резервные элементы могут быть включены на все время эксплуатации в режиме основного элемента (нагруженный резерв), могут включаться после выхода из строя основных элементов (ненагруженный резерв) или могут быть включены постоянно, но в менее нагруженном режиме, чем основной элемент (облегченный резерв). Особенность резервирования систем летательных аппаратов, например, гидравлических систем, систем управления стабилизатором и т.д. состоит в том, что в них, как правило, применяются системы и агрегаты с нагруженным резервом. Это объясняется условиями работы и тяжелыми последствиями, к которым ведет выход из строя этих систем. Системы с ненагруженным резервом не всегда обеспечивают условия непрерывной работы (на включение резервной системы требуется определенное время), и в процессе работы изделия возникает разрыв. Поэтому в большинстве случаев ненагруженный резерв применяется как аварийный, обычно действующий кратковременно.

В жизненно важных системах летательных аппаратов, отказ которых угрожает безопасности полетов, резервированию уделяют особое внимание. Целесообразно структуру управления резервных систем в этих случаях строить по методу "пересиливания" или "подавления" отказавшего агрегата. Этот метод более надежен по сравнению с методом использования специальных систем для определения отказа элемента, его отключения и включения резервного. Кроме того, например, при отказе основной и резервной систем управления стабилизатором их система управления обеспечивает перестановку стабилизатора в посадочное положение.

При общем резервировании с постоянно включенным резервом все системы работают на одну нагрузку. При отказе какой-либо одной системы нагрузка перераспределяется на оставшиеся системы. Это понижает вероятность безотказной работы не только потому, что уменьшается кратность резервирования, но также из-за увеличения нагрузки на каждую оставшуюся систему.

Анализ характеристик надежности при общем резервировании с постоянно включенным резервом показывает (42) и (43), что вероятность безотказной работы резервированной системы всегда больше вероятности безотказной работы нерезервированной и она растет с ростом крат-

ности резервирования. Средняя наработка до отказа при этом растет существенно медленнее. Вероятность безотказной работы при поэлементном резервировании при прочих равных условиях всегда выше вероятности безотказной работы системы с общим резервированием. Причем это отличие возрастает в случае уменьшения интенсивности отказов (44) (точнее в случае уменьшения λ). Следовательно, резервировать целесообразно мелкие узлы и детали сложной системы.

Резервирование позволяет из малонадежных элементов изготовить достаточно надежную систему. Однако при этом может существенно увеличиться масса, габариты и стоимость изделия. Поэтому на практике решается задача оптимального проектирования - обеспечение нужного уровня надежности резервированием (часто поиск максимума вероятности безотказной работы) при ограничениях на массу, габариты и стоимость и т.д.

Роль влияния кратности резервирования на вероятность безотказной работы хорошо демонстрирует соотношение (43). Так, например, из трех одинаковых элементов с малым значением $P_H=0,9$ в течение некоторой наработки можно изготовить высоконадежную систему с $P_H=0,999$, повысив среднюю наработку на отказ в 1,83 раза.

Резервирование также используется в технологических системах производства. Так, если некоторый параметр качества детали подвергается контрольной процедуре, то важно считать, что эти два элемента (технологическая операция и контрольная процедура), с точки зрения надежности, включены параллельно.

4 Выбор показателей надежности технических изделий

4.1 Общая схема обоснования выбора показателей надежности

Выбор вида показателей надежности зависит от общего назначения изделия; ответственности выполняемых им функций; выбор обусловлен последствиями, возникающими при отказе изделия; экономическими соображениями и т.д.

Основным показателем безотказности любого технического изделия является вероятность безотказной работы P_H . Однако по мере эксплуатации изделия P_H убывает. Поэтому вероятность безотказной работы связана с основным параметром долговечности – гамма-процентным ресурсом функциональной зависимостью $P_H(T_\gamma) = \gamma$.

Следовательно, задаваясь допустимыми изменениями P_H в процессе эксплуатации, можно назначить T_γ при достижении которого изделие попадает в предельное состояние. После капитального ремонта и восстановления P_H для изделия может быть назначено новое значение $T_{\gamma 1}$. При последующей эксплуатации величина P_H опять начинает снижаться и т.д. Обычно при каждом последующем ремонте число замененных узлов увеличивается $N_1 < N_2 < N_3 < \dots$. Эксплуатация изделия с ремонтами продолжается до тех пор, пока восстановление уровня надежности станет или невозможным, или невыгодным.

Таким образом, возможны два варианта выбора показателей надежности.

Первый вариант. При высоких требованиях к надежности изделия задаются допустимые значения γ и по этому значению определяют гамма-процентный ресурс.

Второй вариант. При обычных требованиях к надежности, когда отказ изделия не приводит к катастрофическим последствиям и большим экономическим потерям, задаются величиной T_γ и по этому значению рассчитывают P_H . Исходя из полученного значения назначают сроки плановых ремонтов и технического обслуживания таким образом, чтобы величина P_H в межремонтный период лежала в приемлемых пределах.

Однако и в первом, и во втором вариантах существуют предельные

случаи, когда параметр безотказности P_H перестает быть наглядным.

Первый случай характерен для тех отказов, которые легко устранимы и не приводят к каким-либо значительным последствиям. Например, замена режущего инструмента при работе на станке, необходимость поправлять в транспортном лотке заклинившие детали и т.д. В этом случае характеристикой безотказности является параметр потока отказов.

Другой крайний случай возникает при оценке высоконадежных изделий, когда значение $P_H(t)$ близко к единице. В этих случаях расчет производится по коэффициентам безопасности или коэффициентам запаса надежности. В теории надежности такой расчет обычно проводится как расчет вероятности безотказной работы изделия по заданному параметру. В связи с особой важностью этого вопроса рассмотрим его более подробно.

4.2 Основы параметрической теории надежности. Вероятность выполнения задания по параметру качества

При расчетах на прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость, усталость, точность изготовления и т.д. проводится сопоставление по некоторым критериям расчетных параметров с их предельными значениями.

Считают, что работоспособность по данному критерию обеспечена, если расчетный параметр критерия x меньше (или больше) заданного предельного значения x_n . Учитывая требования надежности, в такой расчет вводят коэффициент безопасности n , принимая расчетное условие в виде:

$$x \leq x_n/n \text{ (или } x \geq x_n/n \text{)} \quad (45)$$

В этом случае x и x_n считают детерминированными величинами, хотя в действительности эти параметры являются статистическими и имеют определенное рассеивание. Для учета такого рассеивания расчет ведется по наиболее неблагоприятным значениям. Поэтому, хотя надежность и завышается по одному из критериев в ущерб другим, истинное значение показателя надежности неизвестно. Теория надежности позволяет корректно ответить на все возникающие в этой ситуации вопросы.

Пусть задан некоторый параметр X , являющийся случайной величиной с плотностью распределения $f_x(x)$, и односторонний допуск X_n на этот параметр, также являющийся случайной величиной с плотностью

распределения $f_n(x_n)$. Требуется определить вероятность выполнения задания по параметру X , т.е. вероятность того, что случайная величина $L=X-X_n \geq 0$.

В этом случае вероятность выполнения задания определяется соотношением:

$$P_H(L \geq 0) \geq P_H(L = 0) = \int_0^{\infty} f_L(l) dl,$$

$$f_L(l) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) f_l(x-l) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_n-l) f_x(x_n) dx_n, \quad (46)$$

где, как обычно, детерминированная переменная l описывает область реализации случайной величины L .

Пусть параметры X и X_n имеют нормальные законы распределения с числовыми характеристиками m_x , σ_x и m_n , σ_n . Используя устойчивость нормального закона к линейному преобразованию и вместо вычисления интегралов (46), используя (27) и (28), получим:

$$P_H(L \geq 0) \geq P_H(L = 0) = 0,5 - \Phi\left(U_p \left(-\frac{m_l}{\sigma_l}\right)\right),$$

$$f_L(l) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{l-m_l}{\sigma_l}\right)^2\right\}, \quad (47)$$

где $m_l = m_x - m_n$, $\sigma_l^2 = \sigma_x^2 + \sigma_n^2$, U_p - квантиль нормального распределения.

Введя коэффициент запаса надежности $n = m_x/m_n$ и коэффициент вариации $v_x = \sigma_x/m_x$ и $v_n = \sigma_n/m_n$ представим выражения для квантиля в виде:

$$U_p = -\frac{n-1}{\sqrt{(v_x \cdot n)^2 + v_n^2}}. \quad (48)$$

Из соотношений (47) и (48) видно, что вероятность выполнения задания по параметру зависит как от величины коэффициента запаса надежности, так и коэффициентов вариации параметра X и его предельного значения X_p .

Например, пусть X - несущая способность детали, распределенная по нормальному закону с параметрами $m_x=3$ кН и $\sigma_x=0,7$ кН, а X_n - действующая нагрузка, распределенная также по нормальному закону с параметрами $m_n=2$ кН и $\sigma_n=0,5$ кН. Коэффициент запаса надежности будет $m_x/m_n=1,5$ и, казалось бы, можно утверждать, что от этой нагрузки деталь не разрушится. Однако, расчет даст: $U_p = -1,16$; $\Phi(-1,16) = -0,38$ и

$P_H(L \geq 0) = 0,88$. Следовательно, мы получили, что хотя коэффициент запаса надежности выбран 1,5, тем не менее из каждых 100 деталей следует ожидать разрушение в 12 случаях.

Такое низкое значение вероятности безотказной работы по параметру (вероятности выполнения задания) определяется наличием дисперсии (точнее, величиной коэффициентов вариации) в распределениях как параметра, так и допуска на него. Видно, что даже в случае одинаковых коэффициентов запаса надежности можно получить различные вероятности выполнения задания в зависимости от рассеивания (дисперсии) случайной величины.

