

Министерство высшего и среднего специального
образования Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П.Королева

В.И. К о с т и н

О С Н О В Ы Н А Д Е Ж Н О С Т И Г Т Д
И У П Р А В Л Е Н И Е К А Ч Е С Т В О М
П Р О Д У К Ц И И

Учебное пособие

Куйбышев 1980

Основной целью учебного пособия "Основы надежности авиационных ГТД и управление качеством продукции" является ознакомление читателя с современным состоянием науки о надежности авиационных ГТД. В пособии рассмотрены факторы, влияющие на надежность, и методы обеспечения высокой надежности и качества при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Главное внимание сосредоточено на инженерно-физических и организационных методах обеспечения надежности. Пособие предназначено для слушателей факультета повышения квалификации руководящих работников и специалистов промышленности по специальностям "Конструкция и проектирование ГТД" и "Испытания ГТД", а также может быть использовано студентами факультетов "Двигатели летательных аппаратов" и "Эксплуатация летательных аппаратов и двигателей". Предусматривается, что читатель владеет основами теории вероятностей и математической статистики в объеме курса института.

Темплан 1980 г., поз. 1015.

Утверждено на редакционно-издательском совете института 17.II.78 г.

Под общей редакцией Д.Ф. П и ч у г и н а

Рецензенты: В.В. Я н к о в с к и й, Е.А. Г р и ц е н к о

В в е д е н и е

XXV съезд КПСС как важнейшую задачу X пятилетки утвердил направление повышения качества и эффективности промышленной продукции. В выступлении на декабрьском (1977 г.) пленуме ЦК КПСС тов. Л.И.Брежнев говорил: "Сегодня работать лучше, чем вчера, завтра — лучше, чем сегодня. Таков лозунг дня. А лучше — это значит упор на качество, на эффективность, на рост производительности труда".

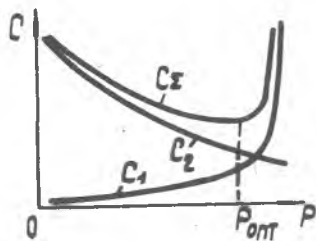
В настоящее время характер роста производительных сил и производительности общественного труда определяется не столько ростом количественных показателей производства, т.е. единиц продукции, сколько ее качественным изменением. Основные показатели качества сложной машины, в частности, авиационного газотурбинного двигателя, представлены на рис. 1 [5]. Для современной техники характерно создание и внедрение в народное хозяйство высокопроизводительных машин, рассчитанных на высокие скорости, давления, температуры. В машинах повышается уровень напряжений, широко внедряется сложная автоматика управления, регулирования и защиты. Чем более производительной является машина, тем большее количество людей она заменяет и тем дороже ее ненадежность. Уровень надежности может определяться на основе оптимизации затрат, как показано на рис. 2. Однако, этот путь не является характерным для двигателей летательных аппаратов. Целый ряд объектов, связанных с сохранением жизни людей, охраной окружающей среды, обеспечением обороноспособности, должен иметь практически абсолютную надежность. К таким объектам относятся и авиационные газотурбинные двигатели. Исходя из этого, надежность превращается в главный показатель качества изделия.



Р и с. 1. Основные показатели качества сложной машины

Обеспечение надежности производится на основании специально разрабатываемой комплексной программы, охватывающей стадии разработки, серийного производства и эксплуатации. Основы надежности закладываются при проектировании. Она отрабатывается на опытных образцах, обеспечивается при изготовлении в серийном производстве и поддерживается квалифицированной эксплуатацией [5].

Предпосылками обеспечения высокой надежности являются использование научно-обобщенного опыта, новейших достижений науки и техники в области конструирования и технологии, а также оптимальные методы и структура управления качеством и надежностью.



Р и с. 2. Определение оптимальной по затратам надежности: C_1 - стоимость разработки, доводки и производства; C_2 - эксплуатационные затраты; C_Σ - общая стоимость; $P_{\text{опт}}$ - оптимальная надежность

1. СОДЕРЖАНИЕ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ

1.1. Задачи науки о надежности

Развитие учения о надежности прошло три основных этапа.

На первом этапе была обоснована необходимость работ по надежности и сформулированы основные требования к надежности изделий.

Второй этап может быть назван математическим. На базе вероятностно-статистического подхода определялись и прогнозировались показатели надежности. Сама надежность рассматривалась как вероятность отсутствия отказов. Однако при всей важности и необходимости математических расчетов этот подход не достаточен для активного воздействия на повышение надежности. Существо проблемы состоит не в том, каким методом вычислять показатели надежности, а в том, как сделать изделие надежным. Теория вероятностей и математическая статистика, лежащие в основе расчетных методов, опираются на понятия массовости событий. Поэтому, чем выше требуется расчетное значение надежности, тем больший объем статистического материала необходим для достоверного заключения. Для весьма большого класса объектов на стадии проектирования и доводки это требование выполнить невозможно. Изложенные выше факторы предопределили необходимость перехода к третьему, инженерно-физическому этапу в надежности.

Для реализации инженерно-физического подхода необходимо установление непосредственной зависимости основных показателей надежности, во-первых, от физических свойств параметров материалов и элементов, от физико-химических процессов изменения этих свойств

и параметров и во-вторых - от интенсивности эксплуатационных воздействий. Понятно, что глубокое изучение физики поведения тысяч деталей современного авиационного ГТД невозможно. Разрешение противоречий между объемом необходимых исследований и наличным бюджетом времени происходит путем широкого использования прототипов (деталей и конструкций, успешно зарекомендовавших себя в работе в сходных условиях), повышения точности расчетов и назначении необходимых запасов.

Непосредственная реализация инженерно-физического этапа в практике доводки и эксплуатации проявляется в виде широкого развития методов и средств технической диагностики. На основе выявленных физических закономерностей определяется возможность появления отказов, прогнозируется поведение конструкций и протекание процессов.

Таким образом, каждая деталь и изделие в целом могут быть обеспечены достаточной надежностью при реализации следующих условий:

точный инженерно-физический расчет функционирования с учетом влияния окружающих условий, взаимного влияния деталей и элементов конструкции, факторов эксплуатации;

проектирование и изготовление деталей на базе прототипа с известными достаточными характеристиками надежности;

опытная доводка на установках и в составе изделия в условиях, близких к эксплуатационным или непосредственно в эксплуатационных. Все три условия обеспечения надежности являются взаимосвязанными.

Ни первое, ни второе условие на сегодня не позволяют обеспечить высокую надежность, поскольку различные процессы, протекающие в двигателе, известны с разной степенью детализации, а подобие элемента прототипу всегда относительно. Наиболее важными условиями следует признать использование получаемых данных о прототипах при проектировании и опытную доводку, где скрытая ненадежность превращается в явную в виде дефектов или отказов. Изучение отказов и дефектов позволяет вскрыть физическую причину ненадежности и устранить ее или локализовать параметры изделий в безопасной зоне.

Особенностью надежности как прикладной науки является существенная зависимость ее содержания от объекта исследования и его условий эксплуатации. Наряду с общими основными понятиями и мето-

дами в каждом конкретном случае появляются специфические вопросы, определяемые структурой объекта и входящих в него деталей, условиями применения, объемами производства, допустимым уровнем затрат на достижение надежности, ценой ненадежности и т.п.

Именно эта особенность предопределила появление специальной области науки о надежности "Надежность авиационных ГТД", которая изучает и разрабатывает условия и методы обеспечения надежности двигателей и решает следующие задачи:

систематизация отказов и дефектов и исследование причин ненадежности;

разработка методов учета влияния изменчивости внешних и внутренних условий функционирования на надежность;

установление физических закономерностей возникновения отказов;

изыскание и применение способов обеспечения надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации;

разработка и использование методов количественной оценки надежности;

организация и управление комплексом работ по обеспечению надежности и качества продукции.

1.2. П о н я т и я н а д е ж н о с т и

Надежностью называется свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования (ГОСТ 13377-75). Она является комплексным свойством и определяется следующими показателями: долговечностью, безотказностью, сохраняемостью и ремонтпригодностью.

Долговечность - свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Долговечность определяется сроком службы изделия или его техническим ресурсом.

Безотказность называется свойство изделия сохранять свою работоспособность в течение некоторой наработки без перерыва. Она

характеризуется вероятностью безотказной работы в течение заданного времени, средним временем безотказной работы (для неремонтируемых объектов) или средним временем работы между отказами (для ремонтируемых объектов), наработкой на отказ и другими характеристиками.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять эксплуатационные показатели после установленной в технической документации продолжительности хранения и транспортировки. Она характеризуется средним сроком сохраняемости, а обеспечивается путем соответствующей консервации.

Ремонтопригодность называется свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и дефектов путем проведения технического обслуживания и ремонта. Она характеризуется, в основном, средним временем восстановления.

В настоящее время показатель ремонтопригодности дополняется контролепригодностью, которая характеризует возможность проверки тем или иным методом технического состояния основных деталей и агрегатов в ходе эксплуатации. Достаточная контролепригодность является условием, позволяющим устанавливать ресурс изделий по их техническому состоянию.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Технический ресурс – наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

В процессе эксплуатации изделие может находиться в различных состояниях, т.е. исправном или неисправном, работоспособном или неработоспособном. Изделие может находиться и в предельном состоянии.

Под исправностью понимается такое состояние изделия, когда оно в данный момент времени удовлетворяет всем требованиям нормативной технической документации.

Работоспособность – такое состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативной технической документацией.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за: неустранимого нарушения требований безопасности, неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой или необходимости проведения среднего или капитального ремонта.

Связь между основными понятиями, относящимися к состояниям и событиям, характеризующим надежность, приведены в табл. I.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности называется отказом.

Существует понятие частичного отказа – это отказ, после возникновения которого изделие может быть использовано, но с меньшей эффективностью.

Применяется также термин систематический отказ. Это многократно повторяющийся отказ, обусловленный дефектами конструкции объекта, нарушением процесса его изготовления, низким качеством используемых материалов и т.п.

Причинами отказов объектов могут быть дефекты (ГОСТ 17102-71), допущенные при конструировании, производстве и ремонтах, нарушении правил и норм эксплуатации, различного рода повреждения, а также естественные процессы изнашивания и старения.

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией.

Повреждением называется событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его составных частей вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные в нормативно-технической документации на объект. Повреждение может быть существенным, и тогда оно является причиной нарушения работоспособности, и несущественным, при котором работоспособность объекта сохраняется.

Это показывает, что понятие дефекта шире, чем понятие повреждения и отказа.

По принятой терминологии неисправное изделие может быть работоспособным, так как весьма большой класс дефектов не приводит к отказу по крайней мере за время одного полета. (Например, коробление кожуха, царапины и риски, снижение величины параметра в нормативе ТУ, в отдельных случаях трещины на лопатках и дисках, допущенные на определенное время, когда доказано, что это не поведет к

Т а б л и ц а I

Связь между основными понятиями, относящимися к состояниям и событиям, характеризующим надежность

С о с т о я н и я		С о б ы т и я	
По отношению к требованиям технической документации	По отношению к выполнению функций	Причины, вызывающие состояния и события	Наименование события, являющегося следствием причин
Исправное	Работоспособное	Полное соблюдение требований и правил при конструировании, изготовлении и эксплуатации	Эксплуатация
	Работоспособное	Несоответствие требованиям и нормативной документации по любым причинам	Дефект
Неисправное		Влияние внешних воздействий выше допустимого технического документацией уровня	Несущественное повреждение
		Дефект, повреждение	Частичный отказ
	Неработоспособное	Дефект, существенное повреждение, достижение предельного состояния	Отказ
			Потеря исправности и частичная потеря эффективности
			Потеря работоспособности

отказу). Любые дефекты, в принципе, со временем могут привести к отказу, поэтому работа по устранению и предупреждению дефектов составляет главное содержание работы по надежности. Дефекты должны устраняться немедленно по обнаружении, так как опасных дефектов не бывает. Если дефект не опасен, т.е. за весь период эксплуатации он не приведет к отказу, то требование нормативной документации, которое оказалось нарушенным в результате проявления дефекта, является лишним.

1.3. К л а с с и ф и к а ц и я д е ф е к т о в и о т к а з о в

Изучение дефекта позволяет вскрыть физическую причину ненадежности, устранить ее или в ряде случаев локализовать параметры изделия в той зоне, где при заданных условиях дефектов не возникает. Изучение проявившихся и возможных дефектов и отказов - важнейшее условие обеспечения надежности. Отсюда вытекает и важность классификации. Дефекты и отказы могут классифицироваться по различным аспектам, и эта многогранность выражает с одной стороны - широкую взаимосвязь всех сторон работы машины, а с другой - важность для разработчика, изготовителя, эксплуатационника учета всех аспектов, влияющих на надежность. Общее число дефектов нового двигателя может достигать нескольких сотен. Для двигателя НК-12, например, на начальном этапе доводки оно было порядка 500.

Классификация дефектов и отказов может быть проведена по следующим разделам.

1. Этап существования двигателя: при доводке, в серийном производстве, при эксплуатации.

2. Момент обнаружения отказа или дефекта: в процессе работы, при осмотрах и регламентных работах, при разборке.

3. По виду и форме проявления:

а - по виду проявления: помпаж, выключение двигателя, тряска двигателя, заедание ротора, пожар, падение тяги, падения давления масла, стружка в масле, срабатывание автоматики защиты и т.п.

б - по форме проявления дефекта: излом, деформации, коробление, ослабление затяжки, расконтривание, люфты, нарушение уплотнений. К такого типа дефектам относится также изменение характе-

ристик элементов, усадка пружин, наличие недопустимых касаний, повреждение изоляции, подгар контактов, наличие коксообразования, изменение характера распыла и т.п.

4. По элементам двигателя: дефекты компрессора, турбины, топливной системы и т.д.

5. По временному характеру проявления: внезапные, постепенные, сбои, перемежающиеся отказы.

Внезапные отказы характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта.

Постепенные отказы характеризуются постепенным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта.

Сбои - самоустраняющиеся отказы, приводящие к кратковременному нарушению работоспособности.

Перемежающиеся отказы - многократно возникающие сбои одного и того же характера.

6. По причинам возникновения: конструкторские, технологические, производственные, эксплуатационные.

7. По степени опасности: отказ на земле, отказ в полете, не ведущий к летному происшествию, отказ в полете, ведущий к летному происшествию.

8. По последствиям: отказ, устранимый в эксплуатации; отказ, ведущий к досрочному съему двигателя с самолета; отказ, ведущий к летному происшествию.

9. По способам устранения дефектов: заменой деталей, регулировкой мелким ремонтом, заменой двигателя и т.д.

10. По связи дефектов и отказов между собой: независимые и зависимые.

Независимые - отказы элемента или объекта, необусловленные повреждением или отказами других элементов объекта.

Зависимые - отказы элемента или объекта, обусловленные повреждением или отказами других элементов объекта.

Возможны и другие виды классификации. В частности, на рис. 3 (см. вкладку) представлено распределение дефектов и отказов устраненных в ходе доводки одного из типов двигателей [6].

В качестве примера классификации дефектов по элементам двигателя в табл. 2 приведена статистика дефектов, проявившихся во время доводки на двигателе НК-8-4.

Т а б л и ц а 2

Наименование сборочных единиц	Количество дефектов, %
Передняя и средняя опора	9,7
Компрессоры высокого и низкого давления	16,2
Турбина	10,2
Камера сгорания	8,5
Агрегаты запуска	3,6
Агрегаты регулирования	6,5
Датчики автоконтроля	4,1
Коробка приводов, маслосистема	7,7
Подвески двигателя, системы отбора воздуха	7,7
Прочие дефекты	25,8
	100%

Следует отметить, что при доводке двигателя НК-12 МВ дефекты камеры сгорания, компрессора и турбины составляли 50%. Снижения их до 34,9% на двигателе НК-8-4 удалось добиться благодаря опережающей отработке этих узлов на специальных установках.

В общем числе дефектов, классифицируемых по причинам возникновения, конструкторские дефекты составляют порядка 76%, а производственные и технологические 24%. По мере доводки двигателя это соотношение, соответственно, изменяется в сторону увеличения процента производственных и технологических дефектов.

Статистика показывает следующее распределение дефектов по месту их выявления в период доводки двигателя:

в ходе стендовых испытаний - 29% при опытной отработке на летающей лаборатории и самолете лидере - 16%;

при разборке и дефектации после летных и стендовых доводочных испытаний (до начала пассажирских перевозок) - 55%.

Число отказов, причиной которых является износ деталей, составляет 81,4%. Наиболее часто встречаются следующие дефекты: износ уплотнений, сепараторов, полок и вставок, срабатывание спец. слоя, трещины сварных швов, ухудшение удельного расхода, электрохимическая и контактная коррозии. При этом дефекты деталей компрессора составляют 7,8%, а турбины - 10%.

Внезапные отказы составляют 18,6%. Эти отказы наиболее опасны. Они обусловлены скачкообразным, резким изменением закона на-

гружения, увеличением нагрузки или падением несущей способности конструкции. Примером являются срывы в компрессоре, резонансные колебания, автоколебания лопаток и других элементов конструкции, разрушение деталей, прогары камеры сгорания, произвольные пере-кладки регулируемого направляющего аппарата и сопла. Характерной особенностью внезапных отказов являются огромные трудности их устранения. Они устраняются практически только ликвидацией при-чин и условий, их порождающих, что приводит к необходимости радикального изменения принятых первоначально конструкций или методов их изготовления. Такие отказы возникают на компрессоре примерно в 11%, на турбине в 2,7% всех случаев.