4.3 Роль дисперсии случайных величин в обеспечении заданной вероятности безотказной работы изделия

Величина дисперсии σ_l зависит от дисперсии σ_x и σ_n . Если величина X_n , как в рассмотренном примере, характеризует внешнюю нагрузку на некоторую деталь, то σ_n определяется стабильностью и диапазоном изменения внешних нагрузок на все изделие, стабильностью работы агрегатов изделия (скорости вращения, диапазоны вибраций, диапазоны температур и т.д.) и качеством сборки изделия (разброс натягов, вибрации и т.д.).

В этом же примере несущая способность детали X дает дисперсию σ_x , которая зависит от стабильности и однородности технологического процесса получения материала заготовки, стабильности качества и геометрии получения детали, стабильности обеспечения качества при сборке изделия.

Математические ожидания в этом же примере соответствуют m_x - прочностным возможностям материалов после изготовления детали (предел текучести, предел прочности, предел выносливости и т.д. данного сечения детали), m_n - средним значением нагрузок на деталь в данном сечении.

Таким образом, простейший анализ вероятности выполнения задания по некоторому параметру позволяет включить в анализ обеспечения надежности изделия количественно производственный фактор не только через обеспечение средних значений параметров качества, но и необходимость обеспечения высокой стабильности производства. Причем, за счет повышения стабильности производства возникают возмож-

ности не менее эффективного влияния на надежность изделия, чем за счет повышения средних значений свойств деталей.

Для анализа и понимания вопроса о роли влияния коэффициента запаса надежности и коэффициентов вариации на вероятность выполнения задания рассмотрим несколько предельных случаев. В основу анализа положим выражение квантиля (48) и учтем, что с ростом $|U_p|$ величина $P_H(L \geq 0)$ растет.

Пусть $v_n \gg nv_x$, т.е. коэффициент вариации параметра изделия существенно меньше коэффициента вариации внешней нагрузки. Тогда (48) принимает вид:

$$|U_p| \cong (n-1)/v_n. \quad (49)$$

Из (49) видно, что надежность изделия можно повысить либо увеличением n , либо уменьшением v_n (не зависит от σ_x). Но увеличение n требует либо создания новых материалов с большим m_x , либо усовершенствования конструкции, либо увеличения массы изделия. В то же время отстройка изделия по резонансным частотам от внешних воздействий, повышение качества сборки и повышение стабильности работы агрегатов изделия могут существенно увеличить вероятность безотказной работы.

Если же уровень технологии такой, что $v_n \ll nv_x$, соотношение (48) принимает вид:

$$|U_p| \cong (n-1)/nv_x. \quad (50)$$

Из соотношения (50) видно, что изменение n больше 1,5...2 слабо влияет на надежность, делая неэффективной конструкцию, в то же время уменьшение v_x требует только повышения стабильности технологического производства. Поэтому повышение надежности изделия через производство существенно эффективнее, чем увеличение n . Рациональным является совершенствование технологии до уровня, когда $v_n \cong n v_x$ и только затем поиск повышения n .

Для анализа выпуска дефективной продукции некоторым производством (технологической системой п. 5, 6) соотношению (50) можно придать следующий вид: $|U_p| \cong \Delta D / \sigma_{TC}$, где ΔD – установленный допуск на величину анализируемого показателя качества изделия, σ_{TC} – суммарное стандартное отклонение технологической системы. Легко рассчитать,

что только в результате статистической природы формирования показателя качества вероятность выхода дефектной продукции составит 2,3%; 0,14%; 0,006% и 0,0006% в случаях, когда в пределах допуска ΔD укладывается $2\sigma_{TC}$ ($\pm 2\sigma_{TC}$), $3\sigma_{TC}$ ($\pm 3\sigma_{TC}$), $4\sigma_{TC}$ ($\pm 4\sigma_{TC}$) и $5\sigma_{TC}$ ($\pm 5\sigma_{TC}$), соответственно. Следовательно, для обеспечения высокой надежности изделий, которая не всегда может быть выявлена оперативным контролем на выходе технологической системы, необходима высокая стабильность технологической системы производства. Причем, бытующая уверенность в высокой стабильности производства, обеспечивающего стандартное отклонение $\sigma_{TC} \cong \Delta D/3$, не вполне оправдана из-за вероятности выхода дефектной продукции в 0,14%. В частности именно этими соображениями определяются тенденции производств Японии и США, направленные на достижение $\sigma_{TC} \cong \Delta D/(5-6)$.

Таким образом, хотя основным параметром безотказности при $P_H(t) \rightarrow 1$ по общепринятой терминологии является коэффициент запаса надежности, но в таких расчетах неоправданно забывается роль коэффициентов вариации, снижение которых может быть эффективным направлением повышения надежности изделий.

5 Технологическое обеспечение надежности летательных аппаратов

5.1 Общая схема взаимосвязи параметров технологического процесса с показателями надежности

Технология изготовления, сборки и контроля изделия должна с максимальной производительностью и наименьшими затратами обеспечить качество продукции, в том числе и её надежность, заложенную в технической документации на изделие. Однако, связь параметров технологического процесса с показателями надежности изделия сложна, неоднозначна, проявляется через длительный промежуток времени вне сферы деятельности предприятия и, кроме того, многие требования по надежности вступают в противоречие с такими основными требованиями к технологическому процессу, как его производительность и экономичность. Вместе с тем, организация производства данного изделия, применяемые технологические процессы и методы контроля и испытаний оказывают самое решающее влияние на показатели надежности изделия.

Зависимость показателей надежности изделия от параметров технологического процесса можно представить в виде структурной схемы на рисунке 6.

В технологическом процессе изготовления изделия на каждой технологической операции происходит интенсивное физико-механическое воздействие на материалы деталей, узлов и сборочных единиц. Такое воздействие приводит не только к преобразованию полуфабрикатов в детали, но и к изменению свойств самих материалов. Это изменение свойств материалов характеризуется изменением численных значений различных показателей свойств материалов и деталей. Однако для каждой детали, сборочной единицы, узла и т.д. в нормативно-технической документации регламентируется только некоторая часть из этих показателей. Обычно это точность изготовления, некоторые механические характеристики, параметры поверхностного слоя и т.п.

Этот набор регламентированных показателей качества изготовления изделий $\{X_i\}$ можно разделить на две группы. В первую группу входят показатели, значения которых подвергаются сплошному контролю на каждой операции, а результат такого контроля является основанием для дефектации и выделения годных полуфабрикатов. Во вторую группу

входят показатели, которые в силу объективных и субъективных причин не подвергаются сплошному межоперационному контролю до завершения изготовления детали, узла или изделия, а только после этого подвергаются выборочному контролю, который чаще всего является разрушающим.



Рис. 6 – Структурная схема связи параметров технологического процесса с показателями надежности изделия

Однако знание этих показателей качества изготовления изделия не позволяет сделать заключение о показателях надежности самого изделия, т.к. показатели надежности будут определяться отказами по таким эксплуатационным свойствам изделия (рис. 6), как выносливость и прочность элементов конструкции и сварных швов, износостойкость, теплостойкость и др. Установление же взаимосвязи между эксплуатационными показателями изделия $\{Y_i\}$ и параметрами качества изготавливаемых деталей и сборочных единиц $\{X_i\}$ само по себе является сложной, неоднозначной и многовариантной задачей. Более того, на производстве не всегда имеется четкое представление о том круге вопросов, которые должна

решать технология с целью обеспечения заданной надежности изделия. В связи с этим часто наблюдается ситуация, когда после доводки изделия на производстве очень сложно ввести даже самые эффективные изменения в технологию, так как это потребует проведения длительного и дорогостоящего комплекса испытаний изделия на надежность. Такая же ситуация наблюдается, когда выявляются отклонения технологического регламента. В этом случае проще забраковать часть продукции, так как практически невозможно предсказать, каким образом установленное отклонение в технологическом регламенте повлияет на надежность изделия.

Таким образом, в результате выполнения технологического процесса изготавливается изделие с регламентируемым набором показателей качества $\{X_i\}$ деталей, сборочных единиц, узлов и самого изделия. Эти показатели качества должны обеспечить безотказную работу изделия по его эксплуатационным показателям качества $\{Y_i\}$, фактические значения которых нельзя установить на контрольных операциях технологического процесса, а только при эксплуатации или специальных испытаниях самого изделия или его отдельных частей на специальных стендах. В связи с этим, естественным является разбиение анализа влияния технологических параметров качества на надежность изделия на два этапа. На первом этапе необходимо установить взаимосвязь показателей надежности изделия с его эксплуатационными показателями качества $\{Y_i\}$ и показателями внешних воздействий на изделие, а на втором этапе – взаимосвязь показателей $\{Y_i\}$ с показателями $\{X_i\}$ и особенностями технологических систем. Для проведения такого достаточно корректного анализа необходимо получить формализованную взаимосвязь этих показателей в виде математических соотношений.

5.2 Взаимосвязь показателей надежности изделий с его эксплуатационными показателями. Общие требования к технологической системе производства

Пусть в результате выполнения технологического процесса изготавливаются изделия с регламентированным набором эксплуатационных показателей качества $\vec{Y}(t) = \{Y_1(t), Y_2(t) \dots Y_N(t)\}$, по которым возможны отказы в период эксплуатации изделия. Эти показатели, в общем слу-

чае, являются случайными величинами из-за стохастического характера технологического процесса их изготовления и, кроме того, в процессе эксплуатации их величины изменяются, что учтено указанием их зависимости от времени t .