Статистика дефектов позволяет выявить наиболее слабые эле-менты, оценить влияние организационно-технических мероприятий (например, таких как создание новых установок для опережающей до-водки, материалов, технологических процессов, методик расчетов) и более правильно распределить силы конструкторов.

Из анализа статистики дефектов и отказов и практики доводки и повышения надежности ГТД можно выделить ряд наиболее существен-ных причин возникновения ненадежности на основных этапах создания и существования двигателя.

При проектировании:

- недостаток опыта и квалификации конструкторов;
- неполное использование опыта и информации других организаций;
- новые проблемные вопросы, по которым опыт просто отсутство-вал;
- отставание развития технологии и металлургии от нужного кон-структору уровня;
- недостатки в опережающей поузловой проверке машин на специ-альных стендах;
- трудность оценки качества проектных работ;
- ограниченность времени на проектирование ввиду быстрого мо-рального устаревания машин.

При доводке:

- малое число машин и короткая наработка до внедрения в серию, что не дает проявиться всем дефектам, "заложеным" в конструкции;
- естественный разброс в долговечности узлов, (так, турбинные лопатки имеют разброс по долговечности на порядок);
- трудности предварительной (априорной) оценки надежности.

В серийном производстве:

нарушение требований технической документации;
особенности серийной технологии (рассеивание свойств и т.п.);
неполное выявление приработочных отказов за период сдаточных испытаний;

стремление к резкому снижению трудоемкости (невыполнение некоторых тонкостей технологии, невнимание к подготовительным операциям, повышение скорости резания и подачи и т.п.);

трудность количественной оценки качества.

При эксплуатации:

эксплуатационная нетехнологичность;

нарушение правил и инструкций;

ошибки операторов;

несовершенство информации о внезапных отказах;

трудность оценки поведения двигателя и отсутствие своевременной информации ввиду массовости эксплуатации.

1.4. Комплексные программы обеспечения надежности

Под программой обеспечения надежности понимается документ, определяющий комплекс организационно-технических мероприятий, требований и правил, которые должны выполняться в процессе проектирования, производства и эксплуатации изделий.

Общие требования к программе надежности определяются в работе [10], а для изделий авиатехники конкретизируются в работе [9].

Комплексная программа обеспечения надежности должна включать: определение организационной структуры обеспечения надежности с указанием полномочий и ответственности лиц за выполнение каждой задачи;

детальное перечисление задач по обеспечению надежности и методы их решения;

подробное описание каждой из задач;

методы контроля, позволяющие проверить решение каждой задачи;

плановые сроки начала и окончания решения каждой задачи;

методы решения наиболее существенных (с точки зрения надежности) задач;

выявление технических трудностей при решении задач и оценку их влияния на выполнение наиболее существенных требований программы, предложения по направлениям решения этих трудностей;

методы доведения до исполнителей требований по надежности для быстрого устранения выявленных недостатков.

Комплексная программа разбивается на три самостоятельные программы, охватывающие стадии разработки, серийного производства и эксплуатации.

Эти программы должны реализовать факторы, обеспечивающие достижение заданного уровня надежности [8], которыми являются на стадии разработки:

правильное формулирование требований к надежности изделия в целом;

оптимальное распределение требований к надежности между элементами изделия;

выбор комплектующих изделий и элементов с учетом требований к надежности;

обеспечение оптимальных режимов работы узлов;

выбор допусков на параметры с учетом требований к надежности;

обеспечение защиты от вредных воздействий среды;

учет возможностей человека – оператора при обслуживании спроектированного изделия;

обеспечение ремонтпригодности и контролепригодности;

на стадии изготовления:

выбор оптимальных режимов технологических процессов;

обеспечение стабильности и точности технологических процессов;

оптимизация методов контроля;

анализ отклонений от технической документации;

всесторонние испытания головных образцов и периодические испытания готовой продукции;

анализ отказов и неисправностей, связанных с технологией;

на стадии эксплуатации:

тщательное обучение технического персонала;

анализ причин отказов и неисправностей;

разработка оптимальных методов технического обслуживания;

рациональное планирование производства и использования запасных частей;

прогнозирование приближения к отказам.

2. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ

2.1. Влияние внешних и внутренних условий функционирования двигателя

По мере проявления в авиации тех или иных отказов или дефектов в орбиту внимания конструктора вовлекается все большее число внешних и внутренних факторов, влияющих на надежность. Так, расчет запаса устойчивой работы в настоящее время проводится практически во всей области возможного изменения характеристик внешней среды, а прочностные расчеты зачастую не охватывают всего этого диапазона. Следует, конечно, иметь в виду, что число влияющих факторов (как внешних, так и внутренних) на прочность и параметры изделия практически безгранично, и выбор из них необходимых и достаточных опирается на опыт и искусство конструктора и расчетчика.

Условия работы силовой установки самолета на земле характеризуются стандартными величинами (атмосферное давление 760 мм рт.ст. $T_0 = 288^\circ\text{К}$, $V_n = 0$). Эти данные обычно используются при расчете тяговых и прочностных характеристик двигателя.

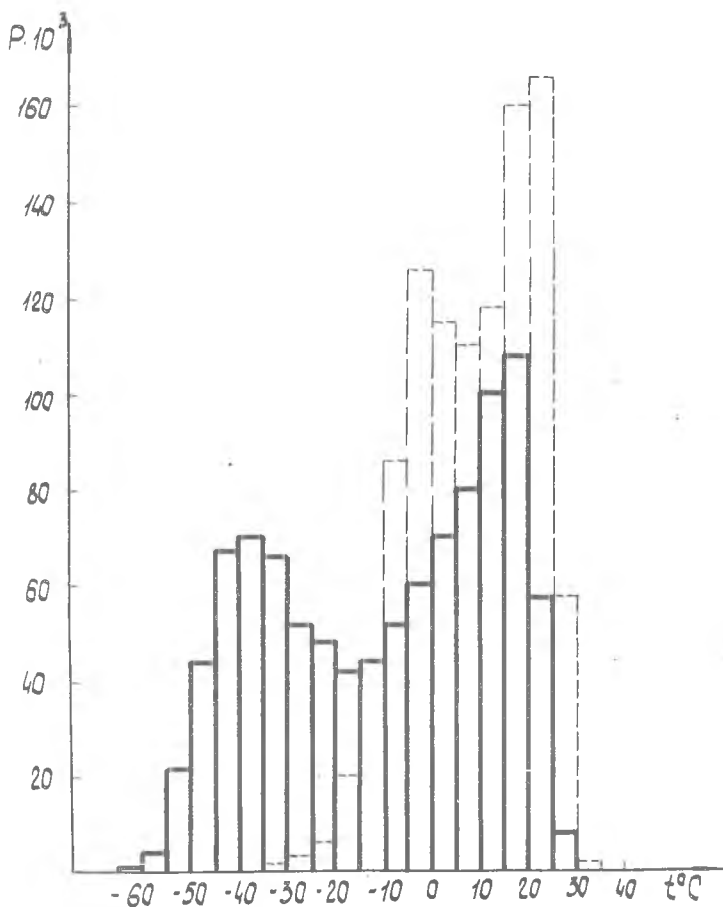
Однако, для более полного анализа работоспособности двигателя необходимо рассмотреть его характеристики при различных вариациях этих величин и сочетаниях внешних воздействий [3].

Известно, что даже в равнинных условиях европейской части нашей страны атмосферное давление меняется от 700 до 790 мм рт.ст., а на высокогорных аэродромах Средней Азии нижние значения давления падают до 400–450 мм рт.ст. Диапазон изменения температуры обычно составляет 220–320 К, а в Антарктиде нижнее значение падает до 195–185 К. Скорость ветра достигает 20–30 м/с., причем, может иметь различные направления по отношению к оси воздухозаборника. При этом наблюдается сильное искажение поля скоростей и большие пульсации воздуха на входе в компрессор, происходит снижение газодинамического запаса устойчивости и повышение вибрационных напряжений в лопатках первых ступеней компрессора.

При низких температурах окружающего воздуха ухудшается работа топливной, масляной систем и систем регулирования, а при высо-

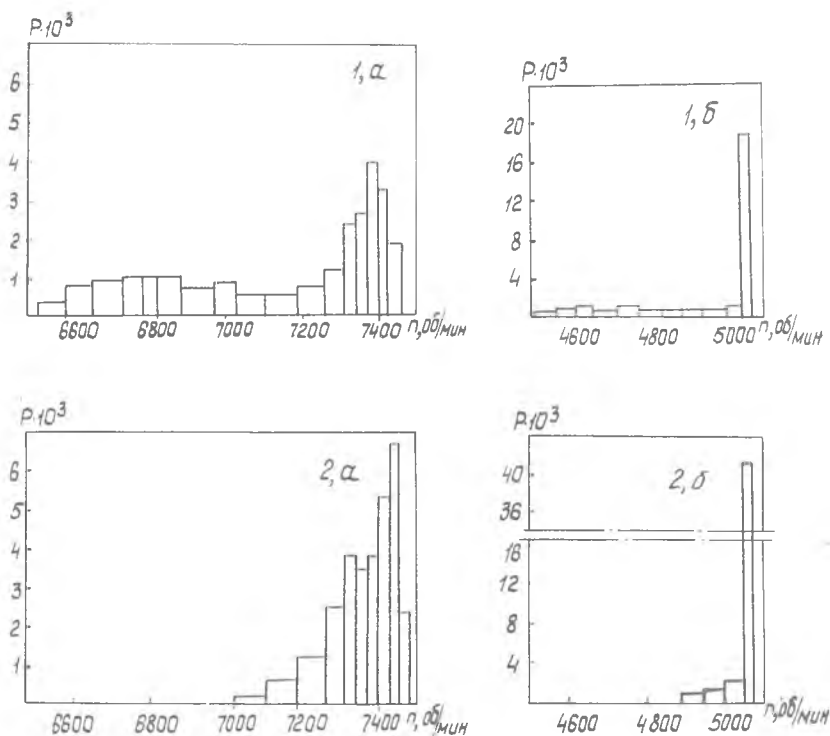
ких температурах ухудшается охлаждение камер сгорания, реактивного сопла и горячих трубопроводов.

На рис. 4 представлены гистограммы распределения многолетней среднегодовой температуры для Якутска и Алма-Аты [11]. На их основе рассчитаны гистограммы возможных изменений чисел оборотов двухконтурного ТРД при работе на номинальном режиме на земле



Р и с. 4. Распределение многолетней среднегодовой температуры:
—— Якутск, - - - - Алма-Ата

(рис. 5), которые необходимо учитывать при динамических и прочностных расчетах. Гистограммы показывают, что рассеяние значений оборотов достаточно велико.



Р и с. 5. Распределение оборотов: а - ротора высокого давления (ВД), б - ротора низкого давления (НД); ДТРД на номинальном режиме при $H=0$ для местных распределений температур: 1 - в Якутске, 2 - в Алма-Ате; значения оборотов роторов при $t = 15^\circ\text{C}$, $H = 0$:

$$n_{\text{НД}} = 5070 \text{ об/мин}, \quad H_{\text{ВД}} = 7400 \text{ об/мин}$$

Весьма неблагоприятное влияние на надежность двигателя оказывает засорение воздуха посторонними частицами (песком, камнями, кусочками льда), подсосываемыми на вход в двигатель. При этом наблюдается интенсивный износ, а также появление вмятин и забоин на

лопатках компрессора. Имеются случаи попадания на вход двигателя птиц.

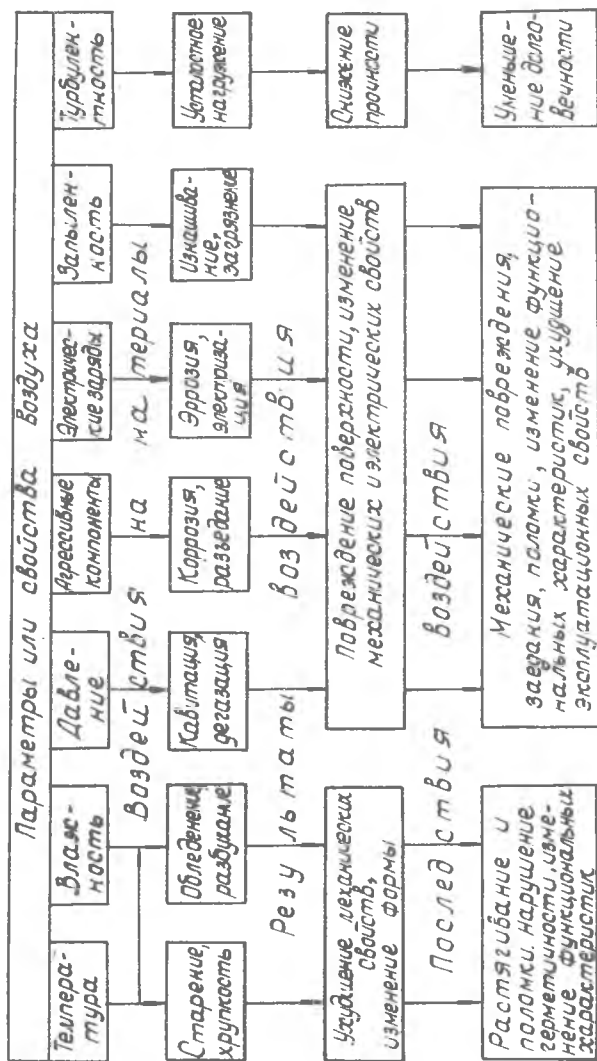
Анализ причин неисправностей двигателей, выявляемых в эксплуатации, показывает, что наибольшее их число связано с необоснованными допущениями, принятыми при расчетах, или является результатом неполного учета внешних воздействий в реальных условиях эксплуатации. На рис. 6, взятом из работы [3], представлена схема воздействия метеорологических факторов на свойства материалов. В этой же работе на примере топливной системы подробно рассмотрено влияние условий полета на ее функционирование.

Во многих случаях причиной появления неисправностей является недостаточно полный учет действия местных (в данном участке конструкций) давлений, температур, вибраций или других нагрузок, которые можно назвать внутренними условиями. Анализ характера воздействия и количественное определение этих факторов значительно сложнее, чем определение влияния внешних условий. Если внешние воздействия зависят только от режимов полета, режимов работы силовой установки, климатических и атмосферных условий, то характер воздействия внутренних факторов зависит от общей компоновки самолета и силовой установки, месторасположения и крепления отдельных узлов, агрегатов и систем, от их конструкции, динамических характеристик, внутренних свойств применяемых материалов. В связи с такой сложной зависимостью достоверные и полные характеристики величин местных температур, давлений, вибраций, деформаций могут быть определены только в процессе стендовых и летных испытаний.

В ряде случаев в период доводки, при введении изменений для улучшения условий работы отдельных элементов двигателя, могут быть созданы дополнительные вредные внутренние факторы для других элементов. Они возникают как следствие недостаточной изученности свойств конструкции и, что особенно важно, взаимосвязей ее отдельных элементов.

На этапе проектирования для ориентировочных оценок влияния внутренних условий используются экспериментальные данные, полученные при испытаниях прототипов или близких конструкций, что является общим принципом проектирования.

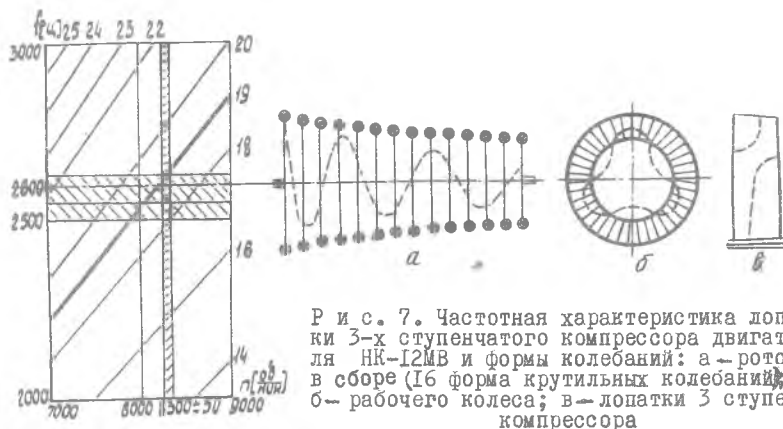
Результатом действия нерегламентированных или неучтенных внутренних условий являются повреждения узлов крепления и соединений, местные трещины и коробления, заедание или заклинивание прецезионных пар регуляторов или автоматических устройств, нарушение точ-



Р и с. 6. Схема влияния метеорологических факторов на свойства материалов

ностных характеристик приборов и систем регулирования, рост вибраций и деформаций узлов и агрегатов.

Так, установка на двигатель НК-12МВ воздушных винтов диаметром 6,2 м на первом этапе модификации этого двигателя для самолета "Антей" вызвала рост вибрации с частотой, кратной 4-й винтовой гармонике, на корпусе и ряде агрегатов в 2-4 раза. Напряжения в траверсе крепления турбостартера выросли в 2-8 раз. Другим примером весьма сложного дефекта, обусловленного внутренними причинами, является поломка лопаток 3-ей ступени компрессора двигателя НК-12МВ от колебаний с частотой 2600 Гц, кратной 19-й гармонике ротора. Динамическая картина колебаний ротора компрессора МВ, приведенная на рис. 7, была вскрыта уже после многочисленных экспери-



Р и с. 7. Частотная характеристика лопатки 3-х ступенчатого компрессора двигателя НК-12МВ и формы колебаний: а — ротора в сборе (16 форма крутильных колебаний); б — рабочего колеса; в — лопатки 3 ступени компрессора

ментов по исследованию поломки лопаток 3 ступени компрессора. Ротор, колесо, лопатка представляют собой динамический усилитель колебаний с частотой, равной 2600 Гц. Однако много лет компрессор работал надежно. В связи с выработкой зубьев центральной внутренней шестерни дифференциального редуктора (двигатель турбовинтовой) было принято решение увеличить глубину фланка. Недостаточный технологический контроль и ТУ чертежа привели к тому, что на ряде экземпляров двигателей фланк зубьев шестерен был чрезмерно велик, что создавало удары при переходе из зоны однопарного в зону 2-х парного зацепления. Из ударных импульсов система выделяла колеба-

ния с резонансной частотой, которые приводили к поломке лопатки. Понятно, что в отлаженном серийном производстве менять динамические характеристики системы было бы очень трудно и экономически нецелесообразно, поэтому дефект был устранен снижением величины фланка до уровня, обеспечивающего плавный вход в зацепление. Приведенный пример показывает, насколько сложной и длинной может быть цепочка взаимных связей в двигателе, свидетельствует о необходимости предварительной глубокой проработки не только внедренных мероприятий, но и их возможного влияния на другие узлы и детали.