Безотказная работа изделия в течении времени $[0, T_\gamma]$ будет обеспечена с вероятностью γ , если вероятность безотказной работы изделия $P_H(t)$, определяемая как вероятность нахождения вектора качества эксплуатационных показателей $\overset{P}{Y}(t)$ в области допустимых значений $\Omega(\overset{P}{Q}(t))$, удовлетворяет условию:

$$P_H(t) = P\{\overset{P}{Y}(t) \in \Omega(\overset{P}{Q}(t)); t \in [0, T_\gamma]\} \geq \gamma, \quad (52)$$

где учтено, что границы области допустимых значений $\Omega(\overset{P}{Q}(t))$ определяются вектором внешних воздействий $\overset{P}{Q}(t)$, а величина T_γ по своей сути является гамма-процентной наработкой изделия (10).

В одномерной постановке (при анализе некоторой одной из составляющих $Y(t)$ вектора $\overset{P}{Y}(t)$) для случая, когда безотказная работа изделия по эксплуатационному показателю $Y(t)$ определяется, например, в виде одностороннего ограничения $Y(t) \geq Q(t)$, а эти случайные величины независимы и имеют плотности распределения $f_Y(y)$ и $f_Q(q)$ (3), соответственно, соотношение (52) после преобразований аналогичных выполненным в п. 4.2 примет вид:

$$P_H(t, L) = P\{L = Y - Q \geq 0; t \in [0, T_\gamma]\} = \iint_{\Omega(L \geq 0)} f_L(y, q) dy dq = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{L-q} f_Y(y) dy \right\} f_Q(q) dq \geq \gamma, \quad (53)$$

где без ограничения общности принято, что области возможных реализаций величин Y и Q совпадают с областью $(-\infty, \infty)$, а через $f_L(y, q)$ обозначена совместная плотность распределения величин Y и Q .

Таким образом, сформулированная задача (52) по своей сути свелась к задаче параметрической теории надежности о выполнении задания по параметру качества (п. 4.2).

Рассматривая типичный, но частный случай, когда случайные вели-

чины $Y(t)$ – эксплуатационный показатель качества и $Q(t)$ – величина внешних воздействий, определяющая границы допустимых изменений $Y(t)$, распределены по нормальному закону с параметрами m_Y , σ_Y и m_Q , σ_Q , соответственно, получим также как в п. 4.2, для самого неблагоприятного случая $L = Y - Q = 0$ соотношение для определения вероятности безотказной работы изделия $P_H(t) = P_H(t, L = 0) \leq P_H(t, L \geq 0)$ в виде (47):

$$P_H(t) = P_H(t, L = 0) = \gamma = 0,5 - \Phi(U_\gamma), \quad (54)$$

где квантиль вероятности безотказной работы U_γ определяется аналогично (48):

$$U_\gamma = \frac{-(n-1)}{\sqrt{n^2 V_Y^2 + V_Q^2}}, \quad (55)$$

где $n = m_Y/m_Q$ – показатель безопасности, $V_Y = \sigma_Y/m_Y$ и $V_Q = \sigma_Q/m_Q$ – коэффициенты вариации эксплуатационного показателя качества и внешней нагрузки, $\Phi(U_\gamma)$ – интеграл ошибок.

Соотношение (54) позволяет по заданной вероятности безотказной работы γ вычислить величину квантиля U_γ и из соотношения (55) по имеющим данным о коэффициенте вариации внешней нагрузки V_Y установить взаимосвязь между коэффициентами безопасности, используемыми в расчетах на надежность, и реальными возможностями используемой технологической системы производства, отражаемыми в коэффициенте вариации V_Y эксплуатационного показателя качества Y . Результаты такого расчета для некоторых значений параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3

Максимальное допустимое значение коэффициента вариации V_Y эксплуатационного показателя качества, обеспечивающие вероятность безотказной работы γ , в зависимости от коэффициента вариации V_Q внешней нагрузки и выбранной величины коэффициента безопасности n

γ, U_γ	0,9772; 2	0,9987; 3	0,99997; 4
--------------------	-----------	-----------	------------

$n \backslash \gamma$	0	0,2	0	0,2	0	0,2
1	0	-	0	-	0	-
2	0,25	0,23	0,17	0,13	0,13	0,08
3	0,34	0,32	0,22	0,21	0,17	0,15
4	0,38	0,37	0,25	0,24	0,19	0,18
6	0,42	0,41	0,28	0,27	0,21	0,20

Приведенные результаты показывают количественное возрастание требований к стабильности технологических систем производства, выраженных в необходимости снижения величины коэффициентов вариации V_Y эксплуатационных показателей качества изделий, при повышении требований к вероятности безотказной работы γ и необходимости повышения эффективности изделий, снижения их материалоёмкости и себестоимости за счет снижения величины коэффициентов безопасности n , используемых в расчетах конструкций на надежность.

Например, для особенно высоконадежных изделий с вероятностью безотказной работы $\gamma=0,99997$ ($U_\gamma = 4$) повышение его эффективности, снижение материалоёмкости и себестоимости за счет проведения расчетов на надежность по коэффициенту безопасности $n=2$ вместо используемого значения $n=3$ требует повышения стабильности производства при обеспечении заданной величины эксплуатационного показателя качества, выражаемое в снижении величины коэффициента вариации этого показателя с $V_Y = 0,15$ до величины не менее $V_Y = 0,08$. Учитывая, что величина относительного допуска на этот параметр в рамках стандартов “ 3σ ” в три раза превышает величину коэффициента вариации этого параметра, становится понятным, что относительная погрешность равная $0,08 \cdot 3 = 0,24$ или 24% достижима на предприятиях аэрокосмического комплекса на существующем оборудовании, но при повышении технологической культуры производства. В связи с этим существующая практика закладывать коэффициенты безопасности $n=3$ и более при проектировании изделий, скорее всего, является традиционной и связана с недостаточной подготовленностью специалистов в области обеспечения надежности конструктивными и технологическими методами.

Отметим так же, как это было сделано в п. 4.2 и п. 4.3, что надеж-

ность изделия технологическими методами можно повысить увеличением средних значений показателя качества (его математического ожидания) при сохранении уровня его дисперсии при изготовлении, либо уменьшением дисперсии показателей качества при неизменном его среднем значении либо одновременным изменением этих параметров. Увеличение среднего значения показателя качества определяется в основном использованием новых высокоэффективных материалов в конструкции и новых прогрессивных технологий при изготовлении деталей и сборке изделия. Уменьшение же дисперсии может быть достигнуто ужесточением технологического регламента и допусков на продукцию. Выбор первого либо второго направления в каждом конкретном случае определяется технико-экономической целесообразностью. Однако, второе направление (снижение дисперсии показателей качества) является в определенных условиях существенно более эффективным, чем первое, что было показано ранее при анализе соотношения (48) и следует из анализа таблицы 3.

Отметим, например, что в случае когда $nV_Y \gg V_Q$ (см. также п. 4.3) использование коэффициентов безопасности $n > 2$ существенно менее эффективное решение вопросов надежности, чем уменьшение V_Y .

Перейдем теперь к анализу второго этапа, связанного с установлением взаимосвязи влияния технологического процесса производства на величину вариации эксплуатационных показателей качества.

5.3 Взаимосвязь эксплуатационных показателей с показателями качества изготовления сборочных единиц и общие требования к технологическим операциям

В технологическом процессе в результате выполнения большого числа технологических операций изготавливается изделие с определенным набором эксплуатационных показателей качества $\overset{U}{Y} = \{Y_i\}$. В каждой технологической операции и в каждом технологическом переходе вследствие технологических воздействий происходит изменение формы, размеров, физико-механических свойств полуфабрикатов. Обозначим весь набор регламентированных НТД показателей на n -ой технологической операции k -ой детали через $\{X_i(n, k)\}$. Для дальнейшего удобства

записи математических соотношений весь набор таких показателей качества изготовления для всех операций и всех полуфабрикатов и деталей представим в виде одного упорядоченного множества $\{X_i\}$, где значение индекса i в определенном диапазоне соответствуют одной детали, а группа их значений в этом диапазоне соответствует определенному технологическому переходу или операции.

В общем случае можно предположить, что существует некоторая функциональная зависимость, связывающая некоторый эксплуатационный показатель качества Y со всеми показателями качества изготовления всех деталей сборочных единиц и самого изделия $\{X_i\}$ в виде:

$$Y = \varphi(X_1, X_2 \dots X_i \dots X_N). \quad (56)$$

В силу стохастической природы технологического процесса показатели $\{X_i\}$ являются случайными величинами, которые после выполнения технологического процесса в силу контроля допусками за их рассеиванием являются центрированными случайными величинами, сгруппированными около своих математических ожиданий m_{X_i} с величиной стандартных отклонений σ_{X_i} . Поэтому математическое ожидание эксплуатационного показателя качества Y (56) в этих условиях будет определяться соотношением:

$$m_Y = \varphi(m_{X_1}, m_{X_2} \dots m_{X_i} \dots m_{X_N}). \quad (57)$$

Учитывая реализованную в технологическом процессе центрированность показателей $\{X_i\}$ разложим соотношение (56) в ряд Тейлора по малым отклонениям показателей X_i от своих математических ожиданий. С точностью до первого порядка малости по таким отклонениям это разложение примет вид:

$$Y \cong \varphi(m_{X_1} \dots m_{X_N}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi}{\partial X_i} \right)_{X_i=m_{X_i}} \cdot (X_i - m_{X_i}), \quad (58)$$

где производные в (58) вычисляются в точках математических ожиданий аргументов.

Используя обозначения:

$$\tilde{v}_Y = (Y - m_Y)/m_Y; \quad \tilde{v}_{X_i} = (X_i - m_{X_i})/m_{X_i};$$

$$\tilde{\varphi}_Y = (X_1 \dots X_N) = \varphi(X_1 \dots X_N) / m_Y ; \tilde{X}_i = X_i / m_{X_i} . \quad (59)$$

Придадим соотношению (58) нормированный вид, устанавливающий взаимосвязь между относительными отклонениями параметров от своих математических ожиданий:

$$\tilde{v}_Y = \sum_{i=1}^N a_i \tilde{v}_{X_i} , \quad (60)$$

где

$$a_i = (\partial \tilde{\varphi} / \partial \tilde{X}_i)_{X_i = m_{X_i}} . \quad (61)$$

Это соотношение, связывающее между собой заведомо малые величины ($\tilde{V} \ll 1$ по их определению (59)), может быть получено как из физико-химических соображений (что является очень сложной задачей) или экспериментально, например, методом математического планирования эксперимента. Оно в принципе позволяет оценить относительную роль или вклад каждого показателя качества изготовления X_i на анализируемый эксплуатационный показатель Y .

Однако, нам для проведения анализа и расчетов по соотношению (55) необходимо найти связь коэффициентов вариации v_{X_i} с коэффициентом вариации v_Y . Для этого можно воспользоваться соотношением (28), сделав предположение о нормальном законе распределения всех случайных величин, входящих в (60) или применить операцию вычисления дисперсии (6) к левой и правой частям соотношения (60).

Применяя операцию вычисления дисперсии, используя линейность композиции (60), независимость случайных величин X_i между собой и следующие свойства операции дисперсии:

$$D[a_i \tilde{v}_{X_i}] = a_i^2 D\left[\frac{X_i}{m_{X_i}} - 1\right] = a_i^2 \frac{D[X_i]}{m_{X_i}^2} = a_i^2 \frac{\sigma_{X_i}^2}{m_{X_i}^2} = a_i^2 v_{X_i}^2$$

получим

$$v_Y^2 = \sum_{i=1}^N a_i^2 v_{X_i}^2 . \quad (62)$$

Таким образом, величина вариации эксплуатационного показателя качества зависит от коэффициентов вариации показателей качества изготавливаемых составных частей изделия на всей цепи технологических

операций технологического процесса. Вклад каждой такой составляющей в общую величину V_Y различен и определяется как величиной V_{X_i} так и величиной весового множителя a_i , который определяется производной (61).

Анализ соотношения (62) показывает, что в общем случае, дисперсия показателя качества всех деталей и сборочных единиц на каждой технологической операции дает вклад в дисперсию и коэффициент вариации эксплуатационного показателя качества V_Y (55). Следовательно, с увеличением числа технологических операций, количества сборочных единиц, использования не достаточно жестких допусков на контролируемые параметры и параметры, которые подвергаются периодическому контролю, а также возможность наличия параметров, которые дают существенный вклад, но регламентируются документацией (например, часто радиусы сопряжений поверхности, величина и глубина залегания остаточных напряжений и т.д.) приводят к увеличению величины V_Y и необходимости использования больших значений коэффициентов безопасности n в расчетах на надежность (табл. 3).

Повышение качества продукции за счет снижения дисперсии показателей в процессе производства является одним из важнейших элементов технологической революции, прошедшей во всех ведущих странах мира.

5.4 Основные причины отказов, связанные с технологией изготовления изделий

В настоящее время принято отказы, связанные с технологией изготовления изделия, классифицировать в соответствии со схемой [1,3], представленной на рисунке 7.



Рис. 7 – Классификация отказов, связанных с технологией изготовления изделия

Первая группа причин связана с недостаточной обоснованностью технических условий на параметры изделия и его составляющие, на параметры технологических процессов и методы испытания на надежность изделия и его составляющих.

Технические условия на изделие и его составляющие должны отражать основные требования к надежности изделия. Но при выполнении технологических операций по изготовлению деталей и их последующей сборке измеряются не показатели надежности изделия, которые практически и невозможно измерить на данном этапе технологического процесса. Поэтому в чертежах задаются параметры, удобные для измерения, и которые должны были бы однозначно обеспечить требуемый уровень надежности изделия. Однако, параметры чертежей по точности, допускам и шероховатости и твердости, оказывается, еще не определяют однозначно показатели надежности. Даже более жесткая регламентация технологического процесса с ссылками на соответствующие технологические инструкции, ОСТы и ГОСТы часто также не обеспечивает одинаковые показатели надежности изделий, изготовленных на разных предприятиях. Поэтому чем выше требования к надежности изделия, тем большее число параметров должно быть оговорено техническими условиями и тем достовернее должны быть определены основные взаимосвязи между эксплуатационными и технологическими параметрами (56). Практически же такие вопросы решаются в процессах доводки изделий на стадии серийного производства. В результате такой доводки происходит

жесткая регламентация не только технологического процесса, а всей технологической системы конкретного производства, обеспечивающей необходимый уровень надежности изделий. При этом очень важную роль играют заданные технические условия на испытания. Сложность разработки методов и средств испытаний изделий на надежность привели к тому, что испытания стали самостоятельной областью в проблеме надежности.

Таким образом, обоснованность технических условий для обеспечения заданного уровня надежности изделий связана не только с техническими условиями на изделие, на технологический процесс и на испытания, но и с жесткой регламентацией всей технологической системы (в том числе и технологического процесса) изготовления и испытания изделий.

Следующая группа, приводящая к отказам по вине технологии, связана с остаточными и побочными явлениями технологических процессов.

При выполнении любой технологической операции материалы деталей подвергаются очень значительным силовым, тепловым, химическим и другим воздействиям. Уровень этих воздействий во много раз превышает уровень воздействий при эксплуатации изделий и создает объективные условия для возникновения в изделиях таких нежелательных воздействий, как изменение свойств и структуры материалов, образование пор, раковин, трещин и микротрещин. Особенно высоко такое воздействие на приповерхностный слой материала детали. В общем случае к технологическим дефектам относят любые несоответствия продукции требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Поэтому к дефектам относят как отклонения свойств и состояний материалов (трещины, раковины, включения, структурные изменения, выход параметра качества за пределы допуска и т.д.), так и нарушения заданной точности формы и размеров. Обычно дефекты формы и размеров рассматривают отдельно как погрешности обработки, а к дефектам относят все остальные нарушения установленных требований к материалу и приповерхностным слоям.

Образование дефектов в изделии зависит от применяемого технологического метода, средств технологического оснащения, режимов обработки, систем автоматизации процесса и других характеристик. Для каж-

дой технологической операции имеются, как правило, типичные виды дефектов, связанные как с нарушением хода процесса, так и с неблагоприятным сочетанием различных факторов при его выполнении.

Например, при отливке деталей из-за неравномерного остывания, окисления, попадания в материал различных включений и газа, могут появляться дефекты в виде трещин, раковин, пор, ликвации и неоднородности структуры. Кроме того, возникают остаточные напряжения, которые могут приводить к снижению эксплуатационных показателей деталей, а также к их короблению как при последующей обработке, так и в процессе эксплуатации. Аналогичные дефекты возникают при сварке, термической и химико-термической обработке, нанесении покрытий.

Особое влияние на работоспособность изделий оказывает механическая и электрохимическая обработка, которая придает деталям окончательную форму и свойства рабочим поверхностям деталей. В результате такой обработки поверхность материала и приповерхностные слои переходят в особое состояние с комплексом свойств, существенно отличающимся от свойств материала в объеме детали.

Часто различные варианты технологии, приводящие к одинаковым, с точки зрения регламентированного качества параметра, результатам, при более глубоком изучении обнаруживают разные склонности к образованию дефектов. Так, шлифование, полирование и алмазное выглаживание позволяют получить одинаковую величину шероховатости поверхности, однако шлифованная поверхность имеет большее число рисок глубиной до 1 мкм, полированная существенно меньшее число рисок с глубиной до 0,05 мкм, а выглаженная - практически не имеет рисок. Это приводит к существенному отличию в таких эксплуатационных свойствах, как выносливость, износостойкость и коррозионная стойкость.

У никелевых и титановых сплавов после электрохимической полировки существенно снижается предел выносливости по сравнению с деталями после механической обработки с теми же параметрами шероховатости поверхности. Более того, на 10 – 15 % снижается предел прочности на растяжение и загиб, в то же время предел прочности на сжатие и кручение практически не изменяется. Снятие же припуска после электрохимической обработки механическим методом (от 0,15 до 0,3 мм) восстанавливает величины этих параметров. У ряда алюминиевых спла-

вов механическая и электрохимическая обработка незначительно изменяет значения пределов выносливости и прочности.

В пределах одного технологического метода на возможность возникновения дефектов основное влияние оказывают обычно выбранные средства технологического оснащения и режимы обработки. Например, широко известно, что в зависимости от режимов резания и геометрии режущего инструмента предел выносливости обрабатываемого материала может измениться более чем в два раза при практически одной и той же шероховатости поверхности. Еще более сильное влияние оказывает изменение режимов шлифования, особенно высокопрочных материалов.

Часто считают, что возникновение дефектов в процессе обработки является следствием нарушения технологической дисциплины, наличие оборудования с низкими техническими характеристиками, нарушение ритмичности работы предприятия, плохой организации труда и т.д. Такой взгляд является односторонним, так как фиксирует лишь грубые нарушения в ходе технологического процесса. Надо отметить, что по существующим данным 85% технологических дефектов связано с недостатками технологии, в основном из-за неправильного обоснования технологических систем, а только 15% являются следствием нарушения технологической дисциплины.