Вредное влияние местных факторов можно уменьшить с помощью конструктивных и производственных мероприятий. Наиболее простыми из мероприятий являются:

подвод охлаждающего воздуха в зоны наибольших температур и устранение в конструкции застойных областей (на газотурбинных двигателях такие зоны чаще всего встречаются в местах затенения газового потока агрегатами или крупными узлами в основной и форсажной камерах и реактивном сопле);

применение амортизаторов и демпфирующих устройств;

частотная отстройка агрегатов, узлов или мест их установки;

проведение для максимально-возможного числа деталей и узлов тензометрирования, вибрографирования, термометрирования, замеров давлений и пульсаций.

2.2. Влияние рассеяния свойств и параметров объектов на надежность

Разбросом свойств деталей и параметров процессов вызвана необходимость установления допусков на них, установление норм. По мере роста сложности деталей, узлов, объектов на рассеяние их параметров будет влиять все большее число факторов. Соотношение этих рассеяний с допусками и нормами играет очень важную роль в надежности.

Наличие рассеяния свойств изделий значительно усложняет задачу по оценке надежности, так как нужно определить, является ли та или иная полученная величина параметра или свойства результатом естественного рассеяния значений, либо это связано с проявле-

нием причин, которые могут приводить к ненадежности. Для решения этой задачи можно ввести разделение всех объектов на 2 класса: подобных и неподобных [13]. Объекты, следующие одинаковым законам поведения, являются подобными. Они могут обладать подобием в отношении одного закона и быть неподобными в отношении других.

Например, нельзя рассматривать в конструкции подобие совокупности болтов и лопаток, но если мы будем изучать распределение весов деталей, идущих в металлолом с авиазаводов, то возможно здесь они будут подобными, так как их подобие будет определять только один закон — свойства, определяющие их принадлежность к металлам.

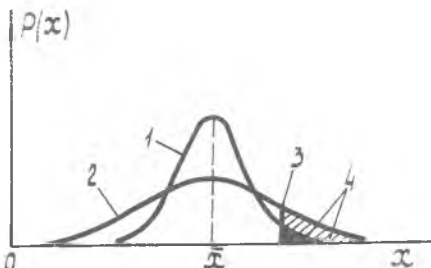
Однотипные, технически исправные объекты должны быть подобны в отношении всех существенных законов их функционирования.

Для какого-либо объекта, выбранного за эталон в подобной группе, численное соответствие его параметров и свойств параметрам и свойствам других подобных ему объектов, может быть выполнено лишь с некоторой вероятностью P , которая является функцией точности измерения и степени подобия объектов. Обычно статистические методы применимы лишь к подобным объектам, нагрузкам, средам. Это вытекает из принципа изучения выборки как случайной части генеральной совокупности объектов. Такая совокупность может существовать только при условии, что ее объекты обладают подобием.

Таким образом, подобие будет определяться по распределению вероятностей значений параметров, относительно которых ведется рассмотрение. Реально на всех ступенях изготовления осуществляется контроль, обеспечивающий поддержание свойств материалов, технологии и геометрических размеров в минимально-возможных для производства узких пределах, необходимых для обеспечения надежности. В этом случае эффективность контроля может являться количественной мерой надежности на стадии производства. Различные сочетания допустимых отклонений приводят к естественному разбросу свойств двигателей, в результате чего образуется совокупность подобных двигателей, которая может быть описана вероятностным законом распределения анализируемого параметра.

На рис. 8 приведено распределение изучаемого параметра подобной группы объектов. Все объекты, отвечающие данному закону распределения, следует признать подобными. Чем значение параметра ближе к среднему, тем выше подобие.

Риск неверного заключения о подобии определяется самой плотностью распределения, так как ее положение и вид зависят от ряда статистических факторов, связанных с конечностью выборки и приближенностью выбора закона и точностью измерений. Риск можно уменьшить, если сделать объекты более подобными, т.е. снизить дисперсии путем усе-
 чения и отбраковки доли совокупности, выходящей за приемочный допуск. Диагностические свойства распределения, как характеристики подобия, до настоящего времени использовались мало.



Р и с. 8. Плотности распределения контролируемого параметра: 1-совокупность, имеющая большую степень подобия по параметру x , 2-совокупность с меньшей степенью подобия, 3-верхняя граница допуска на параметр, 4-забракованная доля совокупности 1 и 2 по превышению параметром границы допуска

2.3. Нормирование параметров с учетом рассеяния их значений

Установление допустимых норм параметров и организация контроля каждого выпускаемого двигателя направлены на выявление возможных дефектов и оценку стабильности технологического процесса. Особенностью влияния технологии производства на надежность является то, что она выступает как процесс, поэтому точечная оценка, фиксируемая при испытаниях каждого отдельного двигателя или детали, не позволяет дать характеристику этому процессу и его влиянию на общую совокупность двигателей. Для этого необходимо обобщение оценок по достаточно представительной партии двигателей.

Характерным интегральным параметром, несущим большую информацию о надежности, является интенсивность вибрации. Рассмотрим установление уровня норм на примере вибрации [2].

Вибрационное состояние является одним из важнейших показателей надежности. Ввиду этого при создании и доводке двигателей про-

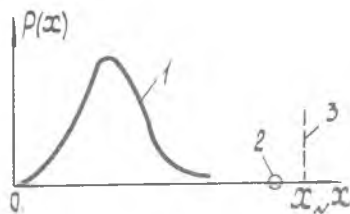
водится тщательное изучение вибраций в различных точках двигателя и на агрегатах. Работы, проведенные на стадии проектирования и доводки, позволяют в дальнейшем перейти к контролю общих вибраций двигателя только в отдельных "штатных" точках (как правило, в плоскости подвесок и опор роторов) и ограничить их контроль основными возбуждающими гармониками. Для особо ответственных изделий контроль в выбранных точках может проводиться в широкой полосе частот.

В процессе изучения вибрационного состояния двигателя и его доводки осуществляется широкий комплекс мероприятий по снижению уровня вибраций, состоящий из конструктивно-технологических мероприятий.

Для обеспечения надежной работы двигателя и объекта, на котором он установлен, должны быть обеспечены уровни вибрации, не превышающие норм. Нормы устанавливаются на базе опыта работы близких по типу двигателей и в дальнейшем корректируются, исходя из результатов стендовой и летной эксплуатации. Таким образом, в большинстве случаев нормы имеют эмпирический характер и отражают существенно важный опыт предшествующих конструкций. Нормы вибраций на агрегаты задаются, как правило, из условий обеспечения ими заданных функций и вибропрочности самих агрегатов и мест крепления. В ряде работ приведено обоснование существующих опытных норм из условия обеспечения вибронпряженности в конструкции, обеспечивающей с необходимым запасом прочности ее надежное функционирование. Исходя из этого, контрольные испытания должны быть направлены на усечение распределения подобных двигателей с тем, чтобы изделия, не обеспечивающие выполнения заявленных параметров, были отбракованы на стадии производства. В частности, для вибрации браковочным уровнем является установленная норма. Графически процесс контроля представлен на рис. 8. Исходя из этого, задачами конструирования, доводки и производства в области вибрационной надежности должно быть сужение плотности распределения (уменьшение дисперсии) и снижение среднего уровня вибрации.

Как указывалось, нормы вибрации в основном являются эмпирическими и обеспечивают при их установленном уровне надежное функционирование двигателя с точки зрения вибропрочности. В случае, когда статистика вибрации далеко отстоит от установленной нормы, имеется реальная возможность пропуска неподобающего двигателя в эксплуатацию. Наглядное представление об этом случае, дает рис. 9.

Практика показывает, что явление повышенной вибрации, как правило, связано с внесением в конструкцию грубых ошибок, т.е. ее неподобием. Так, установка одного из подшипников ротора с недопустимым перекосом может вызвать повышенный уровень вибрации, лежащий ниже нормы. Однако, при этом сам подшипник с большой вероятностью может разрушиться, что затем неизбежно приведет к разрушению двигателя. Поскольку опытные данные аппроксимируются вероятностными законами



Р и с. 9. Завышенный уровень нормы относительно статистики значений параметра: 1 - распределение параметра подобных двигателей; 2 - значение параметра одного из двигателей, выходящего из границ подобия; 3 - уровень нормы (x_n)

и объемы выборок, по которым установлено исходное распределение, являются ограниченными, особенно в начальный период производства, заключение о неподобии может иметь только вероятностный, предположительный характер.

Проведенное рассмотрение показывает необходимость дополнения нормы параметра функцией защиты от пропуска в эксплуатацию неподобных двигателей. Исходя из этого, норма вибрации, например, должна уменьшаться так, чтобы были отбракованы те двигатели, уровень вибрации которых имеет вероятность столь малую для подобных двигателей, что само подобие ставится под сомнение. Такая вероятность может быть определена как $P_n = 1 - F(x_n)$,

где $F(x_n)$ - значение функции распределения, соответствующее норме;

P_n - вероятность уровня вибрации, соответствующая норме.

При таком подходе в зависимости от выбранной величины $F(x_n)$ имеются две противоположные возможности: забраковать подобный двигатель или пропустить как годный двигатель, имеющий неподобие. Поэтому выбор значения функции $F(x_n)$ должен производиться на основе специальных критериев, учитывающих опасность риска заказчика и поставщика.

Число двигателей из общей совокупности, которые могут быть признаны неподобными при заданном $F(x_n)$, существенно зависит от выбора закона распределения, описывающего опытные данные. Рассмот-

рение теоретических предпосылок и анализ большого числа опытных распределений измеряемых параметров двигателей летательных аппаратов, в том числе и вибраций, показали, что наилучшим теоретическим законом для аппроксимации статистики оценочных значений большинства параметров является двойное экспоненциальное распределение [1].

Рассмотренная ранее возможность пропуска в эксплуатацию неподобных двигателей вследствие низкого уровня вибраций и сравнительно высокой нормы конкретно может быть проиллюстрирована на примере статистики вибраций двигателей НК-12МВ. По двумстам двигателям были получены величины среднего значения $\bar{K}_g = 1,12 g$ и среднеквадратичного отклонения $S_{K_g} = 0,37 g$ вибраций по переднему фланцу компрессора с частотой 1 роторной гармоники. Установленная норма в тот период равнялась $4 g$. На основе двойного экспоненциального распределения может быть определена вероятность получения уровня вибрации, равного норме для исследуемой совокупности

$$P_H = 1 - F(x_H),$$

$$\text{где } F(x_H) = \exp\{-\exp(-y)\}; \quad y = \bar{y}_N + \frac{(K_{gH} - \bar{K}_g) \sigma_N}{S_{K_g}},$$

\bar{y}_N и σ_N - параметры, зависящие от объема выборки [1, 13];
 K_{gH} - уровень нормы.

Для приведенных числовых данных $P_H = 0,0000454$. Естественно, что событие с такой вероятностью для реальных объемов выпуска двигателей НК-12МВ должно быть признано невозможным, а двигатели, имеющие уровень вибации, близкий к норме - неподобными. Нужно отметить, что из условий вибропрочности вибрация с уровнем $4 g$ для подобного типа двигателей является вполне допустимой. Впоследствии норма была уменьшена до $2,5 g$, что для рассмотренной статистики дает вероятность значения нормы $P_H = 0,005$, которую следует признать достаточной для того, чтобы практически, наверняка, были отбракованы неподобные двигатели. В данном случае надежность достигается ценой возврата в переборку примерно одного из двухсот выпускаемых двигателей.

3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

3.1. Вероятность безотказной работы. Интенсивность и частота отказов

Вероятность безотказной работы $P(t)$ есть вероятность того, что в заданном интервале времени наработки t при определенных условиях эксплуатации не возникнет отказ,

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (3.1)$$

где N_0 - число испытываемых изделий, $n(t)$ - число отказавших изделий за время t .

Если при ресурсе $t = 4000$ ч. из 1000 двигателей нормально выработали ресурс 950, а пятьдесят сняты досрочно, то

$$P(4000) = \frac{950}{1000} = 0,95.$$

Вероятность отказа:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (3.2)$$

Частота отказов при данном времени эксплуатации есть число отказов в единицу времени за данный интервал времени эксплуатации, отнесенное к первоначальному числу испытываемых изделий. Частота отказов есть плотность распределения вероятности времени отказа системы

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1-P(t)]}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \approx \frac{\Delta n(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (3.3)$$

где $\Delta n(t)$ - число отказавших изделий в интервале времени $(t - \frac{\Delta t}{2})$ $(t + \frac{\Delta t}{2})$.

Пример. Партия двигателей $N_0 = 500$ шт.

Снято в процессе эксплуатации следующее число двигателей после наработки, t

t	500	1000	1500	2000	2500	3000
Число снятых двигателей	20	24	30	34	40	50

О п р е д е л и т ь: частоту отказов в интервале [2000 ч...2500 ч]

Вычисляем по (4.3)

$$\Delta t = 2500 - 2000 = 500 \text{ ч.}$$

$$\Delta n(t) = \Delta n(500) = 40 - 34 = 6.$$

$$\lambda(2250) = \frac{6}{500 \cdot 500} = 0,24 \cdot 10^{-4} / \text{ч.}$$

Интенсивность отказов есть число отказавших в единицу времени изделий за данный период эксплуатации (интервал времени), отнесенное к среднему числу изделий, исправно работавших в данный период эксплуатации

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{\bar{N}_{\Delta t} \Delta t}, \quad (3.4)$$

где $\Delta n(t)$ - число двигателей, отказавших в период Δt ;
 Δt - период, за который анализируется интенсивность отказов;

$\bar{N}_{\Delta t}$ - среднее число двигателей, исправно работавших за период Δt .

Так как $N_{\Delta t} \Delta t = T_{\Sigma}$ - суммарная наработка всех двигателей за период Δt , то

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{T_{\Sigma}}. \quad (3.5)$$

Т.е. интенсивность отказов равна числу отказов, отнесенному к общей наработке всех двигателей в данном интервале наработки, т.е. среднее число отказов в ч. Интенсивность отказов более полно характеризует надежность системы, чем частота отказов, так как относится к фактически работающему, а не первоначальному количеству изделий. При высоких значениях $P(t)$ (малом числе отказавших изделий) различие между этими характеристиками небольшое.

П р и м е р: (см. данные предыдущего примера).

Определить λ (2000-2500).

Вычисляем:

В интервале снято 6 двигателей;

исправных к началу 500-34 = 466;

исправных к концу 500-40 = 460;

$$N_{\Delta t} = 463;$$

$$\lambda = \frac{6}{463 \cdot 500} = 0,259 \cdot 10^{-4} 1/ч.$$

Изменение интенсивности отказов по времени наработки в среднем имеет характер, показанный на рис. 10. Указанная зависимость является весьма осредненной. Из рассмотрения кривой изменения интенсивности отказов можно сделать следующие выводы:

1. Перед началом эксплуатации целесообразно проводить сдаточные испытания. Длительность и режимы подобных испытаний устанавливаются так, чтобы являлась основная масса приработочных отказов. По мере совершенствования производства возможно удастся отказаться от сдаточных испытаний и совместить их с контрольными.

2. Двигатель, удовлетворительно прошедший первые 30-50 ч. более надежен, чем новый, только поступивший в эксплуатацию.

3. Профилактическая замена деталей и узлов целесообразна только в третьем периоде. Если заменяется работоспособная деталь новой, то надежность может уменьшиться, так как для этой детали наступит период приработки.

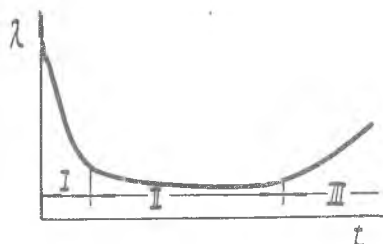
Связь между интенсивностью отказов и вероятностью безотказной работы выводится следующим образом. В выражении (3.1) обозначим $N_0 - n(t) = \bar{N}$ - среднее число исправных двигателей.

Тогда
$$P(t) = \frac{\bar{N}}{N_0}$$

или
$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}. \quad (3.6)$$

Продифференцируем равенство (3.6) $\frac{dP}{dt} = -\frac{1}{N_0} \frac{dn(t)}{dt}$, разделим и умножим правую часть на \bar{N} и с учетом (3.4) получим

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\bar{N}}{N_0} \frac{dn(t)}{dt \bar{N}} = -P(t)\lambda(t) \quad (3.7)$$



Р и с.10. Изменение интенсивности отказов по времени наработки: I-период приработки; II-нормальная эксплуатация; III - период интенсивного старения и износа

или

$$\frac{d\rho}{\rho(t)} = -\lambda(t) dt.$$

интегрируя от 0 до t и учитывая, что $\rho(0) = 1$, получим

$$\ln \rho(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt$$

или

$$\rho(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

(3.8)

Для $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$ $\rho(t) = e^{-\lambda t}$ - это выражение иногда называют основным уравнением надежности.

П р и м е р: время работы агрегата до отказа подчинено экспоненциальному распределению.

О п р е д е л и т ь: вероятность безотказной работы $\rho(t)$, плотность распределения вероятности (частоту отказов) $f(t)$, среднюю наработку до отказа T_{cp} для времени работы 500, 1000, 2000 ч.

дано значение $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Частота отказов: $f(t) = -\frac{d\rho(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} = \lambda \rho(t)$ (см. формулу 4.3)

$$\rho(t) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} t}, \quad f(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} e^{-2,5 \cdot 10^{-5} t}, \quad T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = 4 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

t	500	1000	2000
$\rho(t)$	0,9875	0,9753	0,9512
$f(t)$	$2,469 \cdot 10^{-5}$	$2,439 \cdot 10^{-5}$	$2,378 \cdot 10^{-5}$

Коэффициенты досрочного съема двигателей и отказа в полетных условиях на 1000 ч. общей наработки определяются по формулам:

$$K_{гсг} = \frac{\Delta n_{гсг}}{\bar{N} \Delta t} \cdot 1000, \quad (3.9)$$

где $\Delta n_{гсг}$ - число досрочно снятых двигателей;

$\bar{N} \Delta t = T_{\Sigma}$ - суммарная наработка за рассматриваемый период.

Числовые характеристики могут вычисляться за квартал, полугодие, год с начала эксплуатации.

Коэффициент отказа в полете на 1000 ч. общей наработки

$$K_{ол} = \frac{\Delta n_{ол}}{N \Delta t} 1000, \quad (3.10)$$

где $\Delta n_{ол}$ - число двигателей, отказавших в полете.

С учетом выражения (3.5) можно записать:

$$K_{дсд} = \lambda_{дсд} 1000; \quad K_{ол} = \lambda_{ол} 1000.$$

Наработка на отказ в полете:

$$T_{ол} = \frac{T_{\Sigma}}{\Delta n_{ол}} = \frac{1}{\lambda_{ол}}. \quad (3.11)$$

Наработка на один досрочный сьем

$$T_{дсд} = \frac{T_{\Sigma}}{\Delta n_{дсд}} = \frac{1}{\lambda_{дсд}}. \quad (3.12)$$

По данным зарубежной печати коэффициенты досрочного сьема и отказа в полете авиационных газотурбинных двигателей имеют следующие значения:

$$K_{дсд(1000)} = 0,2 \dots 0,5; \quad K_{ол(1000)} = 0,05 \dots 0,1.$$

3.2. Инженерно - физические показатели надежности

При проектировании, доводке и в начальный период эксплуатации отсутствие статистических данных не позволяет воспользоваться вероятностно-статистическими методами оценки надежности. В этот период количественная оценка базируется на инженерно-физических показателях, правильный выбор и обеспечение которых гарантируют надежность.

Для инженерно-физических показателей характерны следующие группы оценок: статическая прочность основных узлов, вибрационное состояние узлов и деталей, тепловое состояние узлов и дета-

лей, работоспособность всех систем и двигателя в целом, устойчивость работы на земле и в полете, проверка длительными испытаниями прочности основных узлов и т.п.

В качестве количественных показателей надежности в этом случае выступают следующие: коэффициенты запаса прочности деталей на наиболее напряженных режимах, вытяжка дисков компрессора и турбины, уровни виброскоростей двигателя и агрегатов, запасы по автоколебаниям, по превышению давления на входе и т.п., уровни температур и равномерности температурных полей, стабильность статических и динамических характеристик.

В качестве примера рассмотрим ряд инженерных показателей качества и надежности компрессора.

Для компрессора производится количественное определение следующих показателей: параметрических, функциональных, конструкционных, надежности, безопасности и технологичности.

В табл. 3 приведены данные показателей надежности и безопасности компрессора одного из ГТД.

Т а б л и ц а 3

Наименование показателей	Размерность	Количественное выражение	Подтверждение показателей
1	2	3	4
Показатели безотказности			
Наработка на отказ в полете (То.п.)	ч	В соответствии с требованиями нормативных документов	После определенного объема наработки в эксплуатации, позволяющего получить достоверные статистические данные
Наработка на отказ, приведший к досрочному съему двигателя (Тдсд)	ч	То же	То же
Наработка на неисправность в полете и на земле в межрегламентный период и при регламентных работах	ч	- " -	- " -
Наработка на отказ, приводящий к выключению двигателя в полете	ч	- " -	- " -

Показатели надежности

		1	2	3	4
		Показатели долговечности			
Показатели надежности	Ресурс до первого капитального ремонта	ч		В соответствии с техническими требованиями	длительными стендовыми эквивалентными и эксплуатационными испытаниями
	Перспективный ресурс до первого капитального ремонта	ч		То же	
	Назначенный ресурс	ч		- " -	
	Расчетный (по прочности) назначенный ресурс	ч		- " -	Расчеты при проектировании
	Наработка основных узлов и деталей не менее 3 ^х ресурсов	ч		- " -	Длительные стендовые испытания
Прочностные показатели					
Показатели	Запасы статической прочности рабочих лопаток			В соответствии с требованиями нормативных документов	Расчеты при проектировании
	Запасы статической прочности лопаток направляющих аппаратов			То же	То же
	Запасы статической и динамической прочности дисков			- " -	Расчет и экспериментальная проверка
	Запасы по переменным напряжениям рабочих лопаток			- " -	По результатам усталостных испытаний и тензометрирования в окончательной компоновке
	То же для лопаток направляющих аппаратов			- " -	
	Расчетные статические напряжения от газовых сил			- " -	Расчет
	в рабочих лопатках	кг/мм ²		- " -	Расчет
в лопатках направляющих аппаратов	кг/мм ²				

	1	2	3	4
	Толщина упрочненного слоя в лопатках	мм	То же	По результатам исследования упрочненных лопаток
	Максимально допустимая пластическая деформация дисков с учетом превышения наибольших допустимых оборотов на 3%	%	То же	Проведение специальных испытаний
	Момент затяжки болтов, кгс/м соединяющих диски, проставки, валы роторов			
	M 10 x 1,5	кгс м	4-0,5	Обеспечивается специальными приспособлениями при сборке
	M 12 x 1,5	кгс м	7-0,5	
Показатели безопасности	Показатели сопротивления эксплуатационным повреждениям			Проверка специальными стендовыми испытаниями
	Не нарушается работоспособность и существенно не меняются параметры при содержании воды в воздухе не более	гр/м ³	50	
	Не возникает аварийная ситуация и не нарушается безопасность полета при попадании в компрессор:			То же
	одной птицы весом	кг	1,8	
	града ϕ 51 мм	шт	50	
	средних птиц весом 0,5...0,7 кгс	шт	5	
мелких птиц весом 115 гр.	шт	20		
Показатели сопротивления критическим ситуациям				
Непробиваемость корпусов лопатками (кроме вентиляторных)		Обеспечена		Расчетом и при доводочных испытаниях

1	2	3	4
			Для вентиляторных обеспечивается повыше- нием динамической и статической прочности, предотвращающих обрыв

Аналогичные таблицы составляются и для других показателей по всем элементам и деталям двигателя. Обоснование количественных значений полученных показателей и их подтверждение оформляются отчетами с приложением расчетов и результатов исследований и испытаний.

3.3. Основы расчета и анализа схемной надежности

Когда известны или могут быть получены величины вероятностей безотказной работы отдельных элементов системы, можно определить вероятность безотказной работы всей системы, пользуясь методами схемной надежности.

В процессе выполнения расчетов и анализа надежности производится оценка вероятностей следующих двух событий:

События A , заключающегося в безотказном действии создаваемого элемента или изделия при определенных условиях его эксплуатации и в пределах заданного времени.

Противоположного события \bar{A} - отказа.

Для расчетов и анализа показателей надежности наибольшее применение имеют следующие методы [3]: метод структурных схем, метод логических схем, схемно-функциональный метод.

Метод структурных схем заключается в том, что рассматриваемое изделие представляется в виде структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных звеньев.

При составлении расчетных структурных схем используется следующая классификация соединений:

последовательным соединением называется совокупность систем (элементов), для которой необходимым и достаточным условием нарушения работоспособности является отказ хотя бы одной системы совокупности;

параллельным соединением называется совокупность систем, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех систем, входящих в совокупность;

монтажные и структурные соединения могут отличаться друг от друга, а структурные могут меняться в зависимости от рассмотрения того или иного дефекта, его вида и характера. Например, в рассмотренном случае с фильтрами учитывается 2 вида отказов: разрыв и засорение, которые при одной и той же монтажной схеме дадут два разных вида структурных схем (рис. II) [3].

Структурная схема Опасен разрыв сетки	Структурная схема	
	Опасен разрыв сетки	Засорение

Р и с. II. Классификация монтажных и структурных схем

фильтров при наличии большей вероятности разрыва сетки по сравнению с ее засорением более рациональным может оказаться ее последовательное включение.

Разработка и составление правильной структурной схемы представляет собой одну из наиболее существенных частей подготовки к расчету и анализу схемной надежности.

Выбор типа монтажного соединения фильтров в каждом конкретном случае зависит от соотношения вероятностей разрыва и засорения сетки и числа фильтров, входящих в соединение. Для соединений из 2-х

На основе теоремы умножения независимых событий вероятность безотказной работы при последовательном соединении

$$P_{\text{посл}} = P(A_1 A_2) = P(A_1) P(A_2) = \prod_{i=1}^N P_i.$$

Вероятность отказа

$$Q_{\text{посл}} = 1 - P_{\text{посл}}$$

На основе теоремы сложения вероятностей совместных событий для вероятности безотказной работы параллельного соединения имеем

$$P_{\text{пар}} = P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 A_2).$$

Если структурная схема состоит из "К" параллельных цепей, а каждая цепь из "N" звеньев, то вероятность безотказной работы параллельно-последовательной схемы при равных вероятностях безотказной работы элементов

$$P = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - \prod_{l=1}^N P_l).$$

Для экспоненциального закона отказов при последовательном соединении

$$P_{\text{посл}} = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \dots e^{-\lambda_n t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t};$$

$$Q_{\text{посл}} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}.$$

Если $\sum_{i=1}^n \lambda_i t \ll 1$, то с учетом известной из математики формулы

$e^x \approx 1 - x$ при $x \ll 1$ можно записать

$$P_{\text{посл}} \approx 1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i t, \quad Q_{\text{посл}} \approx \sum_{i=1}^n \lambda_i t.$$

Для параллельного соединения

$$P_{\text{пар}} = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - e^{-\lambda_i t}),$$

$$Q_{\text{пар}} = \prod_{i=1}^K (1 - e^{-\lambda_i t}).$$

Метод логических схем применяется, когда элементы систем могут иметь несколько видов зависимых отказов. В логической схеме (в отличие от структурной) допустимо наличие отдельных звеньев с зависимыми событиями. Для анализа надежности сложных систем методом логических схем необходимо тщательно изучить принцип работы и функциональную взаимосвязь всех элементов и звеньев рассматриваемой системы.

Анализ схемной надежности методом логических схем выполняется в следующем порядке:

формулируются условия безотказной работы системы в целом, в зависимости от сочетания возможности появления отказов отдельных элементов или звеньев системы;

строится графическая схема условий безотказной работы и возможных отказов отдельных звеньев;

составляются алгебраические уравнения событий безотказной работы и расчетные уравнения вероятностей с использованием алгебры логики;

определяют или получают количественные характеристики надежности элементов, входящих в систему;

производится расчет системы.

Расчет проводится с использованием следующих элементов алгебры логики:

сложение (+) – или

Умножение (\times) – и.

Событие \bar{A} является дополнением или отрицанием события A , и поэтому событие A не достоверно, если достоверно событие \bar{A} . (не A) и наоборот, т.е. $A + \bar{A} = I$. Отсюда следует, что логическое сложение событий A_1 или $A_2 (A_1 + A_2)$ – событие, которое достоверно, когда хотя бы одно из событий достоверно.

Логическое умножение $A_1 \times A_2$ или $A_1 A_2$ читается: A_1 и A_2 . Эта функция выражает событие, которое достоверно в том случае, когда и A_1 и A_2 достоверны. Отсюда: $A \times \bar{A} = 0$.

Пример записи событий с применением алгебры логики.

Словесное выражение: сложное событие L возможно только при появлении следующих простых событий:

события A_1 и A_4 , или A_3 и A_7 или A_2 и A_4 и A_6 , или A_1 и A_3 и A_5 .

Математическое выражение алгеброй логики:

$$L = A_1 A_4 + A_3 A_7 + A_2 A_4 A_6 + A_1 A_3 A_5 .$$

Свойства элементарных логических операций: свойство ассоциативности

$$(A_1 A_2) A_3 = A_1 (A_2 A_3) ,$$

свойство коммутативности

$$A_1 A_2 = A_2 A_1 ;$$

свойство дистрибутивности

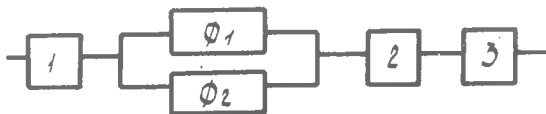
$$(A+B)C = AC + BC ;$$

$$\left. \begin{array}{l} AA = A \\ A+A = A \end{array} \right\} \text{законы идемпотентности}$$

Знак (-) не применяется: $A+B=A+C$ не дает $B = C$.

Пример расчета надежности элементарной схемы по методу логических схем.

Задана монтажная схема, состоящая из 3 агрегатов и 2 фильтров, приведенная на рис. 12.



Р и с. 12. Монтажная схема к расчету по методу логических схем: 1,2,3 - агрегаты, Φ_1, Φ_2 - фильтры

Условия безотказности:

все элементы работают безотказно;

отказ по засорению 1-го фильтра; остальные элементы безотказны;

отказ по засорению 2-го фильтра, остальные безотказны.

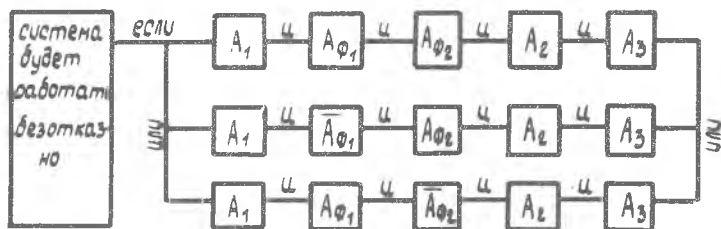
Все остальные случаи приводят к отказу, разрыв сетки недопустим, так как безотказность системы в этом случае при параллельном соединении не обеспечена.

Алгебраическое выражение событий безотказности:

$$S = A_1 A_{\Phi_1} A_{\Phi_2} A_2 A_3 + A_1 \bar{A}_{\Phi_1} A_2 A_3 A_{\Phi_2} + A_1 A_{\Phi_1} \bar{A}_{\Phi_2} A_2 A_3 ,$$

где A_{Φ} - безотказность фильтров по засорению и разрыву;

\bar{A}_{Φ} - отказ по засорению.



Р и с. 13. Логическая схема безотказной работы

Логическая схема безотказной работы системы, приведена на рис. 12 [3].

Заменяя события их вероятностями, получим

$P_{сист} = P_1 P_2 P_3 (P_{\phi_1} P_{\phi_2} + P_{\phi_2} \bar{q}_{\phi_1} + P_{\phi_1} q_{\phi_2}')$,
 где $P_{\phi} = (1 - q_{\phi}) = 1 - q'_{\phi} - q''_{\phi}$; q_{ϕ} - вероятность отказа фильтра;
 q'_{ϕ} - вероятность засорения фильтра; q''_{ϕ} - вероятность разрыва фильтра.

Обозначим $q_{1,2,3}$ - вероятность отказа агрегатов. Положим для простоты $q_1 = q_2 = q_3 = q$.

Тогда

$$P_{сист} = (1 - q)^3 [(1 - q'_{\phi_1} q''_{\phi_1}) (1 - q'_{\phi_2} - q''_{\phi_2}) + q'_{\phi_1} (1 - q'_{\phi_2} - q''_{\phi_2}) + (1 - q'_{\phi_1} - q''_{\phi_1}) q'_{\phi_2}].$$

Считая $q'_{\phi_1} = q'_{\phi_2}$ и $q''_{\phi_1} = q''_{\phi_2}$, получим

$$P_{сист} = (1 - q)^3 (1 - q'_{\phi} - q''_{\phi}) [(1 - q'_{\phi} q''_{\phi}) + 2q'_{\phi}].$$

Если в полученной формуле полагать $q'_{\phi} = 0$ или $q''_{\phi} = 0$, то данные могут быть получены и по методу структурных схем.

Зададимся числовыми значениями и проведем вычисления.

Пусть $q'_{\phi} = 0,004$, $q''_{\phi} = 0,002$, $q = 0,001$.

Тогда $P_{сист} = 0,993$.

При $q'_{\phi} = 0$, $P_{сист} = 0,99302$.

При $q''_{\phi} = 0$, $P_{сист} = 0,99699$.

При данных значениях q параллельное соединение выбрано верно, так как опасность при учете возможности засорения больше. Как уже отмечалось, главным в подобных расчетах является получение верных значений q .

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

В создании надежных изделий ведущая роль принадлежит конструкторам. "Служба надежности должна быть тесно связана с конструктор-

ской службой, она проявляет себя как помощник, как "голос совести" или как инспекция. Как помощник она выполняет некоторые аналитические и статистические работы, оценивает внутренне присущую надежность..." [12]. Служба надежности выполняет также большую организаторскую работу по контролю за устранением дефектов, научно-техническую работу по анализу статистики и т.д.