В действительности физико-химические воздействия, которые сопровождают любой технологический процесс, порождают в материале изделия отклонения от первоначального отклонения и изменение свойств материала. Выход этих отклонений (они существуют всегда) за установленные пределы и приводит к возникновению дефектов. Поэтому технологический процесс, бездефектный при одних требованиях к изделию, будет дефектным при повышенных нормативах на выходные параметры.

Хотя основную роль в формировании показателей качества выпускаемых изделий часто играют финишные операции технологического процесса, однако многие свойства передаются с промежуточных операций на последующие. Явление переноса свойств изделия от предыдущих операций к последующим получило название технологического наследования, а сохранение этих свойств - технологической наследственности [1,2,3]. Носителем информации о наследственности являются материал детали и её геометрическая форма. Физико-химическая природа техно-

логической наследственности особенно хорошо видна при анализе формулы суммирования парциальных повреждений. В соответствии с этим соотношением разрушение материала наступает при выполнении условия:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i T_i)} \cong 1, \quad (63)$$

где Δt_i - промежуток времени нахождения материала детали при растягивающих напряжениях σ_i и температуре T_i ; $\tau(\sigma_i T_i)$ - долговечность материала детали при тех же напряжениях и температуре. В соотношении (63) каждое слагаемое $\Delta t_i / \tau(\sigma_i T_i)$ характеризует долю потерянной долговечности (ресурса) при данном нагружении детали в течение Δt_i .

Часть слагаемых в (63) можно отнести к технологическим операциям, а часть - к эксплуатации. Видно, что в результате определенных технологических операций происходит частичная потеря долговечности всей детали из-за потери её долговечности по определенным сечениям, в которых действуют растягивающие напряжения (кинетическая теория прочности).

После ряда технологических операций, особенно термических или упрочняющих, удастся восстанавливать первоначальную долговечность всей детали или её наиболее опасных сечений, к которым, в частности, относятся и приповерхностные слои.

Полученные на отдельных операциях дефекты (в том числе микротрещины) могут либо развиваться, либо залечиваться на последующих операциях. Поэтому технологическая наследственность может играть как положительную, так и отрицательную роль в зависимости от того, какие свойства сохраняются и передаются готовому изделию.

Технологическая наследственность в большинстве случаев оказывает все-таки отрицательное влияние на показатели качества и является побочным явлением при обработке деталей и их сборке. Поэтому необходимо технологический маршрут строить таким образом, чтобы исключить передачу дефекта или погрешности обработки с операции на операцию, сделать операции как бы независимыми в технологическом отношении. Считается, что наиболее благоприятным будет такой технологический процесс, где на начальных операциях происходит практически

полная ликвидация отрицательных свойств и эти свойства не наследуются на финишных операциях.

Следующая группа причин, приводящая к недопустимым производственным отказам изделий, связана с недостаточной надежностью технологической системы изготовления изделия. Как было отмечено при анализе первой группы причин, в результате доводки (на стадии опытного или серийного производства) возникает необходимость в жесткой регламентации технологической системы производства изделия. Однако в процессе эксплуатации технологической системы её свойства изменяются и, более того, она сама, как любое техническое изделие, подвержена отказам. Следовательно, технологическая система должна характеризоваться таким важным свойством, как надежность, т.е. свойством сохранять во времени способность обеспечивать изготовление продукции в заданном объеме, с заданной производительностью и заданными параметрами качества. Чем выше заданная надежность изделия, тем выше должна быть надежность технологической системы.

Важной задачей обоснования и создания технологических систем производства ЛА является выявление наименее надежных элементов технологических систем (дающих наибольшие дисперсии показателей качества) и их совершенствование, а также сокращение числа элементов в системе, в том числе и за счет их кооперации.

На рисунке 8 представлена типовая схема повышения надежности технологической системы за счет создания обоснованных и полных технических условий на показатели качества деталей, сборочных единиц и изделия в целом. В связи с таким сильным влиянием надежности технологической системы на надежность изделия в последнее десятилетие активно развиваются методы формализованного описания технологических процессов с точки зрения науки о надежности технологических систем. При этом технология изготовления изделия представляется в виде технологической системы, которая должна обеспечить определенную вероятность выполнения задания по параметрам качества, параметрам производительности и параметрам затраченных ресурсов.

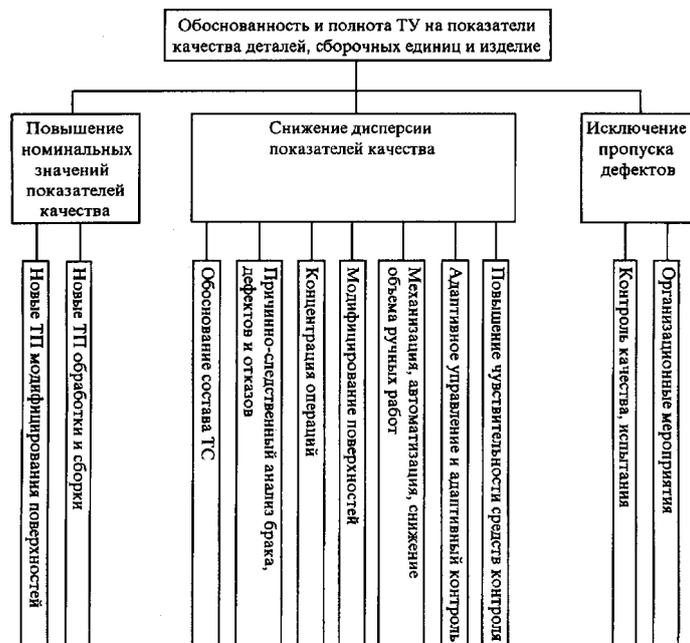


Рис. 8 – Схема мероприятий повышения надежности технологических систем за счет обоснованности и полноты технических условий на показатели качества деталей, сборочных единиц и изделий

5.5 Основные понятия о технологических системах и методах оценки их надежности

Под технологической системой понимают совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций.

Технологическая система является частью производственной системы и, как любая другая система, имеет свою структуру. Состав и структура технологической системы, условия производства, режим работы регламентируются конструкторской, технологической и другой технической документацией.

Все технологические системы можно разделить на четыре иерархических уровня: технологические системы операций, технологические системы процессов; технологические системы производственных под-

разделений и технологические системы предприятий.

Технологическая система процесса включает в себя в качестве подсистем совокупность технологических систем операций, относящихся к одному методу (формообразования, обработки, сборки, контроля и испытаний) или к одному наименованию изготавливаемой продукции. Следовательно, технологическая система операции является подсистемой технологической системы процесса.

Любая технологическая система может быть разбита на элементы, которые являются её частью и условно принимаются за неделимые на данной стадии анализа системы. Различают следующие виды технологических систем: последовательная, параллельная, комбинированная.

На рисунке 9 представлена технологическая система, состоящая из n технологических элементов, описывающих выполнение определенных технологических операций. На вход первого элемента подается полуфабрикат, характеризуемый $x_i(0)$ параметрами качества. После преобразования в первом элементе (выполнения первой технологической операции) эти параметры принимают с вероятностью $P_1(i, t)$ значения $x_i(1)$. Вероятность $P_1(i, t)$ является вероятностью выполнения технологического задания первым технологическим элементом по параметру x_i . В связи с тем, что по мере эксплуатации технологического элемента его свойства изменяются, эта вероятность является функцией времени. Далее параметры $x_i(1)$ попадают на вход второго элемента и с вероятностью $P_2(i, t)$ преобразуются в $x_i(2)$ и т.д.

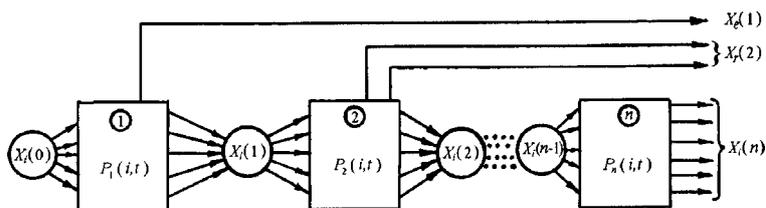


Рис. 9 – Структурная схема технологической системы

Некоторые параметры качества после первой, второй и т.д. операции могут не изменяться на последующих операциях и характеризовать готовую продукцию на выходе из n -го элемента. На рисунке 9 это $x_i(1)$ - параметры после первой операции, $x_i(2)$ - после второй операции и $x_i(n)$ - после n -ой операции. Таким образом, готовая продукция будет характе-

ризоваться набором параметров качества $\{x_s(1), x_s(2), \dots, x_s(n)\}$. Задача технологической системы - обеспечить значения параметров качества после каждого элемента и после выполнения последней операции в пределах допусков, заданных в технических условиях на детали, сборочные единицы и изделие в целом.

Все технологические системы могут быть с жесткой и нежесткой связью подсистем или элементов. Причем, под технологической системой с жесткой связью понимают такие системы, у которых отказ хотя бы одной из подсистем вызывает немедленное прекращение функционирования технологической системы в целом. В технологической системе с нежесткой связью в этом случае не происходит немедленного прекращения функционирования всей системы.

Также отметим, что по уровню автоматизации выделяют: механизированную, автоматизированную и автоматическую технологические системы. Кроме того, по уровню специализации бывают специальные, специализированные и универсальные технологические системы.

Для технологических систем, так же как и для технических систем, вводятся понятия работоспособное и неработоспособное состояние, исправные и неисправные состояния, а также предельное состояние. Например, под работоспособным состоянием технологической системы понимают такое её состояние, при котором значения параметров и показателей качества изготавливаемой продукции, производительности, материальных и стоимостных затрат на изготовление продукции соответствуют требованиям, установленным в нормативно-технической, конструкторской и технологической документации.