Основная задача науки о надежности на этапе проектирования состоит в том, чтобы помочь разработчику принять обоснованные решения, касающиеся выбора структуры системы, необходимости использования и мощности вводимого резервирования, оптимального использования опыта предыдущей доводки, построения необходимого плана испытаний и системы контроля.

Задачи обеспечения надежности решаются конструкторами как в рамках применения расчетных методов, которые были рассмотрены ранее, так и путем применения определенных правил и процедур проектирования, основанных на большом опыте создания надежных конструкций. Конечно, изложенным в этой главе не ограничивается опыт, накопленный в деле проектирования. Однако, пока проектирование в значительной степени остается искусством, любой перечень правил будет не полным.

Ранее уже указывалось, что надежность создается конструктором. Требования к надежности должны быть достаточно обоснованы. Отказ от не диктуемых необходимостью, нереальных требований в области надежности может дать значительную экономию времени, усилий и средств, которые нужны для другого направления.

К наиболее простым элементам, где используются хорошо изученные физические процессы, должны предъявляться наиболее высокие требования по надежности.

Мероприятия при проектировании, способствующие повышению надежности:

1. Глубокое изучение всех видов отказов и неисправностей, изучение истории доводки и дефектов, выяснение физических причин проявившихся отказов и дефектов.

2. Оценка надежности проектируемой конструкции путем сопоставления с ранее выпущенными изделиями по условиям работы, нагрузкам, напряжениям, качеству и свойствам используемых материалов, примененным методам изготовления и сборки, по эксплуатационным и весовым характеристикам. Такой подход называется "метод эквивалентного двигателя".

3. Упрощение схем и конструкций. Вероятность отказа двигателя возрастает с увеличением числа последовательно соединенных элементов. Как уже отмечалось, в теории надежности последовательным соединением элементов называется такое, при котором выход из строя хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы.

Пример упрощения. Размещение генератора в коке – нет шестерен передачи. Установка вспомогательных двигателей для обслуживающих самолетных и двигательных агрегатов, что существенно упрощает конструкцию главных двигателей и т.д.

Нужно помнить, что все упрощающие мероприятия и новые узлы, агрегаты, конструкции должны пройти соответствующие доводочные испытания.

4. Агрегатирование – объединение элементов конструкции, выполняющих замкнутый комплекс функций, в единый легкоосъемный, легко обслуживаемый и ремонтируемый агрегат. Это сокращает число трубопроводов, их длину и число соединений. Так, на одном из двигателей переход на блок, содержащий маслбак, топливо-масляный радиатор и фильтр, позволил изъять около 25 трубок и 50 соединений.

Агрегатирование позволяет в случае появления дефекта меньше разбирать исправных элементов (попутных при разборке), что повышает надежность.

Дальнейшим развитием этого направления является создание олочно-модульных конструкций. Так, на двигателе "Спей" фирмы "Ролс-Ройс" замена ротора компрессора проводится двумя монтажниками без нарушения балансировки за 6 ч.

5. Унификация и стандартизация. позволяют в большом числе единиц выпускать проверенные по надежности элементы, получать модификации с меньшим числом новых деталей. Имеются случаи в зарубежной и отечественной практике (например, семейство НК) создания ряда двигателей с одним хорошо доведенным газогенератором. Нужно отметить, что обеспечение этого принципа иногда встречает сопротивление со стороны конструкторов, которые считают оригинальную конструкцию более подходящей, чем унифицированную, исходя из чисто конструктивных соображений, не учитывая в полной мере вопросов надежности.

6. Резервирование – метод обеспечения надежности путем включения в схему или конструкцию одного или нескольких элементов, способных автоматически или с помощью систем управления замещать

вышедший из строя агрегат. Резервирование всегда сопровождается увеличением веса и сложности изделия и используется как крайняя мера. Так, ограничения в габаритах и весе могут потребовать (для 2^X или более устройств взамен одного) меньших запасов прочности, более напряженных элементов и снижения суммарного эффекта надежности от резервирования.

Если главным воздействующим фактором на резервируемые элементы являются удары, вибрации, температура, то с равным успехом эти воздействия выведут из строя и резервирующую систему. В этом случае максимум усилий нужно направить на защиту от вредных воздействий — демпфирование, теплоизоляцию и т.п.

7. Создание благоприятного режима работы путем некоторого снижения достигнутого уровня параметров, уменьшения действующих нагрузок, повышения запасов ведет к существенному росту надежности.

Например, переход от трубчатых к кольцевым камерам сгорания, использование большого количества форсунок способствует выравниванию полей температур и давлений на лопатках. Охлаждение лопаток турбины значительно повышает их ресурс. Применение теплоизоляции и дополнительной подкачки масла на выбеге существенно повышает работоспособность подшипников на большой ресурс. Защите лопаток компрессора высокого давления от попадания посторонних предметов способствует сепарирующее действие вентилятора, когда он расположен спереди.

Благоприятный режим создается также за счет повышенных запасов прочности и долговечности, при этом эксплуатационные режимы являются относительно малонагруженными.

8. Ограничение последствий отказа. Например, поломка лопаток компрессора от попадания постороннего предмета может быть ограничена по последствиям как путем создания лопаток, которые по прочности не ломаются от мелких посторонних предметов, так и путем установки кожуха, гарантирующего его непробиваемость и системы отключения двигателя. В практике имеют место и те и другие системы. Предельные рессоры на электро- и турбостартерах, генераторах и других агрегатах служат тем же целям. У самолетов с большим числом двигателей на случай аварийной ситуации автоматика, как правило, настраивается на снижение режима до малого газа или выключения. У одномоторных самолетов, наоборот, при выходе из строя систем регулирования и агрегатов, если двигатель сразу не остановился, он переводится на максимальный режим для возможного набора высоты.

9. Устранение возможности ошибочных включений. Это достигается установкой различных типов штепсельных разъемов, длиной кабеля, конструкцией ниппелей и накидных гаек.

10. Введение возможности функциональных неразрушающих проверок.

11. Обеспечение визуального и приборного контроля средствами технической диагностики на неработающих двигателях. Для этого вводятся соответствующие лючки и смотровые отверстия. Разработан ОСТ на контролепригодность двигателей (ОСТ 100788-75).

12. Обеспечение стабильной и прогрессивной технологии изготовления, исключающей внесение в конструкцию дополнительной надежности.

13. Учет факторов инженерной психологии при проектировании систем управления.

Общая схема обеспечения высокого ресурса и надежности конструкторскими и технологическими мероприятиями показана на рис.14 (см.вкладку) [6].

5. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УСТРАНЕНИЮ ОТКАЗОВ И ДЕФЕКТОВ ПРИ ДОВОДКЕ ГТД

5.1. Испытания в работе по обеспечению надежности

Испытания – наиболее важное звено программы работ по надежности, требующее самой большой доли затрат средств и труда, выделенных на обеспечение надежности и контроль качества. Отсутствие дефектов и достаточность мероприятия по их устранению могут быть подтверждены, в конечном счете, только испытаниями.

Испытания авиационных двигателей на надежность регламентированы "Нормами летной годности пассажирских самолетов", согласно которым кроме 150-200 ч. длительных стендовых испытаний для проверки минимального ресурса проводятся следующие специальные испытания:

1. Проверка при максимально-возможной температуре газа перед турбиной.

2. Проверка работоспособности турбины при повышенных оборотах.

3. Вибрографи́рование.

4. Тензометрирование лопаток компрессора и турбины.

5. Проверки на забрасывание льда, воды, песка.

6. Проверки газодинамической устойчивости.

Общий комплекс проверок ресурса и надежности двигателя испытаниями определяется схемой, приведенной на рис. 15 (см. вкладку) [6]. Испытания могут планироваться с разрушениями и без разрушений.

Первоначально при создании двигателя проводится комплекс испытаний, обеспечивающий получение данных по параметрам. В дальнейшем эти испытания позволяют установить номинальные значения параметров, отвечающие техническим требованиям, выбрать границы допусков на параметры элементов, узлов и двигателя в целом. Уже на этой ранней стадии получают сведения для оценки надежности и ресурса.

Следующим важным этапом испытаний являются летные испытания. Однако при летных испытаниях внешние условия не регламентируются и воздействуют в комплексе, вследствие чего не всегда удается выделить нужный фактор, поэтому наряду с летными испытаниями проводятся испытания в барокамере, где имитируют нужные для исследования режимы.

При производстве двигателей обязательными являются испытания по контролю качества. Здесь одним из самых сложных является вопрос выбора числа двигателей для испытаний, так как при малом числе выпускаемых двигателей статистически обоснованный объем выборки отсутствует. Такое положение является обычным для ракет, самолетов, двигателей большой мощности, когда производственная продукция за год составляет от 10 до 100 ед. [12]. Объем выборки при этом может изменяться от 1:1 до 1:10. Его значение определяется в зависимости от следующих факторов:

допустимая степень риска; вероятность однородности последующих единиц изделий; производственная возможность изготовления достаточного числа изделий за определенный срок для сдачи заказчику и для испытаний на надежность; стоимость изделий и испытаний.

Могут учитываться и другие факторы как технического, так и престижного характера. Учет всех факторов производится согласно методологии системного анализа. В случае длительного по времени выпуска с малым количеством изготавливаемых изделий иногда исполь-

зается переменный объем выборки. Например, 1:1 для первых 10 объектов, 1:4 для последующих 25 штук и 1:10 для остальных. Примерно по такой методике проводились испытания ТВД НК-12 на гидротормозной установке для определения заявленной мощности. Решение о снижении объема выборки основывается на доказательстве того, что производственный процесс может обеспечить изготовление однородных подобных изделий с желаемым уровнем качества.

Нужно помнить, что риск выпустить некачественное изделие возрастает пропорционально снижению объема выборки.

Испытания по контролю качества проходят в 3 этапа:

1. Испытания в опытном и серийном производстве на заводе.
2. Испытания в месте установки (на самолете).
3. Испытания при эксплуатационном обслуживании и регламентных работах.

Испытаниям в опытном и серийном производстве на заводе подвергается каждое изделие или образцы от партии изделий (например, комиссионные испытания на ресурс). Испытания по контролю качества и надежности могут совмещаться с другими видами испытаний. Во всяком случае, любые испытания используются для получения сведений о надежности и для контроля качества продукции. Необходимо отметить, что для полного успеха этих испытаний и правильности основанных на них заключений, полученные данные должны сопоставляться с результатами летных испытаний. При этом должна быть выявлена взаимосвязь параметров в полете и на земле. Это позволит уточнить методы расчета, выбрать правильные значения параметров, обеспечивающие наиболее благоприятные условия эксплуатации.

Условия испытаний на заводе и применяемое стендовое оборудование отличаются от условий полета и оборудования объекта. Поэтому могут иметь место чисто стендовые дефекты, в ряде случаев дефекты эксплуатации не могут быть воспроизведены в стендовых условиях. При измерениях на стенде и в летных условиях необходимо применять одну методологию и по возможности одну и ту же аппаратуру. Так, для одного из двухконтурных двигателей применение различной виброизмерительной аппаратуры на стенде и объекте длительное время приводило к различным результатам, вплоть до снятия изделий с объекта. В ряде случаев трубопроводы и кабельные трассы, соединяющие двигатель со стендом, отличаются от тех, что установлены на самолете. Этого, по возможности, следует избегать, так как такое положение затрудняет доводку по прочности ряда агрегатов.

5.2. Система работы над дефектами

"Несмотря на разнообразие дефектов и различие физических и химических процессов, обуславливающих их появление, каждый дефект по своей природе не случаен. Установив природу дефекта или неблагоприятное сочетание ряда факторов, приведших к его появлению, можно наметить и осуществить мероприятия, в дальнейшем исключающие возможность его возникновения" [5]. На рис.16 (см. вкладку) [5], приведена схема организации работ по устранению дефектов, применяемая на опытном и серийном заводе. Система работы по надежности включает в себя систему дефектов и систему научно-исследовательских работ (НИР).

Система дефектов служит для устранения дефектов, производственно-технологических отклонений и систематического брака.

Назначение системы НИР: выявление слабых элементов конструкции, недостатков технологического процесса и организации производства до проявления их в виде дефектов; устранение сложных дефектов, требующих длительного времени и привлечения научно-исследовательских институтов; организация и контроль выполнения поисковых, расчетных и экспериментально-исследовательских работ, направленных на исследование и обеспечение работоспособности отдельных элементов конструкции, технологических процессов и их влияния на надежность.

Выявление дефектов начинается в процессе испытания двигателя. На проявившиеся при этом дефекты составляется ведомость, которая после разборки двигателя дополняется вновь обнаруженными дефектами. Затем проводится специальное обсуждение каждого изделия, прошедшего испытания. При этом аппарат ОТК предъявляет дефектные детали конструкторам и технологам для их изучения и выяснения причин дефектов. На основе этого обсуждения составляются специальные программы, проводятся испытания для установления причин дефектов и разрабатываются мероприятия для их устранения.

Дефект записывается в специальную карту, где указаны конкретная служба и конкретный ответственный исполнитель, а также контрольные сроки разработки плана работы по дефекту. Карта утверждается главным конструктором, а мероприятия по устранению дефекта вводятся в программы сборки двигателей. Затем изготавливаются необходимые узлы и детали, которые устанавливаются вместо вышедших

из строя, снова проводится испытание. Таким образом организуется замкнутый цикл по ликвидации дефекта.

Карты на производственно-технологические дефекты открываются также цехам и отделам опытных и серийных заводов.

К производственно-технологическим дефектам относятся:

отклонения от размеров и технических требований, заданных в чертежах и от ТУ, обнаруживаемые на любых ступенях производства; заранее согласованные отклонения, проявившиеся более 3-х раз; недостатки конструкторской и технологической документации, приводящие к дефектам в производстве.

Дефекты открываются совместным решением главного инженера и главного конструктора или их заместителей. Карта дефекта вручается соответствующему цеху, на основе которой разрабатывается план мероприятий. До внедрения мероприятия проходят проверку, объем и сроки которой утверждаются главным конструктором и главным инженером. Составляется заключение об эффективности. После внедрения мероприятий в производство, если в течение 2-х месяцев дефект не проявляется, он закрывается.

Основанием для закрытия дефекта являются: положительная статистика, подтверждающая эффективность внедренных мероприятий; заключение цеха об эффективности проведенных мероприятий; отчет по закрытию дефекта; потеря актуальности (аннулирование детали или режима); перевод в разряд НИР.

Решение о закрытии подписывают главные специалисты, отдел надежности и утверждают главный инженер и главный конструктор.

5.3. Особенности организации работ по устранению дефектов и отказов, проявившихся в опытной эксплуатации и сдерживающих доводку двигателя

Эксплуатационные дефекты открываются на основе документов, поступающих из соответствующих организаций по установленным каналам, а также на основании актов и отчетов по исследованию досрочно снятых двигателей и ведомостей дефектов при разборках двигателей, прошедших эксплуатацию.

По особо важным и серьезным дефектам, которые могут приводить к нарушению безопасности эксплуатации, снижению эффективности, рентабельности, ресурса немедленно выпускается бюллетень по эксплуатирующимся изделиям. Бюллетень может содержать требования: замены узла или агрегата, на которых проявился дефект, внеочередного осмотра узлов в эксплуатации, введения дополнительных проверок при регламентных работах, полная остановка эксплуатации изделий с определенным объемом наработки и т.д. Мероприятия по эксплуатационным дефектам должны внедряться в производство максимально быстро.

Среди дефектов и отказов, проявившихся в ходе стендовой доводки и опытной эксплуатации, может быть выделена группа аварийных дефектов, для которых характерны следующие основные признаки:

1. Внезапная потеря изделием работоспособности, сопровождающаяся разрушением ответственных узлов и деталей, резким возрастанием вибрации, пробоем корпусов, повреждением топливно-масляных коммуникаций, возникновением пожара.

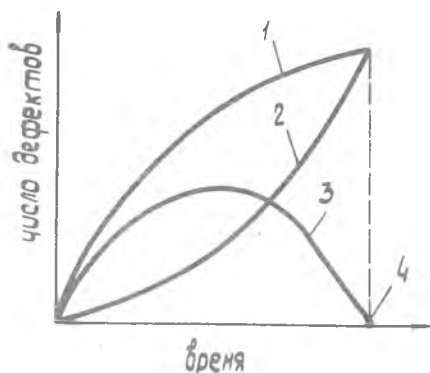
2. Вынужденное прекращение испытания изделия, связанное с серьезными нарушениями в различных процессах и сопровождающееся недопустимыми перегревами и прогарами деталей и узлов, недопустимыми расходами и утечками топлива, масла, газа и воздуха.

3. Невозможность восстановления работоспособности в стендовых условиях после проявления дефекта.

4. Обесценивание частично или полностью результатов длительных, экспериментальных и других испытаний, вследствие необратимой утраты материальной части, имеющей значительную наработку.

5. Возможность нарушения безопасности полета летающей лаборатории или основного объекта. Такой отказ эквивалентен эксплуатационным отказам, приводящим к летному происшествию или отключению двигателя в полете. Устранение этих отказов должно идти вне всякой очереди. Документация на них, как правило, имеет красную полосу.

В каждом конкретном ОКБ и на заводе, в зависимости от типа изделия и местных условий, подобная система может видоизменяться, но основные ее принципы являются общими: своевременность выявления и немедленная информация, обязательный разбор всех отказов и дефектов и стопроцентная их запись, каким бы мелким и, на первый взгляд, случайным не оказался тот или иной дефект. Поэтому должны быть разработаны мероприятия по всем дефектам, на все виды работ регламентированы сроки.



Р и с.17. Динамика устранения дефектов при доводке опытного двигателя: 1—накопленные дефекты; 2—устраненные дефекты; 3—оставшиеся неустраненными дефекты; 4—время предъявления двигателя на государственные испытания

Служба надежности должна постоянно следить за ходом устранения отказов и дефектов и соблюдением принципа индивидуальной и коллективной ответственности. Контроль за работой по устранению дефектов позволяет обоснованно судить об интенсивности отработки изделия и определяет время предъявления двигателя на государственные испытания (рис. 17).

6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

6.1. Роль технологии в обеспечении надежности при производстве

После завершения доводки опытного двигателя организуется его серийный выпуск. Этап производства является важнейшим в деле конкретной реализации (на всем числе выпускаемых двигателей) уровня надежности, достигнутого на опытных образцах. Для обеспечения качества и надежности необходимо строгое соблюдение технологической дисциплины, обеспечение необходимых контрольных операций и испытаний узлов и изделий, своевременное выявление и устранение недостатков.

Высокая технологичность играет важную роль не только в отношении уменьшения стоимости и соблюдения сроков изготовления, она

характеризует также высокую надежность. Опыт показывает, что если производственные трудности и затраты уменьшаются, то надежность растет.

На прочность и надежность оказывает большое влияние технология получения исходных заготовок. Наиболее важными здесь являются следующие элементы: структура материала, способ нагрева при штамповке, режимы и условия термообработки, способы кристаллизации при остывании, возникновение ликвации при отливке, наличие газовых примесей, условия и режимы сварки. Имеют место случаи, когда 4-5кратные запасы прочности уничтожаются погрешностями производства.

Так, для титановых сплавов усталость, ползучесть и длительная прочность весьма сильно зависят от структуры. Очень трудно выдерживать температурные режимы при штамповке, особенно крупногабаритных деталей, так как контроль местных температур не удобен, неудачное расположение печи может приводить к существенной разнородности свойств по детали.

При литье крупных деталей из титановых сплавов может обнаруживаться существенный разброс содержания легирующих элементов по зонам.

Не выдерживание вакуума при отливке, приводящее к повышенному насыщению кислородом, снижает предел выносливости в два раза.

Важную роль в обеспечении качества и надежности на этапе производства играет правильно организованный на всех этапах авторский контроль конструкторов и технологов, активность и управление качеством продукции.

Исследование путей улучшения качества поверхности с целью повышения эксплуатационных свойств деталей и надежности двигателя до недавнего времени ограничивалось рассмотрением методов и условий осуществления последней операции, завершающей технологический процесс обработки детали, так как считалось, что предыдущие операции не влияют на последующие. Таким образом исключалась возможность влияния результатов предшествующих операций технологического цикла на износостойкость, контактную жесткость, усталостную прочность и другие эксплуатационные свойства готовых деталей [14]. В настоящее время доказано существование технологической наследственности. Наследственность проявляется не только после чистовых операций, но может оказывать влияние на изменение свойств или потерю точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия элементов качества поверхности, созданных при ее черновой обработ-

ке. Так, при наличии овальности детали в заготовке окончательная шлифовка уменьшит ее, но не устранит совсем вследствие наличия упругих отжати́й в системе станок-приспособление-инструмент-деталь. Даже если добиться идеальных размеров, то через некоторое время на деталях из овальных заготовок появится овальность, вызванная неравномерным теплообразованием при срезании различного по величине припуска с поверхности детали.

Исследования, проведенные в последнее время, показали, что одинаковые по классу шероховатости детали могут иметь различные эксплуатационные свойства. Это заставляет не ограничиваться контролем последней операции, а анализировать методы обработки. У поверхностей с одинаковой конечной шероховатостью могут быть различные степени наклепа, неодинаковый характер и величина остаточных напряжений, разная степень искажения кристаллического строения и число микротрещин, задиров, разрыхлений. Это, естественно, приводит к разной надежности.

Следует отметить, что сила воздействия различных технологических операции на последующие, неодинакова. В роли "барьера" наиболее существенными выступают термические операции (закалка, отпуск, отжиг, нормализация) и упрочняющие (обкатка роликами, шариками, обдувка дробью, алмазное выглаживание и т.п.).

Важное влияние на надежность имеет строгое выдерживание допустимого температурного режима при механической обработке, в частности, недопущение прижогов, так как структурные превращения при этом могут проникать в зону, превышающую по глубине величину припуска на последующую обработку.

Точность обработки оказывает существенное влияние на долговечность и надежность работы деталей и изделия в целом. Например, некруглость и нецилиндричность могут в несколько раз уменьшить фактическую опорную поверхность сопрягаемых деталей. Применение в подшипниках более точных шариков повышает долговечность подшипников на 30%.

Значительное влияние качества поверхности на усталостную прочность обуславливает влияние технологической наследственности на долговечность. Известно, что усталостная прочность образцов ст. 45, испытанных как в воздухе, так и в поверхностно-активной среде, зависит от вида токарной обработки, предшествующей шлифованию. Установлено, что методы предварительной обработки в значительной степени определяют величину контактной прочности.

Технологическая наследственность оказывает влияние также на коррозионную стойкость и контактную жесткость.

Отсюда следует вывод, что на эксплуатационные свойства и надежность оказывает влияние вся совокупность технологических операций, в связи с чем встает сложная задача наиболее рационального сочетания отдельных операций, обеспечивающих необходимый уровень качества и надежности в производстве.

Поскольку факторы, влияющие на надежность в процессе производства, в большинстве случаев действует не явно, весьма важно, чтобы каждый работник на производственном участке постоянно следил за обеспечением надежности. Для этого должна вестись большая воспитательная работа, направленная на повышение качества, о чем будет изложено в главе, посвященной управлению качеством продукции.

Технические руководители и организаторы производства должны обеспечить соответствие квалификации рабочего выполняемой работе, создать условия строгого выполнения технологии. Предложения по изменению технологии должны обязательно быть проверены с точки зрения их влияния на надежность. Сокращение трудоемкости зачастую находится в противоречии с требованиями обеспечения надежности. Постановка лопаток турбины в пазы диска производится путем последовательного осаживания лопаток по кругу ударами деревянного молотка по ее хвостовику. Сокращение вдвое числа проходов повышает при этом максимальные напряжения в замках лопаток почти в 4 раза.

Непосредственные исполнители должны своевременно извещать руководителей о разладке оборудования, изменении условий его работы, особенно по параметрам, не регламентированным технологией.

6.2. Обеспечение надежности в эксплуатации

Уровень надежности авиационной техники оказывает большое влияние на стоимость ее эксплуатации.

Хотя число отказов двигателей составляет 10-20% от общего числа отказов, выявляемых на самолете, они приводят к более тяжелым последствиям, чем отказы приборного оборудования и других бортовых систем.

Поддержание качества и надежности при эксплуатации обеспечивается пунктуальным выполнением инструкций и наставлений по эксплуатации, точной и своевременной информацией об отказах и неисправностях, своевременной корректировкой эксплуатационной документации и оперативной оценкой качества и надежности эксплуатируемых двигателей.

Специфические факторы, снижающие надежность в эксплуатации, связаны с постепенным износом и снижением запасов длительной прочности, состоянием взлетно-посадочных полос аэродромов, что приводит к перегрузкам при посадке, попаданию посторонних предметов и пыли в тракт и маслосистему, и, как следствие, снижению запаса устойчивости и повышенному износу подшипников, резкому изменению температур и направлений потоков.

Надежность в эксплуатации поддерживается системой плановых профилактических работ, выполняемых в сроки, регламентируемые технической документацией, тщательным проведением предполетных осмотров и проверок. Внедрение целого ряда новых приборов и средств контроля состояния двигателя позволяет перейти от эксплуатации двигателей только в пределах установленного ресурса к эксплуатации "по состоянию". Для реализации этой возможности необходимо, чтобы двигатель обладал достаточной контролепригодностью, общие технические требования к которой регламентированы ОСТ - 100788-75. Применение средств контроля позволяет своевременно выявлять повреждения и отказы отдельных элементов, узлов и систем и принимать меры по устранению причин их появления. Для полной диагностики и прогнозирования технического состояния системы необходимо применять весь комплекс методов и средств контроля с использованием штатных бортовых средств, встроенных средств контроля, бортовых регистраторов (аварийных и эксплуатационных), наземной контрольно-поверочной и специальной диагностической аппаратуры, визуального контроля. В числе применяемых средств контроля авиационной техники особо важное место занимает система бортовой регистрации параметров в полете [4]. Применяемые магнитные регистраторы позволяют фиксировать более ста параметров в течение всего полета. Некоторые данные по регистраторам приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Самолет	Марка регистратора	Регистрируемые параметры (к-во)		Количество контролируемых событий			Время обработки 1-го часа записей	Примечание
		непрерывные	дискретные	всего	по пилотированию	по работе систем		
ТУ-154	МСРП-64	38	53	185	82	103	5 мин	Внедрено в эксплуатацию
ИЛ-62	"	40	30	142	80	62	"	Внедряется
ИЛ-62М	"	40	30	139	80	59	"	" "

7. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ *

7.1. Качество продукции

В обеспечении надежности важнейшая роль принадлежит качеству продукции.

Качество продукции – совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Показатель качества продукции – количественная характеристика свойств продукции, входящих в состав ее качества, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления.

Уровень качества продукции – относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении совокупности показателей ее качества с соответствующей совокупностью базовых показателей.

Качество продукции должно нормироваться и планироваться. Важнейшими задачами планирования являются определение наиболее эффективных направлений и темпов повышения качества продукции, достиже-

* В работе над данной главой автору существенную помощь оказали т.т. Ильинский А.В., Гудин В.Б., Гуревич Н.Я.

ние и превышение уровня лучших отечественных и зарубежных изделий, создание новых, более прогрессивных видов изделий.

Для обеспечения достижения запланированного уровня качества разрабатываются планы:

- по стандартизации и унификации;
- по освоению новой продукции и прогрессивных образцов;
- по подготовке к аттестации и выпуску продукции высшего качества.

Важнейшие мероприятия, обеспечивающие выполнение этих планов:

- опытно-конструкторские работы и организационно-технические мероприятия, направленные на повышение качества продукции;
- совершенствование техники (оборудования) и технологии производства - контроль и корректировка действующих и внедрение прогрессивных технологических процессов, машин, оборудования, оснастки, обеспечивающих улучшение качества продукции;
- повышение требований к качеству поставляемых комплектующих узлов, деталей, материалов;

заказы научным, проектным и конструкторским организациям на проведение исследований и опытно-конструкторских работ по повышению качества;

улучшение и обновление технической документации;

регламент контроля за соблюдением технологической дисциплины, обеспечение производства метрологическим обслуживанием, контрольно-измерительным и испытательным оборудованием.

Планирование этих мероприятий имеет целью обеспечение их обязательного выполнения.

В нашей стране для успешного решения сложной и важной задачи повышения качества продукции имеются все необходимые объективные условия: высокий уровень развития науки и техники, огромные возможности советской промышленности, наличие высококвалифицированных кадров. Наконец, сама природа социалистического строя, общественная собственность на средства производства и планомерное, пропорциональное развитие всего народного хозяйства позволяют создать единую систему управления качеством на государственном уровне.

В Отчетном докладе ЦК КПСС XXV съезду партии отмечалось, что на повышение качества продукции должен быть направлен весь механизм планирования и управления, вся система материального и мораль-

ного поощрения, усилия инженеров и конструкторов, мастерство рабочих. "... Усилия нашей партии и всего народа, — подчеркивал т. Л.И.Брежнев в речи на торжественном заседании в Баку в сентябре 1978 г., — направлены сейчас именно на повышение качества".

Если раньше вопросы создания качества решались изолированно на всех этапах создания изделий, а заключительной операцией выступал контроль качества, который констатировал достигнутый уровень, то теперь ставится и решается задача системного подхода, направленная на комплексное управление созданием качества на всех этапах: от материалов и проекта — до изделия.

7.2. Основные понятия управления качеством *

Управление качеством продукции — установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации или потреблении, осуществляемые путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество продукции.

Параметр продукции — количественная характеристика одного из свойств продукции.

Уровень качества количественно планируется по показателям или коэффициентам. Здесь на разных предприятиях действуют разные системы.

Показатель однородности продукции — количественная характеристика рассеивания параметров или показателей качества продукции данного вида.

Объекты управления качеством продукции — управляемые процессы, влияющие на качество выпускаемой продукции и на эффективность ее эксплуатации.

Управляющие органы — организации, группы лиц, исполнители, а также автоматические устройства, вырабатывающие управляющие воздействия.

Управляющие воздействия — решения (команды), реализуемые при управлении процессами формирования качества.

В отличие от регулирования процессы управления характеризуются прежде всего творческой, эвристической деятельностью по при-

* ГОСТ 15467-70 и 16430-70

нению решений в альтернативных ситуациях, в условиях информационной недостаточности, при отсутствии готовых программ, алгоритмов, инструкций для ответов на реакцию системы.

Понятие управления качеством включает:

планирование – обоснованный выбор показателей качества и определение их оптимального уровня;

обеспечение – реализация мероприятий, гарантирующих достижение запланированного уровня качества;

контроль – проверка достигнутого уровня и сравнение его с запланированными оптимальными показателями качества.

Следует отметить, что в вопросах управления качеством главная роль принадлежит людям. Именно этим определяется та огромная работа, которую проводит КИСС в борьбе за повышение качества и эффективности.

Активная организаторская работа руководителей, ответственность и высокая квалификация исполнителей, их способности, их права и желание ими пользоваться, честное выполнение обязанностей обеспечивают высокое качество продукции. Любые организационные системы только помогают в этом и создают необходимые условия и предпосылки. Одним из важнейших управляющих воздействий является экономическое стимулирование качества продукции, которое направлено на создание условий, заинтересовывающих объединения и предприятия в производстве высококачественной продукции и ускоренном ее обновлении. Оно включает:

компенсацию дополнительных затрат, связанных с повышением качества или освоением новой продукции, соответствующей высшим достижениям отечественной и зарубежной техники;

образование фондов материального стимулирования в зависимости от уровня показателей качества;

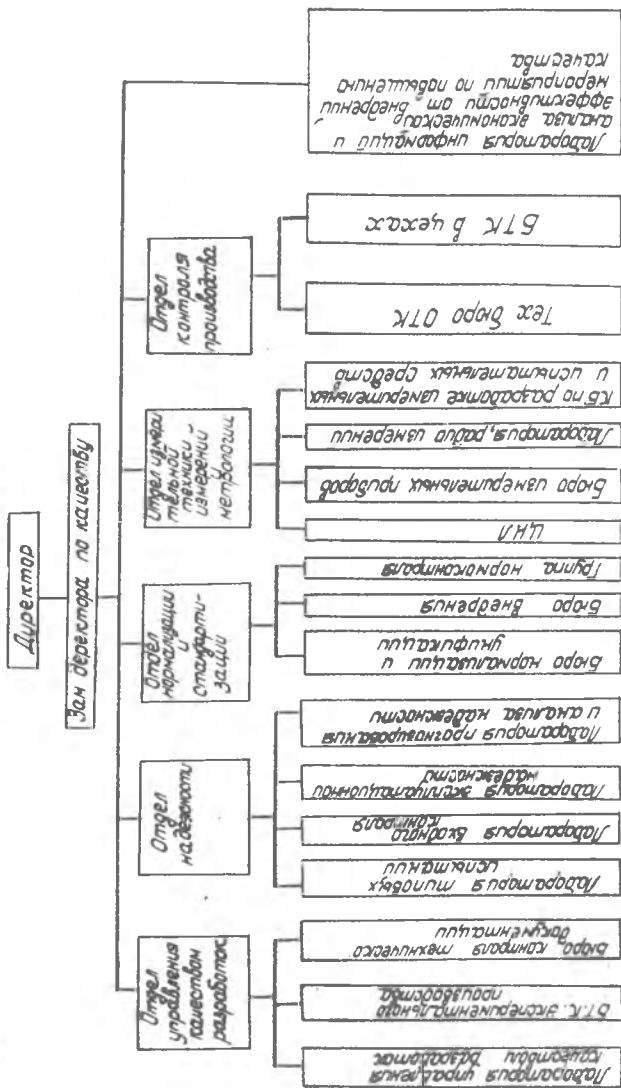
систему надбавок и скидок к цене продукции разного качества;

систему экономических санкций за изготовление и поставку продукции, не соответствующую ГОСТу и ТУ. Материальное поощрение нацелено на заинтересованность работников и предприятий.

7.3. Организация управления качеством продукции

Единая система управления качеством строится как замкнутый контур со следующими основными элементами:

Служба управления качеством



Р и с. 18. Схема организации управления качеством

планирование уровня качества, оценка информации о его фактическом уровне и сравнение с плановым;

определение форм управляющих воздействий, направленных на достижение заданного уровня качества и оценка их эффективности;

моральное и материальное стимулирование коллективов и исполнителей в зависимости от эффективности работы по обеспечению высокого уровня качества продукции.

Основными регламентирующими документами системы при этом являются стандарты предприятия (СТП), которые определяют организационную, техническую и юридическую основу системы. Развитие единых систем и служб управления качеством продукции, проходившее на передовых предприятиях, имеет определенную историю.

широкую известность получили такие системы, как Саратовская система бездефектного труда, Горьковская система КАНАРСПИ, Рыбинская система НОТНУ, Ташкентская СОВОКУРИОН, Днепропетровская КСУКП, система управления качеством Автозил, Львовская система, система прославского моторного завода и другие. Все системы базируются на совокупности технико-экономических, административных и организационных мероприятий, проводимых на всех этапах формирования качества.