Математическая формулировка работоспособного состояния $S(t)$ технологической системы может быть записана следующим образом:

$$S(t) \subset \tilde{S}' \{ Q(t) \subset \tilde{Q}, R(t) \subset \tilde{R}, c(t) \subset \tilde{c} \},$$

где \tilde{S}' - множество допустимых состояний технологической системы; $Q(t)$, $R(t)$, $c(t)$ - значения параметров качества, производительности и величин затрачиваемых ресурсов в момент t ; \tilde{Q} , \tilde{R} , \tilde{c} - множество допустимых значений параметров качества, производительности и затрачиваемых ресурсов, при которых технологическая система в соответствии с нормативно-технической документацией считается работоспособной.

В связи с этим определением неработоспособное состояние технологической системы может возникать по параметрам качества, производительности или затрачиваемым ресурсам. Аналогично даются определения других состояний системы.

В технологической системе, также как и в любой технической системе, анализ работоспособности основан на анализе отказов. По характеру нарушения работоспособности выделяют функциональные и параметрические отказы.

Под функциональным отказом понимают прекращение функционирования технологической системы, не предусмотренное регламентированными условиями производства или конструкторской документацией. При этом возможно как полное, так и частичное прекращение функционирования. Примером частичного функционального отказа может служить поломка одного из инструментов при обработке детали на автоматической линии. При этом может происходить выпуск продукции, но без обработки соответствующих поверхностей.

Параметрический отказ характеризуется тем, что система продолжает функционировать, но как минимум один из параметров технологического процесса выходит за допустимые пределы. Например, выход значений показателей качества деталей за поле допуска на обработку, снижение ритма выпуска ниже заданного уровня, нерегламентированное изменение режимов обработки, превышение материальных и трудовых затрат, недопустимые загрязнения окружающей среды и т.д.

Оценка надежности технологических систем производится на стадии проектирования и её эксплуатации. Эта оценка проводится с целью оптимизации надежности вновь разрабатываемых или поддержания необходимого уровня надежности действующих систем. Оценка надежности проводится в результате определительной процедуры и проверяется с регламентированной периодичностью в результате контрольной процедуры.

Показатели надежности технологических систем и средств технологического оснащения выбирают из числа перечисленных в п. 2, а также используются специфические показатели, естественно, введенные на основе показателей п. 2. К ним относятся: установленная безотказная наработка (ресурс, срок службы); вероятность безотказной работы технологической системы по параметрам продукции (производительности,

затратам); назначенная наработка технологического комплекса до подналадки; вероятность выполнения технологической системой задания по объему выпуска.

Вероятность безотказной работы технологической системы по параметрам продукции (производительности, затратам) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки не происходит отказа технологической системы по перечисленным параметрам.

Вероятность выполнения технологической системой задания - это вероятность того, что объем выпуска технологической системой годной продукции и затраты на её изготовление за рассматриваемый интервал времени соответствуют требованиям документации. В вероятности выполнения технологической системой задания по объему фактор затрат не учитывается.

Кроме единичных показателей надежности вводятся комплексные показатели: коэффициент использования технологической системы, коэффициент выхода годной продукции; коэффициент сохранения производительности технологической системы, коэффициент расхода i -го вида материальных (стоимостных) затрат.

Методы оценки надежности системы выбираются исходя из критериев отказов. При этом для оценки надежности по параметрам качества продукции рассматривают четыре группы показателей, характеризующие: точность технологического процесса и средств технологического оснащения; технологическую дисциплину; выполнение заданий по конкретным параметрам качества продукции; комплексные показатели.

Для оценки надежности технологической системы по параметрам производительности рассматривают группы показателей, характеризующие: снижение ритма выпуска ниже установленного уровня; невыполнение установленного объема производства годной продукции в установленные сроки; прекращение функционирования системы, обусловленное отказом одного из элементов средств технологического оснащения; превышение нормативных величин длительности простоя при техническом обслуживании, при смене инструмента, подналадке и т.д.

5.6 Оценка надежности выполнения задания технологической системой по параметрам качества продукции

Рассмотрим некоторый n -ый элемент технологической системы

(рис. 9), который формирует параметры качества продукции $x_i(n)$. Индекс i относится к i -ому показателю качества детали после выполнения технологической операции, соответствующей n -ому элементу.

Величина x_i зависит от свойств материала, режимов обработки, конструктивных особенностей обрабатываемой системы, точности настройки средств технологического оснащения, точности измерения самой величины и воздействия внешних факторов.

Условием безотказности технологического элемента при выполнении задания (технологической операции) по параметру качества x_i за наработку T будет выполнение неравенства:

$$x_{i,H} \leq x_i(t) \leq x_{i,B}, \quad (64)$$

где $x_{i,H}$ и $x_{i,B}$ - нижнее и верхнее предельное отклонение для параметра x_i , установленное в нормативно-технической документации.

Вероятность выполнения задания n -ым технологическим элементом параметру x_i определяется из соотношения, аналогичного вероятности безотказной работы:

$$P_i(n, t) = P\{x_{i,H} \leq x_i(t) \leq x_{i,B}\}. \quad (65)$$

Если задание технологической системы заключается в одновременном выполнении неравенства (64) для набора параметров от $i=1$ до $i=k$, то вероятность выполнения задания будет:

$$P_i(n, t) = P\{x_{1,H} \leq x_1(t) \leq x_{1,B}; \dots; x_{k,H}(t) \leq x_k(t) \leq x_{k,B}(t)\}. \quad (66)$$

В случае, когда величины $x_i(t)$ независимы, соотношение (66) примет вид:

$$P(n, t) = \prod_{i=1}^k P_i(n, t). \quad (67)$$

Вычисление вероятности $P_i(n, t)$ производится по одному из алгоритмов, изложенных в п. 2-5.

Если полученное значение $P(n, t)$ меньше допустимого, то проводят анализ технологической системы и соответствующие мероприятия по повышению надежности технологической системы. Из (55) видно, что увеличить надежность $P(n, t)$ можно в основном за счет уменьшения дисперсии σ_x или, как следует из (60), за счет уменьшения дисперсии поставляемых заготовок, дисперсии режимов обработки и дисперсии средств технологического оснащения путем их подналадки или замены

на более точные.

В процессе эксплуатации технологической системы параметры распределения m_x и σ_x будут изменяться, приводя к изменению вероятности выполнения задания. Поэтому постоянный (или периодический) статистический контроль вероятности выполнения задания создает предпосылки для выпуска бездефектной продукции за счет оперативной подналадки технологической системы с целью восстановления её надежности. Т.е. в этом случае возникает возможность выпускать бездефектную продукцию не за счет обнаружения уже полученного брака и последующей подналадки технологической системы, а за счет адаптивного управления качеством и изготовления бездефектной продукции.

На этапе технологической подготовки производства и проектирования технологической системы по заданным значениям $P(n,t)$, x_H и x_B осуществляют подбор составляющих технологической системы.

Отметим, что обратная задача определения допусков x_H и x_B по заданной величине $P(n,t)$ не имеет в общем случае однозначного решения. В связи с этим задачу решают, либо выбирая допуски симметрично относительно m_x :

$$x_B = m_x + U_p \sigma_x, \quad x_H = m_x - U_p \sigma_x, \quad (68)$$

либо одна из границ допуска задается из конструктивных или технологических соображений, а другая - из решения уравнения (65).

Обычно в случае технологических допусков величину интервала $[x_B, x_H]$ выбирают равной $6\sigma_x$, что в случае симметричного интервала и нормального распределения соответствует вероятности выполнения задания $P(n,t) = 0,997$.

Для конкретных технологических систем величины m_x и σ_x выбирают либо из справочных данных, либо находят путем расчетов по данным специальных экспериментов, либо путем расчетов по данным, полученным в процессе эксплуатации этого элемента. До накопления большого статистического материала эти числовые характеристики можно оценить по предельным значениям x_{min} и x_{max} параметра, полученным при испытании технологической системы на основе соотношений:

$$\hat{m}_x = (x_{max} + x_{min})/2, \quad \hat{\sigma}_x = (x_{max} - x_{min})/d,$$

где d - коэффициент, зависящий от числа испытаний N и принимающий значения от 1,13 до 5,0 при изменении N от 2 до 100.

Таким образом, в общем случае вероятность выполнения задания технологической системой по некоторому параметру качества определяется квантелем распределения, который в свою очередь зависит от коэффициента запаса надежности технологической системы ($n=m_x/m_H$ или $n=m_x/m_B$) и коэффициентов вариации параметра качества ($v_x=\sigma_x/m_x$) и допусков на этот параметр ($v_H=\sigma_H/m_H$, $v_B=\sigma_B/m_B$). Учитывая, что с ростом $|U_p|$ величина $P(n,t)$ растет, существуют две принципиально различные возможности повышения надежности технологических систем: первая - за счет увеличения коэффициента запаса надежности и вторая - за счет снижения величины дисперсии (рис. 8).

Первая возможность связана либо с увеличением допусков на параметр, либо с увеличением его номинального (среднего) значения. Однако возможности увеличения границ допусков ограничены конструктивными особенностями изделия и его эффективностью. Увеличение номинальных значений параметра качества связано с использованием новых материалов, новых технологий обработки, сборки и модифицирования поверхностей (рис. 8).