Задача организации деятельности по управлению качеством обычно возлагается на ОТК. Однако структура ОТК, соответствующая традиционной направленности их деятельности (контролю), ограниченный штат работников и отсутствие специалистов по системному анализу не позволяет решать весь комплекс вопросов, возлагаемых на них задачами управления качеством. Ряд задач решается отделами надежности, стандартизации, метрологии и др., но их деятельность во многих случаях не скоординирована.

Необходимость управления качеством, а не только регистрация уровня его показателей, требует предоставления соответствующих прав лицам, реализующим это управление. Это выражается конкретно в том, что службы управления качеством возглавляются заместителем директора предприятия, имеющим соответствующие права и аппарат для управляющих воздействий на всех этапах создания качества. Одна из возможных схем управления качеством приведена на рис. 18 [7].

Работу по организации управления качеством рассмотрим на примере одного из предприятий. Работа ведется на основе комплекса стандартов предприятия (СТП).

Главными задачами системы управления являются:

определение и уточнение требований к качеству и надежности изделий и процессов их создания на основе систематического изучения опыта и достижений отечественной и зарубежной науки;

планирование уровня качества и надежности;

разработка мероприятий для достижения запланированного уровня качества;

контроль за внедрением мероприятий и анализ результатов внедрения;

получение и регистрация информации о качестве и надежности на всех этапах;

анализ информации, разработка и внедрение методов анализа;

внедрение автоматизированных систем сбора и обработки информации о качестве и надежности изделия и процессов их создания.

Система состоит из ряда подсистем, деятельность которых определяется соответствующими стандартами:

управление качеством и обеспечение надежности разработок (проектирования);

управление при создании и производстве (конструкторско-технологическая доводка);

управление качеством и надежностью по результатам эксплуатации;

авторский надзор в серийном производстве;

управление качеством труда рабочих и ИТР на всех этапах производства.

В структуру службы управления качеством наряду с другими отделами входят отдел управления качеством и отдел производственно-технологической надежности.

Отдел управления качеством состоит из бюро анализа качества и бюро управления качеством. Бюро анализа качества организует сбор, обработку информации и анализ данных по следующим направлениям: брак в производстве; отступления от конструкторской документации; отказы и неисправности при стендовой доводке.

На основании анализа подсчитывается показатель относительно количества отступлений от документации и коэффициент, показывающий эффективность мер по снижению количества отступлений.

Бюро организует контроль за правильностью использования подразделениями завода направляемых им ежемесячных сводок о качестве

и принятия руководителями подразделений координирующих воздействий по выявленным недостаткам.

Бюро управления качеством проводит:

исследование и анализ системы управления качеством, планирование ее развития, разработку основополагающей нормативно-технической документации по управлению качеством;

оперативное планирование качества продукции и качества труда по подразделениям завода;

контроль за функционированием системы управления качеством продукции, ее организационно-техническое обеспечение (выпуск документации, проведение семинаров и конференций по управлению качеством, проведение учебы и аттестации кадров);

координацию и методическое руководство работами по созданию и внедрению стандартов предприятия по управлению качеством;

анализ и постановку задач по разработке комплексной автоматизированной системы управления качеством.

Отдел производственно-технологической надежности выполняет следующие функции:

проводит методические разработки и выпускает необходимую техническую документацию по вопросам производственно-технологической надежности и качеству;

учитывает отказы и дефекты, возникающие по производственно-технологическим причинам;

участвует в разработке мероприятий по повышению качества и ликвидации недостатков;

проводит сбор и анализ статистики;

контролирует выполнение мероприятий по производственно-технологической надежности.

Оценка качества продукции в производстве производится в соответствии со стандартом предприятия, который устанавливает: методику подсчета коэффициентов качества продукции и оценок работы подразделений, перечни показателей качества продукции, порядок планирования показателей качества продукции, величины снижения коэффициента качества продукции по показателям качества, формы отчетности по качеству.

Интегральный коэффициент качества подсчитывается ежемесячно по следующей формуле

$$K_{18} = 1 - (0,05M + 0,02P + 0,02E + \alpha + 0,04D + 0,5Л + 0,04C + 0,01Ц + 0,2B + 0,3У + \delta + 0,03H + 0,75П + П_8 + П_7 + П_{св.л} + 0,01л + 0,1К),$$

где M - количество брака, превышающего нормативный процент,

$$M = \frac{Б_{факт} \% - Б_{план} \%}{0,1\%},$$

- P - показатель, характеризующий сдачу ОТК продукции с первого предъявления, $P = P_1 - P_2$;
- P_1 - плановый процент сдачи продукции с первого предъявления;
- P_2 - фактический процент сдачи с первого предъявления (если $P_2 > P_1$, то он в расчете принимается равным P_1);
- E - тот же показатель что и P при сдаче продукции заказчику;
- α - снижение (по решению главного контролера) коэффициента качества за возврат продукции от цехов потребителей, невыполнение требований технической документации, прочие упущения ($\alpha \leq 0,1$);
- D - количество отклонений в картах отклонений, сделанных по вине подразделения сверх установленной нормы;
- $Л$ - число случаев съема изделий с испытания по вине цеха;
- C - количество вынужденных остановок производства по вине цеха;
- $Ц$ - количество дефектов стандового оборудования сверх установленного норматива;
- B - количество случаев перепутывания материала;
- $У$ - количество случаев брака сборочных работ или скрытых дефектов механических цехов, приведших к вынужденным переборкам изделий в сборочных цехах или на испытательной станции;
- δ - коэффициент, учитывающий случаи массового брака ($\delta \leq 0,2$). Снижение производится по решению главного контролера;
- H - количество невыполненных пунктов планов мероприятий по качеству;

- Π - потеря качества продукции для деталей механического производства;
- Π_1 - потеря качества для стального литья;
- Π_2 - потеря качества при термообработке и гальванических операциях;
- $\Pi_{свп}$ - потеря качества для деталей, изготовленных с применением сварки и пайки;
- Π - показатель относительного количества отклонений

$$\Pi = \Pi_1 - \Pi_2$$

- Π_1 - фактическое количество отклонений от конструкторской документации;
- Π_2 - плановый уровень допустимого числа отклонений ($\Pi_2 \ll \Pi_1$);
- K - количество обнаруженных случаев брака по вине сборочного цеха или испытательной станции.

Таким образом, коэффициент включает в себя 18 показателей, каждый из которых воздействует с определенным весом на снижение интегрального коэффициента качества. Значения показателей и весовых коэффициентов определены на основе анализа статистики работы, т.е. от достигнутого уровня.

Интегральный коэффициент качества прямо связан с уровнем премирования и влияет на подведение итогов социалистического соревнования по подразделениям.

Планирование показателей качества - один из главных элементов управления качеством продукции. Планируются нормативы по следующим показателям:

- брак в % к валовой продукции, произведенной цехом;
- процент продукции, сданной с первого предъявления ОТК и заказчику;
- количество дефектов по стендовому оборудованию;
- потеря качества по количественной оценке;
- количество пунктов отклонений от технической документации по вине цеха.

7.4. Количественная оценка качества в производстве

Количественная оценка качества продукции рассмотрена на примере оценки отклонений от конструкторской документации и брака, При-

чем отклонения от конструкторской документации рассмотрены как по количеству допущенных отклонений, так и по грубости этих отклонений с учетом технологической сложности изготовления.

Детали и узлы по качеству разделяются на две группы: годные (подлежащие выпуску), т.е. отвечающие требованиям конструкторской документации и допущенные по картам отклонения, и бракованные, подлежащие исправлению или изъятию.

Детали, имеющие отступления, влияющие на прочность или работоспособность, подлежат браковке. На отклонения, не имеющие существенного влияния на прочность и работоспособность, по совместному решению начальника БТК цеха и соответствующей конструкторской бригады выписывается карточка отклонения. Решение о допуске такой детали в производство принимается комиссией в составе главного конструктора и соответствующих главных специалистов.

В карте отклонения записывается характеристика отклонения и указываются его конкретные виновники. Одновременно с заполнением карты отклонений цеховые комиссии дают задание на разработку мероприятий по их устранению.

В раздел "Характеристика отклонений" условным шифром записывается вид обработки и причина отклонения. Для этого разработаны специальные классификаторы. Так, перечень причин отступления от конструкторской документации включает 84 причины, разбитых на 7 групп:

- конструкторской документации,
- производственно-технологической документации,
- обеспечения материалами,
- обеспечения оборудованием, оснасткой, энергией,
- при непосредственном исполнении,
- организации рабочего места и производства,
- при сборке деталей, узлов и изделия.

Например, чертежный размер $524 \pm 0,06$, выполнен фактически 523,92 (Т - 59).

Здесь Т - отклонение, сделано при токарной обработке;

59 - шифр причины - небрежность при исполнении.

Стандартом предприятия определены следующие формулировки в разделе "Заключение": пропустить; пропустить на внутризаводские испытания; пропустить на экспериментальные испытания.

Номер чертежа 320-4-08 Наименование Корпус		Карта статистики											
Номер изделия		Ц-1	Ц-7	А-2	А-8	Х-10	У-3	У-4	А-10	Х-Ц	У-5	У-6	А-12
Номер документа Дата		В10319 V-75	К9517 V-75	К5862 VI-75	А8130 VII-75	А3716 VIII-75	А4212 VIII-75	С335 X-75	К2417 X-75	К2420 XI-75	К2480 I-76	А4050 I-76	А8010 II-76
Элемент конструкции		Фактические значения отступлений											
1	Зазор в сть.каж. $0,2 \pm 0,2$	0 ± 1,1	0,1 - 0,4			0,05 - 0,8		0 - 0,19			0,1 - 0,8	0,08 - 0,75	
2	Проходное сечение 1756 ± 88	1787,1	1796,2	1759,0	1755,4								
3	Напряг по стопкам $0,005 - 0,017$	3,0,01	H=0,02	3-0,09	3-0,01						H=0,001		
4	R = 9	R=7											
5	$\varnothing 10 \pm 0,016$ в сеч А-А	10,01 ± 0,1											
6	Стенка $4,5 \pm 0,2$								4-4,1				
7	Буение $\varnothing 362,5 \text{ отн } \varnothing M-02$									0,4			

Этот раздел дополняется разделом "Указания для сборки", где могут содержаться указания о допуске только на первую сборку, только на сдаточные испытания и т.п.

Номер карты отклонения наносится на деталь в месте постановки клейма ОТК. Карты отклонения от БТК цехов поступают в отдел управления качеством продукции, где регистрируются и проводится проверка правильности подсчета количественной оценки качества и определения причин отклонения.

Данные заносятся в карту статистики. Карты статистики заводятся для каждой детали и узла (рис. 19). Отдельно ведется учет по количеству отступлений на типовые элементы, которые представляют собой стандартизованные или нормализованные виды соединений или наиболее часто встречающиеся элементы конструкции, изготавливаемые определенным методом. Существует специальный перечень таких элементов.

Показатель относительного количества отступлений вычисляется по формуле:

$$n = \frac{\sum_i \alpha_i}{B} 1000,$$

где $\sum_i \alpha_i$ - сумма отступлений за отчетный период;
 B - товарная продукция подразделения за отчетный период, нормо/час.

1000 - коэффициент приведения.

Каждому подразделению устанавливаются нормативы относительного количества отступлений, за превышения которого снижается коэффициент качества K_{78} .

При повторении отклонения три раза открывается дефект цеху, а свыше 8 раз - также отделу ОКБ, ОГТ и ОГМет.

На основании карт отклонений составляется сводка по цехам и заводу в целом по причинам возникновения отклонений (в процентах к общему числу).

Отделом управления качеством составляется сводная информация и анализ отклонений, которые направляются главному контролеру для ежемесячного доклада на совещании у директора, а также главному инженеру, главному технологу, начальникам цехов. По картам отклонений, вызванных недостатками в конструкторской документации, сводная информация направляется ОКБ.

Отдел управления качеством ведет график показателя эффективности принятых мер по отклонениям ($K_{эфф}$.)

$$K_{эфф} = \frac{n_{лр}}{n_{тек}},$$

где $n_{лр}$ - средний показатель за текущий и предшествующий месяцы;

$n_{тек}$ - средний показатель за три предшествующих месяца.

Показатель эффективности принятых мер включается в анализ отклонений.

Количественную оценку качества по грубости допущенных отклонений рассмотрим на примере оценки по геометрическим параметрам при механической обработке.

Для количественной оценки на основании чертежа детали определяется число геометрических параметров n_j , которые распределяются по пяти условным классам точности.

Вводятся коэффициенты приведения q_i , которые представляют собой эквиваленты сложности, показывающие во сколько раз сложность геометрического параметра i -го условного класса точности σ_i больше сложности 9 класса точности по таблице допусков.

$$q_i = \frac{\sigma_{макс}}{\sigma_i} = \frac{9}{\sigma_i}.$$

Производственная сложность определяется по формуле

$$C_{лр} = \sum_{j,i} q_i n_j.$$

Рассчитывается коэффициент ε , учитывающий грубость дефекта

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta}{\Delta_1}\right)^2,$$

где Δ - наибольшая часть погрешности, выходящая за пределы допустимых отклонений;

Δ_1 - чертежный или табличный допуск на параметр.

Тогда потеря качества определяется по уравнению

$$П_q = \sum_{i,j} q_i \varepsilon m,$$

где m - количество геометрических параметров i -го класса, выполненных с отклонениями.

Коэффициент потери качества

$$K_Q = 1 - \frac{\Pi_Q}{C_{np}}$$

Показатель потери качества определяется как

$$\Pi_H = \frac{1000 \sum \frac{\Pi_Q}{C_{np}}}{T_{вал}}$$

где $T_{вал}$ - объем валовой продукции цеха за месяц, нормо-час.

Аналогичным образом вычисляются показатели потери качества по другим технологическим операциям: литью, сварке, пайке и т.п.

Данные по количеству параметров и сложности рассчитываются технологами цехов на основании отклонений, зарегистрированных БТК. Остальные параметры вычисляются в бюро анализа качества.

При допущении брака составляется акт, который БТК цехов передают в отдел управления качеством, где проверяется правильность их заполнения, подсчет нормо-часов, определение причин согласно классификатора. Акт сдается в производственную бухгалтерию. Составляется сводка по браку в рублях по числу случаев и в нормо-часах по каждому цеху и заводу. Талон акта о браке направляется для подсчета качества по рабочим и мастерам в отдел управления качеством.

7.5. Обеспечение качества и оценка надежности особо важных производственных процессов

К особо важным производственным процессам относятся процессы изготовления составных частей изделия и изделия в целом, по которым в конструкторской документации специально выделены конструктивные элементы и параметры, определяющие надежность (КЭПОН).

Сущность работы по КЭПОН заключается:

- а - в обеспечении надежности выполнения конструктивных элементов и параметров путем устранения или уменьшения отрицательного влияния технологических процессов (технологической наследственности) и назначения рабочих характеристик производственно-технологических факторов (ПТФ), отдаленных от граничных значений, т.е. назначения запасов;
- б - в оценке надежности производственных процессов по наличию и величине запасов по ПТФ;

в - в выявлении критических производственно-технологических факторов (КПТФ), относительно пунктов а и б.

Для обеспечения и оценки надежности особо важных производственных процессов должен быть проведен комплекс работ, включающий: исследование производственных процессов;

учет КЭПОН по конструкторской документации и анализ их значений;

регулярную проверку технологического процесса на соответствие конструкторской документации;

регулярную проверку исполнения требований Документации технологического процесса на рабочих местах;

учет и анализ отказов и неисправностей изделий по производственно-технологическим причинам;

устранение выявленных недостатков;

составление заключения с оценкой надежности производственного процесса в целом.

Перечень КЭПОН на основании конструкторской документации составляет технологическое бюро цеха. Один экземпляр перечня направляется в отдел производственно-технологической надежности.

Для обеспечения и контроля качества КЭПОН в технологической документации и непосредственно в производственном процессе должны быть заданы операции и ПТФ в них, гарантирующие стабильность значений КЭПОН в заданных пределах и исключающие отрицательное влияние методов обработки и условий их выполнения. При наличии отрицательных влияний должны быть назначены операции, компенсирующие или уменьшающие до допустимых значений недостатки основных операций. Должны быть обеспечены рабочие характеристики с технологическими запасами относительно граничных значений.

При исследовании производственного процесса обосновывается достаточность назначения операций, где обеспечивается и контролируется качество КЭПОН и устраняется или компенсируется отрицательное влияние методов обработки, определяются запасы и заградительные значения по главным производственно-технологическим факторам (ПТФ).

Исследование процессов проводится в следующих случаях:

при изготовлении впервые изделия или его составных частей на данной производственной базе;

при перерыве в производстве более одного года;

при изменении состава и значений КЭПОН;
при изменении технологических и производственных процессов,
приводящих к изменению состава и значений ПТФ.

В производственных подразделениях ведется учет результатов
контроля КЭПОН.

В тех случаях, когда сущность КЭПОН выражена качественно или
условия контроля не позволяют произвести количественной оценки,
то по таким КЭПОН фиксируют наличие или отсутствие замечаний.

По каждому отказу, дефекту и отступлению по КЭПОН главные
специалисты и руководители подразделений принимают меры, исклю-
чающие их повторение. На базе проведенных исследований оформляется
заключение о надежности производственного процесса в целом.

Для обеспечения надежности выполнения КЭПОН из ПТФ выделяются
ПТФ. Признаком, выделяющим ПТФ, является предположительное
или установленное влияние ПТФ на обеспечение и сохранность требуе-
мого качества выполнения КЭПОН. По каждому ПТФ определяются гра-
ничные значения на основании данных технической литературы, иссле-
дований или по нормативной документации. Номинальное значение ПТФ
(А_{ном}) выбирается таким, при котором получается наилучшее значе-
ние выходного параметра. При отсутствии таких данных номинальное
значение устанавливается как среднеарифметическое граничных зна-
чений

$$A_{ном} = \frac{A_{макс} + A_{мин}}{2} .$$

Для обеспечения непревышения уровня граничных значений техно-
логического процесса устанавливаются заградительные значения
ПТФ (В), которые обеспечивают компенсацию суммарных погрешностей
($\sum \Pi$) с определенным дополнительным запасом (3σ).