Однако наиболее широкие возможности повышения вероятности выполнения задания технологической системой по параметру качества появляются при снижении дисперсии показателей качества. Снижение дисперсии показателей качества может быть достигнуто (рис. 8) за счет: снижения дисперсии свойств поставляемых заготовок; использования средств технологического оснащения с меньшим рассеянием параметров при настройке; использования новых технологий, имеющих малое рассеивание в режимах обработки и получаемых свойствах деталей; модифицирования обрабатываемых поверхностей; концентрации технологических операций; механизации и автоматизации процессов и исключения ручных операций; использования адаптивного управления и контроля; повышения чувствительности средств контроля и др.

Если параметр качества x_i , формируемый i -ым технологическим элементом с вероятностью $P_j(i,t)$, подвергается контрольной процедуре с вероятностью обнаружения дефекта $P^{(k)}$, то эти два элемента (технологическая операция и операция контроля) с точки зрения надежности имеют параллельное включение. При этом вероятность выполнения задания технологической системой увеличивается за счет введения кон-

трольной операции и определяется соотношением:

$$P_j^{(k)}(i, t) = 1 - (1 - P_j(i, t))(1 - P^{(k)}) = 1 - (1 - P_j(i, t))\beta,$$

где $\beta = 1 - P^{(k)}$ - риск потребителя.

6 Основные направления повышения надежности летательных аппаратов совершенствованием технологических систем их производства, испытания и контроля

Изделия аэрокосмической техники характеризуются непрерывным ростом не только летно-технических и экономических показателей, но и в значительной мере ростом их показателей надежности. Обеспечение высокой надежности летательных аппаратов осуществляется на этапе их производства и невозможно без высокой надежности технологических систем.

До определенного этапа развития аэрокосмической техники основным методом получения изделий высокого качества было постоянное обнаружение и исправление возникших дефектов. При такой организации производства считалось, что получение некоторого процента дефектных деталей в серийном производстве является неотъемлемым свойством технологического процесса.

Однако, качество изделия создается не в процессе контроля или испытаний, а в процессе производства. Поэтому основой должен быть анализ объективных и субъективных причин дефекта, с тем чтобы субъективные причины исключить, а отрицательное влияние объективных факторов научиться измерять количественно и ограничивать до нужных пределов. В этом заключается суть систем бездефектного изготовления продукции.

В настоящее время российская аэрокосмическая промышленность все более активно выходит на международный рынок. В связи с этим возникает необходимость не только обеспечения показателей качества продаваемой продукции, но и создание уверенности у потребителя в том, что поставщик способен обеспечить стабильность этого качества в соответствии с контрактом. Гарантией стабильности качества продукции является наличие на производстве сертифицированной независимым международным органом системы качества продукции. Одной из составляющих системы качества является комплексная система технологического обеспечения надежности летательных аппаратов. В зависимости от вида изделия, традиций КБ-разработчика изделия и конкретного завода-изготовителя системы технологического обеспечения надежности и каче-

ства имеют некоторые отличия. Однако их общую сущность можно представить в виде системы, изображенной на рисунке 10.

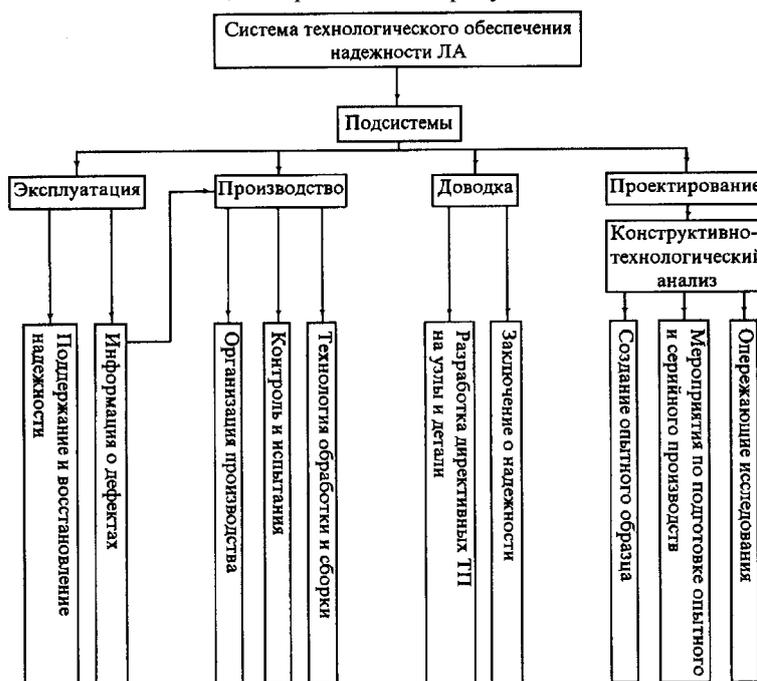


Рис. 10 – Система технологического обеспечения надежности ЛА

Технологическое обеспечение качества и надежности ЛА начинается с этапа конструкторско-технологического анализа изделия (подсистема "Проектирование. Конструкторско-технологический анализ"), отрабатывается в результате доводки изделия (подсистема "Доводка"), реализуется на этапе производства (подсистема "Производство") и совершенствуется по результатам эксплуатации изделия (подсистема "Эксплуатация"). Некоторые элементы этих подсистем изображены на рисунке 11 и на рисунке 12.

Основными этапами работ в подсистеме "Проектирование. Конструкторско-технологический анализ" является проведение опережающих исследований, разработка мероприятий по подготовке опытного и серийного производства и создание опытного образца изделия (рис. 11).



Рис. 11 – Элементы подсистемы "Проектирование" и "Доводка"

На этапе опережающих исследований проводится конструкторско-технологическая оптимизация элементов конструкции, узлов, агрегатов и т.д. на надежность, разрабатываются технологические процессы обработки материалов и сборки изделия. Особенно важным на данном этапе является выяснение влияния выбранных технологических процессов на надежность элементов изделия, особенно в случае использования новых материалов и новых технологий. Как уже отмечалось, свойства материалов для элементов конструкции нельзя рассматривать изолированно, без учета влияния на эти свойства условий и режимов обработки и сборки, а также последующих условий их эксплуатации. Известно, что воздейст-

вие конструктивных концентраторов напряжений в деталях в виде галтелей, резьбовых и сварных соединениях, воздействие повышенных температур и коррозионных сред приводит к тому, что допускаемые эксплуатационные напряжения в реальных деталях не превышают (10...70)% предела усталости стандартных образцов по ГОСТу из этих материалов.

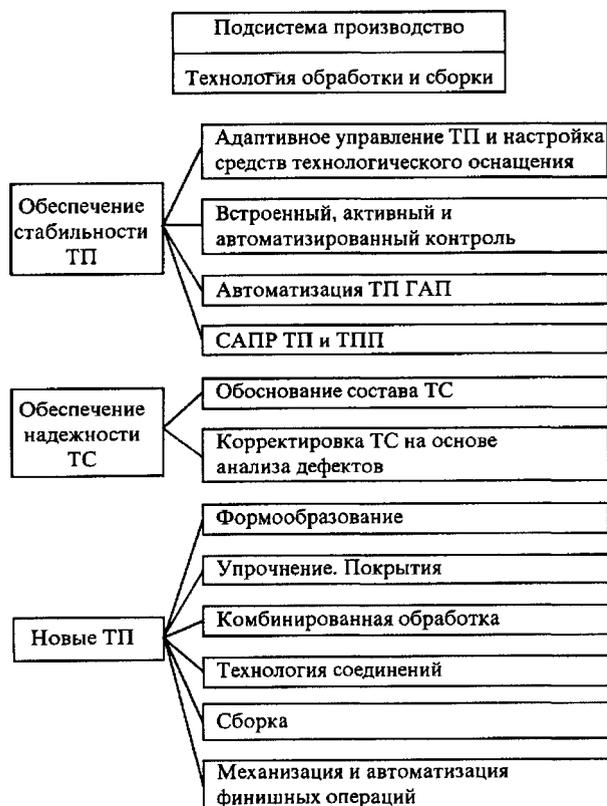


Рис. 12 – Элементы подсистемы "Производство"

Кроме этого существует дисперсия механических свойств поставляемых материалов, дисперсия режимов обработки и точности настройки. Отсюда появляется дисперсия параметров качества деталей. Очень часто эта дисперсия наиболее явно проявляется в свойствах поверхностного слоя, который наиболее сильно влияет на основные эксплуатационные показатели изделия. Например, изменение условий обработки изме-

няет дисперсию этих свойств в 3...4 раза и уменьшает математическое ожидание параметров качества, а следовательно, уменьшает вероятность безотказной работы детали и изделия в целом. В связи с этим важным направлением уменьшения дисперсии из-за технологических факторов является использование адаптивного управления технологическими процессами и введение специальных операций модифицирования поверхностного слоя.

В настоящее время поверхностное упрочнение и упрочняющие покрытия являются одной из обязательных финишных операций при изготовлении ответственных деталей. В случае обеспечения стабильности во времени и по всей площади детали обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) обеспечивает повышение надежности технологических систем как за счет увеличения номинальных значений параметра качества, так и снижения его дисперсии. ППД по сравнению с другими методами обработки в 2...4 раза уменьшает величину доверительного интервала на сжимающие остаточные напряжения в приповерхностном слое (при доверительной вероятности 0,95) и до 40% увеличивает однородность других свойств поверхностного слоя.

Одним из основных направлений является также повышение технологичности конструкций, особенно для проведения сборочно-монтажных работ. Это в основном достигается панелированием и агрегатированием монтажей.

Конечной целью всех этих мероприятий является разработка наиболее полных и обоснованных ТУ на параметры качества изделия, на параметры технологических систем и методы испытания и контроля (рис. 7 и 8).

Одним из наиболее важных и эффективных средств обеспечения объективности перечисленных мероприятий являются испытания, которые проводятся на всех этапах, начиная с проектирования изделия, и продолжаются на этапе серийного производства и эксплуатации в виде сбора информации для уточнения поведения материалов и конструкций в реальных условиях эксплуатации.

Испытания образцов подразделяют на лабораторные (стендовые), проводимые на месте изготовления изделия, и летные испытания, проводимые на летательном аппарате.

Лабораторные испытания опытных образцов дают первичную ин-

формацию о работе деталей, узлов, устройств при воздействии на них различных факторов. Однако при лабораторных (стендовых) испытаниях нельзя учесть всего разнообразия факторов, имеющих место при эксплуатации опытных образцов на летательных аппаратах различных классов. Для одного и того же агрегата характер нагрузок, уровни, последовательность и цикличность их действия может изменяться в зависимости от типа летательного аппарата. Поэтому, как показывает опыт, характеристики надежности, полученные при лабораторных испытаниях, значительно отличаются как по уровню, так и по характеру отказов. В связи с этим кроме лабораторных испытаний проводится большой объем летных испытаний, в том числе и испытания материалов узлов в условиях экспонирования в открытом космическом пространстве.

Таким образом, при технологической подготовке производства и выпуске опытного образца должны быть решены вопросы выбора оптимальных технологических процессов, режимов технологических операций и методов и мест контроля, а также выбора оптимального состава технологической системы по надежности.

В случае серийного производства летательного аппарата работы по созданию изделия не ограничиваются выполнением проектных работ, постройкой опытных образцов, проведением лабораторных и летных испытаний. Продолжением процесса проектирования с учетом требований серийного производства и эксплуатации является конструкторско-технологическая доводка. Необходимость этапа доводки вызывается спецификой опытного производства и его отличием от серийного.

В процессе опытного производства в первую очередь решаются вопросы обеспечения необходимых тактико-технических данных летательного аппарата. К моменту окончания летных испытаний вносится достаточно большое число конструктивных изменений в изделие. Необходимость этих изменений становится обычно ясна только к концу испытаний и анализа полученных данных. Поэтому в процессе запуска изделия в серийное производство производится конструктивно-технологическая доводка.

Особую важность доводка изделия на стадии серийного производства приобретает в связи с тем, что оборудование серийного и опытно-экспериментального заводов или технологической базы ОКБ имеют различие как по номенклатуре, так и степени износа, отличается также ква-

лификация технического персонала этих подразделений.

Процесс конструктивно-технологической доводки и подготовки серийного производства максимально используется для повышения показателей надежности изделия и корректировки директивных технологических процессов (рис. 11).

Повышение надежности летательного аппарата на этом этапе достигается в результате значительного улучшения его производственной, эксплуатационной, а для ремонтируемых изделий и ремонтной технологичности, продолжения и расширения объема начатых ранее ресурсных испытаний, уточнения технических условий и программ испытания готовых изделий. В этот период решаются многие вопросы рационального размещения оборудования, коммуникаций и увязки с элементами конструкции аппарата. Параллельно с плазовыми работами ведется разработка технологии монтажных работ. При этом необходимо обращать внимание на выбор баз, относительно которых должны фиксироваться агрегаты силовой установки, систем управления, топливной и гидросистем, связанные трубопроводами.

Окончательную отработку сложных пространственных систем целесообразно проводить на макете летательного аппарата. Это позволяет изыскать еще более простые решения компоновки агрегатов, монтажа элементов коммуникаций, сократить число соединений и повысить эксплуатационные качества изделий. По мере отработки монтажей должны быть изготовлены эталоны всех элементов систем. Эти детали в дальнейшем используются при изготовлении всей заготовительной, монтажной и контрольной оснастки.

На стадии серийного производства технологическая надежность летательного аппарата обеспечивается стабильностью технологического процесса, надежностью технологических систем и введением новых технологических процессов, позволяющих снижать дисперсию и повышать номинальные значения показателей качества продукции (рис. 12).

Обеспечение надежности технологических систем реализуется за счет выявления технологических дефектов и обоснованной корректировки технологических систем. Стабильность же технологических процессов обеспечивается их адаптивным управлением и адаптивной настройкой средств технологического оснащения, использованием автоматизации и гибких автоматизированных производств, применением САПР

ТП и ТПП, а также использованием активного и автоматизированного контроля как параметров качества продукции, так и параметров технологических систем. Важнейшим направлением повышения стабильности производств является уменьшение доли ручных работ, особенно на стадии финишных операций.

Большое влияние на стадии серийного производства на надежность изделия оказывает дальнейшая стабилизация и повышение надежности финишных технологических процессов, особенно оказывающих влияние на свойства приповерхностного слоя детали.

В процессе подготовки производства и в ходе серийного производства продолжают лабораторные испытания и испытания деталей, агрегатов и систем изделия. Это связано с тем, что в процессе летных испытаний и конструктивно-технологической доводки вносится целый ряд конструктивных и технологических изменений, которые требуют лабораторной проверки. Кроме того, проведение исследований и испытаний необходимо для выявления причин отказов в процессе серийного производства и эксплуатации первых партий серийных изделий.

Заводские испытания серийных образцов подразделяются на приемосдаточные, периодические и проверочные.

Обеспечение качества и надежности продукции в процессе её изготовления невозможно без проведения контроля. Контроль может относиться как к проверке качественных и количественных характеристик свойств продукции, так и к контролю режимов, характеристик и параметров технологического процесса. Методика контроля разрабатывается таким образом, чтобы необходимыми техническими средствами были охвачены все стадии производства и испытаний. Средства контроля должны применяться при входном контроле на каждой операции и на всех стадиях технологического процесса изготовления и испытаний деталей и узлов, а также для настройки и оценки средств технологического оснащения. Так же, как и приемосдаточные испытания, контроль продукции может быть сплошным и выборочным. При выборочном контроле с помощью статистических методов разрабатываются специальные методики контроля, приемки и браковки продукции.

Однако оценка уровня качества продукции - необходимый, но не достаточный вид статистического контроля для обеспечения высокой надежности и стабильности технологических систем.

Статистические методы контроля должны применяться и для контроля параметров технологических систем. Принципиальная разница между контролем качества продукции и контролем параметров технологических систем заключается в том, что при контроле продукции в основном создаются условия, исключающие поставку дефектной продукции, а при контроле технологических систем создаются предпосылки для неизготовления дефективной продукции. Действительно, при контроле технологических систем появляется возможность определения тенденций изменения характеристик системы и путем её подналадки принятия мер для предотвращения возникновения дефекта, т.е. создать условия для бездефектного изготовления продукции.

Особенно широкие возможности управления качеством продукции имеют место при автоматизации и применении методов активного контроля. Активный контроль, при котором по результатам контроля дается команда на подналадку оборудования, изменения режимов его работы или даже на остановку технологического процесса, совместно с системами автоматизированной поднастройки дает гарантию обеспечения стабильности и надежности технологических систем, а, следовательно, гарантию обеспечения качества и надежности изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов: учебник для студентов высших технических учебных заведений. / В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А.Бордаков, Б.П.Пешков, И.Н.Желтов, И.А.Докукина; под ред. проф. В.А.Барвинка. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
2. Чумадин, А.С. Теоретические основы авиа- и ракетостроения (в конспектах лекций): учеб. пособие для вузов / А.С. Чумадин, В.А. Барвинок, В.И. Богданович [и др.] – М.: Дрофа, 2005. – 784 с.
3. Козлов, Д.И. Конструирование автоматических космических аппаратов / Д.И. Козлов, Г.П. Аншаков, В.Ф. Агарков [и др.] – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
4. Сологуб, А.В. Космические аппараты систем зондирования Земли. / А.В. Сологуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов [и др.] – М.: Машиностроение, 1993. – 368 с.
5. Кузнецов, А.А. Надежность конструкция баллистических ракет / А.А. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
6. Вигдорчик, С.А. Технологические основы проектирования и конструирования самолетов: Конспект лекций. Часть II / С.А. Вигдорчик. – М.: МАИ, ротa-принт, 1976. – 96с.
7. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 560 с.
8. Гуров, С.В. Основы теории надежности / С.В. Гуров, А.М. Половко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 527 с.
9. Решетов, Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, Ф.З. Фадеев – М.: Высшая школа, 1988. – 237с.
10. Острейковский, В.А. Теория надежности: учебник для ВУЗов. / В.А. Острейковский. – М. Высшая школа, 2003. – 463 с.
11. Кузнецов, А.А. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. / А.А. Кузнецов, А.А. Зотов, В.А. Комягин. – М.: Машиностроение, 1979. – 144с.
12. Соломонов, П.А. Надежность планера самолета. / П.А. Соломонов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320с.
13. Золотов, А.А. Обеспечение надежности транспортных аппаратов космических систем. / А.А. Золотов, М.И. Титов. – М.: Машиностроение, 1988. – 216с.
14. Беляев, Ю.К. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А.Богатырев, В.В.Болотин [и др.] / под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608с.
15. Богданович, В.И. Системный анализ технологических методов обработки в производстве летательных аппаратов: учебное пособие. / В.И. Богданович, В.А. Барвинок. – Куйбышев: КуАИ, 1989. – 68с.

Учебное издание

Богданович Валерий Иосифович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
НА СТАДИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

Учебное пособие

Технический редактор В. П. Самохвалов
Редакторская обработка Л. Я. Чегодаева
Корректорская обработка Е. П. Сеничкина
Доверстка Т. К. Кретикина
.....

Подписано в печать 06.07.07. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 5.75

Тираж 120 экз. Заказ . ИП-ж55/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