Дополнительный запас назначается:

$$\text{верхний } 3\sigma_B \geq z (A_{макс} - A_{ном}),$$

$$\text{нижний } 3\sigma_B \geq z (A_{ном} - A_{мин}),$$

где $z \geq 0,05$.

Тогда верхние и нижние заградительные значения определяются
по формулам:

$$B_{макс} = A_{макс} - \sum \Pi_B - 3\sigma_B ;$$

$$B_{мин} = A_{мин} + \sum \Pi_B + 3\sigma_B .$$

Для экстремальных значений ПТФ определяется относительный показатель запаса надежности K по формуле

$$K = \frac{A_{\max} - A_{\text{ном}}}{B_{\max} - A_{\text{ном}} + \sum \Pi}$$

для несимметричных граничных значений K может быть подсчитан и для нижних заградительных значений. С учетом приведенных формул

$$z = \frac{A_{\max} - B_{\max} + \sum \Pi}{A_{\max} - A_{\text{ном}}},$$

а

$$K = \frac{1}{1 - z}.$$

В случае проектируемых вновь технологических процессов z следует выбирать таким, чтобы K было больше единицы. При $K > 1$ производственные процессы надежны, при $K = 1$ дополнительные запасы отсутствуют, но процесс может считаться надежным, если он достаточно совершенен и изучен. В случае отсутствия запаса $K < 1$ процесс не надежен.

При проверке действующих технологических процессов если $B_{\max} + \sum \Pi > A_{\max}$, z имеет отрицательное значение и K будет меньше единицы, а проверяемый процесс оказывается ненадежным. Рассмотрим пример.

Задан КЭПОН: механические свойства детали из магниевом сплава $\sigma_B \geq 20 \text{ кг/см}^2$ и $\delta \geq 4\%$. Одним из ПТФ является температура расплава.

Опытными работами установлены граничные значения:

$$A_{\max} = 810^\circ\text{C}, \quad A_{\min} = 750^\circ\text{C}.$$

Превышение A_{\max} ведет к газонасыщению сплава и интенсивному выгоранию легирующих элементов.

При температуре ниже A_{\min} при заливке образуются дефекты: раковины, пустоты и т.п.

Номинальное значение

$$A_H = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} = 780^\circ\text{C}.$$

Известны погрешности при замере температуры расплава термопарой, включенной в прибор МЩПР-54.

$\sigma_1 = 1,5^\circ\text{C}$ - погрешность термопары, определенная при тарировке.

$\sigma_2 = 10^\circ\text{C}$ - погрешность МЩР-54 согласно паспортных данных.

σ_3 - погрешность снятия отсчета со шкалы прибора. Принимаем ее равной 1/3 деления шкалы.

$$\sigma_3 = 0,3 \cdot 10^\circ = 3^\circ\text{C},$$

$$\sum \Pi = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 10,5^\circ\text{C}.$$

Назначим дополнительный запас надежности $Z = 25\%$, тогда

$$3_d = 0,25 (A_{\text{макс}} - A_n) = 7,5^\circ\text{C}.$$

Вычислим заградительные значения

$$B_{\text{макс}} = A_{\text{макс}} - \sum \Pi - 3_d = 792^\circ\text{C},$$

$$B_{\text{мин}} = 768^\circ\text{C}.$$

Определим допустимое отклонение от заградительного значения

$$O_3 = B_{\text{макс}} - A_n = 792^\circ - 780^\circ = 12^\circ\text{C}.$$

Устанавливаем требование к ПТФ (температуре расплава) - $780 \pm 12^\circ\text{C}$

Исходя из требований надежности, может быть введено понятие критических производственно-технологических факторов (КПТФ).

Основными признаками КПТФ являются: отсутствие установленных граничных значений ПТФ, величины суммарной погрешности или ее составляющих, отсутствие запаса надежности относительно граничных значений, наличие отрицательного влияния ПТФ операций, следующих за основной, на стабильность КЭПОН, отрицательного влияния технологической наследственности операций на основную функцию изделий, невозможность практического выполнения заградительных значений, возможность отрицательного субъективного влияния исполнителя, отсутствие объективного контроля КЭПОН, несовершенство производственного процесса, систематическое несоблюдение требований конструкторской документации.

По всем КПТФ принимаются специальные решения по устранению недостатков.

Результаты исследования технологического процесса отражаются в "Карте надежности". Карту разрабатывает технолог при участии

мастера и представителей отдела производственно-технологической надежности. Карта согласовывается с главными специалистами и утверждается главным инженером. Операции, рассмотренные в карте, обозначаются в маршрутной и технологической документации индексом ОВО - особо важные операции.

Рассмотренный подход позволяет для любых вариантов задания двух предельных граничных условий вычислить для ППТФ заградительные значения и относительный показатель запаса надежности.

Л и т е р а т у р а

1. Г у м б е л ь Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965.

2. К о с т и н В.И. Диагностика стабильности производства и эффективности конструкторско-технологических мероприятий на базе обобщенной статистики виброизмерений. - Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Межвуз. сб., вып. I (68), Куйбышев, 1975.

3. К о с т о ч к и н В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. М.: Машиностроение, 1976.

4. К о с т о ч к и н В.В., С п о р я г и н а Н.М. Анализ и оценка надежности авиационных двигателей на этапе проектирования. Уч. пособие. М.: МАИ, 1978.

5. К у з н е ц о в Н.Д. Дальнейшее повышение технического уровня, экономичности и надежности изделий - важнейшая народнохозяйственная задача. - В кн.: Пути повышения качества продукции. Материалы областной научно-технической конференции по качеству. Куйбышевское кн. изд-во, 1976.

6. К у з н е ц о в Н.Д., Ц е й т л и н В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976.

7. Д о й к о Л.В. Управление качеством продукции в отрасли. Методическая разработка. М.: Изд-во уч.центра НИАТ, 1976.

8. Методы количественной оценки и обеспечения надежности. Материалы ЕОКК. Сессия IV. М.: Изд-во Стандартов, 1972.

9. Надежность изделий авиатехники. Общие требования к комплексной программе обеспечения надежности, ГОСТ 20436-75.

10. Общие требования к программе обеспечения надежности промышленных изделий. Методика Гос.ком.стандартизации, ВНИИ Стандарт, М., 1976.

11. Справочник по климату СССР. Гидрометеоиздат, Ленинград, вып. 18, 24, 1967.

12. Справочник по надежности, т. 1,2,3. М.: Мир, 1969.

13. Х е в и л е н д Р. Инженерная надежность и расчеты на долговечность. М.-Л.: Энергия, 1966.

14. Я щ е р и ц ы н П.И., Р ы ж о в Э.В., А в е р ч е н -
к о в В.И. Технологическая наследственность в машиностроении.
Минск: Наука и техника, 1977.

О г л а в л е н и е

В в е д е н и е.....	3
1. СОДЕРЖАНИЕ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ	
1.1. Задачи науки о надежности.....	5
1.2. Понятия надежности.....	7
1.3. Классификация дефектов и отказов.....	11
1.4. Комплексные программы обеспечения надежности.....	15
2. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ	
2.1. Влияние внешних и внутренних условий функционирования двигателя.....	17
2.2. Влияние рассеяния свойств и параметров объектов на надежность.....	23
2.3. Нормирование параметров с учетом рассеяния их значений.....	25
3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ	
3.1. Вероятность безотказной работы. Интенсивность и частота отказов.....	29
3.2. Инженерно-физические показатели надежности.	33
3.3. Основы расчета и анализа схемной надежности.	37
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	42
5. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УСТРАНЕНИЮ ОТКАЗОВ И ДЕФЕКТОВ ПРИ ДОВОДКЕ ГТД	46

5.1. Испытания в работе по обеспечению надежности.....	46
5.2. Система работы над дефектами.....	49
5.3. Особенности организации работ по устранению дефектов и отказов, проявившихся в опытной эксплуатации и сдерживающих доводку двигателя.....	50
6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ	
6.1. Роль технологии в обеспечении надежности при производстве.....	52
6.2. Обеспечение надежности в эксплуатации...	55
7. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ	
7.1. Качество продукции.....	57
7.2. Основные понятия управления качеством...	59
7.3. Организация управления качеством продукции.....	60
7.4. Количественная оценка качества в производстве.....	65
7.5. Обеспечение качества и оценка надежности особо важных производственных процессов..	69

В л а д и м и р И л ь и ч К о с т и н

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД
И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Учебное пособие

Редактор Л.М. С о к о л о в а

Техн.редактор Н.К а л е н ю к

Корректор С.С. Р у б а н

Подписано в печать 10.07.1980.ЕО 00419.

Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.

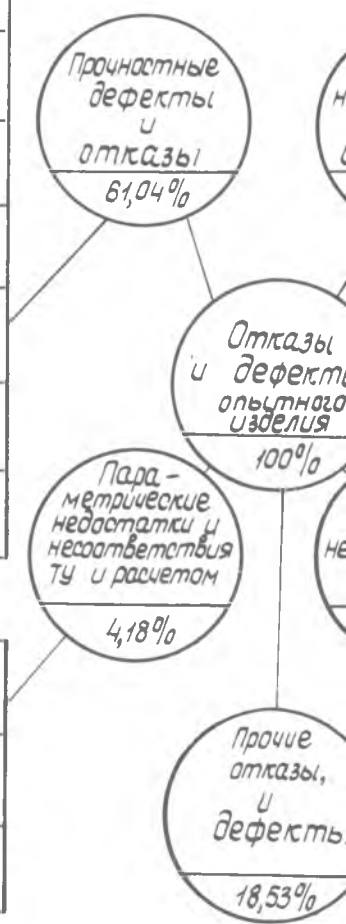
Оперативная печать.Усл.п.л.4,65+0,46 (4 вкладки)

Уч.-изд.л.5,0. Тираж 500 экз. Заказ № 4601 Цена 15 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П.Королева,г.Куйбышев,
ул. Молодогвардейская, 151.

Обл. типография им. В.П.Мяги,г. Куйбышев,
ул. Венцека, 60.

30,15%	Усталостные разрушения и трещины
11,84%	Усталостные выкрашивания, вибрационные заедания, контактная коррозия, наклепы
2,14%	Статические разрушения и трещины
4,5%	Трещины и прогары от нагревов
3,70%	Износы, схватывания и заедания
1,04%	Повреждения поверхностей от воздействия среды
6,57%	Недопустимые деформации
1,10%	Повышенные вибрации изделия, узлов и деталей
2,30%	Несоответствие параметров характеристик узлов расчету и ТУ
1,31%	Превышение веса
0,20%	Превышение нагрузки на подшипники
0,37%	Превышение дисбаланса роторов после испытаний



Р и с.3. Отказы и дефекты устраняемые в п...

Функциональ-
ные дефекты
и
отказы
14,04%

Невзаимо-
заменяемость
и
нетехнологичность
2,19%

Недостаточная устойчивость газодинамических процессов и процессов	0,40%
---	-------

Нестабильность, неустойчивость неточность системы регулирования	2,15%
---	-------

Нестабильность запуска, отказы при запуске изделия	1,58%
--	-------

Негерметичность (утечки воздуха, газа, топлива, смазки)	7,78%
---	-------

Повышенная неравномерность температур давлений, скоростей (окружных, радиальных)	0,52%
--	-------

Недопустимые отложения продуктов термического разложения топлива и смазки	0,77%
---	-------

Неотработанные радиальные и осевые зазоры между ротором и статором	0,84%
--	-------

Невзаимозаменяемость узлов, деталей, агрегатов	0,07%
--	-------

Нетехнологичность изготовления и сборки	1,08%
---	-------

Нетехнологичность эксплуатационная	1,04%
------------------------------------	-------

ы, дефекты и недостатки опытного двигателя, процессе доводки



Обеспечение допустимой статической напряженности

- Обеспечение запасов прочности, требуемых нормами, на ресурс 5000 часов
- Охлаждение сопловых лопаток Испулены турбины
- Охлаждение дисков турбины
- Охлаждение статора и др. деталей
- Применение пустотелых сопловых лопаток
- Применение, многофорсуночной камеры сгорания, обеспечивающей малую неравномерность температ. поля
- Залуск на первом контуре, включающ. 25% форсунок
- Плавное подключение форсунок при увеличении режима
- Регламентация режимов прогрева при залуске

Обеспечение достаточн. Температуры и температ. напряжен. в детал.

- Контроль оборотов роторов низкого и высокого давления
- Контроль расхода топлива
- Контроль давления топлива и масла
- Контроль температуры масла
- Контроль температуры газа
- Сигнализация перегрева лопаток
- Контроль вибраций
- Защита по температуре газа

Обеспечение стабильности работы двигателя

Р и с. 14. Обеспечение ресурса и надежности

Обеспечение допустимых значений общих вибраций и переменных напряжений в деталях.

Применение демферов в опорах подвеске оборудования и агрегатов

Специальная система балансировки роторов

Применение вставок и изнашиваемых покрытий по торцам лопаток в лабиринтах

Применение полочных лопаток вентилятора и турбины

Применение разношагицы в сопловых аппаратах

Демпфирование в полках направляющего аппарата

Демпфирование в опорах трубопроводов

Заклепочные соединения на оболочках

Исключение резких концентраций напряжений (радиусы в замках, конические переходы от фланца к оболочке)

Применение карбидовых и износостойких материалов (титановые сплавы, нержавеющие стали и сплавы)

Применение специальных методов поверхностной обработки (обработкой и т.п.)

Применение специальных режимов термической обработки (т.е. гомогенизация и др.)

Относительное увеличение толщины кромки лопатки

Обеспечение достаточной выносливости деталей

Максимальное исключение точечной и риликакой связи

Применение вакуумной и электрошлаковой выплавки сплавов

Обеспечение в каждой детали свойств, гарантируемых

Регламентация режимов обработки

Применение термической и поверхностной обработки, гарантирующих отсутствия нежелательных остаточных напряжений

Обеспечение стабильности технологии

Применение специальных методов контроля стабильности технологии (рентген, магнит-

спечение прса и недеж-

- Проверка стандартных характеристик материала по ТУ
- Усталостные испытания вентиляторных лопаток из титана
- Проверка сплавов на повторно-статическое нагружение
- Контроль микроструктуры титановых лопаток
- Контроль содержания кислорода в титановых сплавах
- Проверка титановых лопаток на прижоги
- Замер остаточных напряжений от мех. обработки
- Рентгеноструктурный анализ наклепа лопаток
- Контроль качества цементации зубчат. колес
- Электронно-микроскопический контроль качества материала лопаток
- Люминесцентно-цветной контроль ответственных деталей
- Испытания материалов в условиях многокомпонентного нагружения
- Тензометрирование элементов двигателя
- Замер перемещений и деформации двигателя
- Вибрографирувание корпусов и агрегатов
- Торсиографирувание валов
- Замер осевых сил на подшипниках
- Замер пульсаций давления

Контроль и исследования применяемых материалов.

Проверка ресурса и надежности

Исследование узлов и деталей на работоспособность

Р и с . 15. Ко
рок ресурса и
двиг

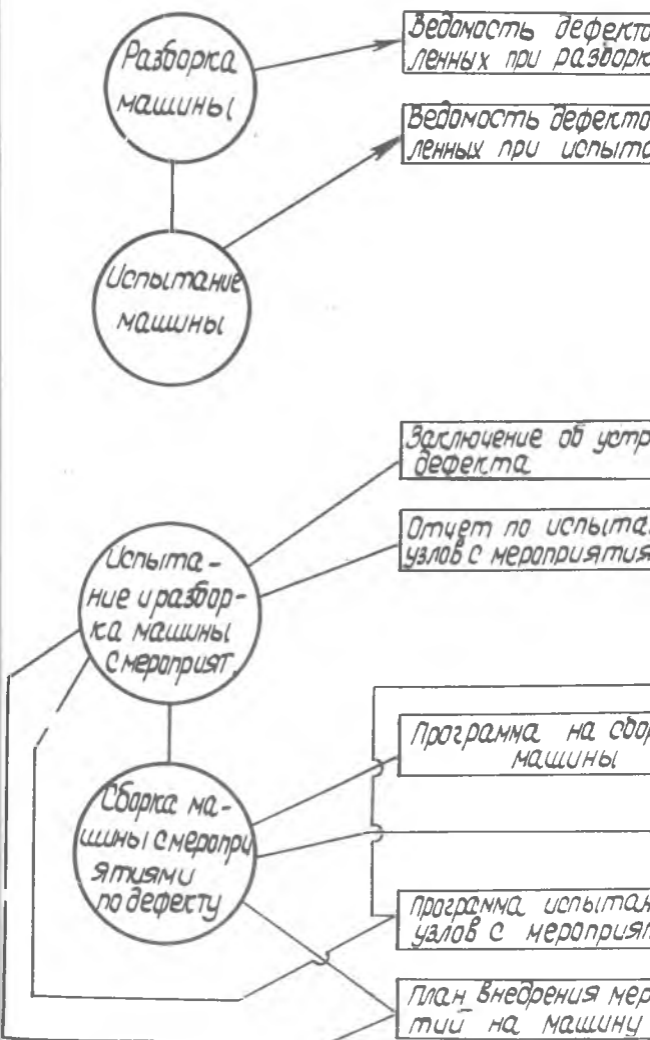
Проверка
на
надеж-
ность

Натурные
испытания
узлов и деталей

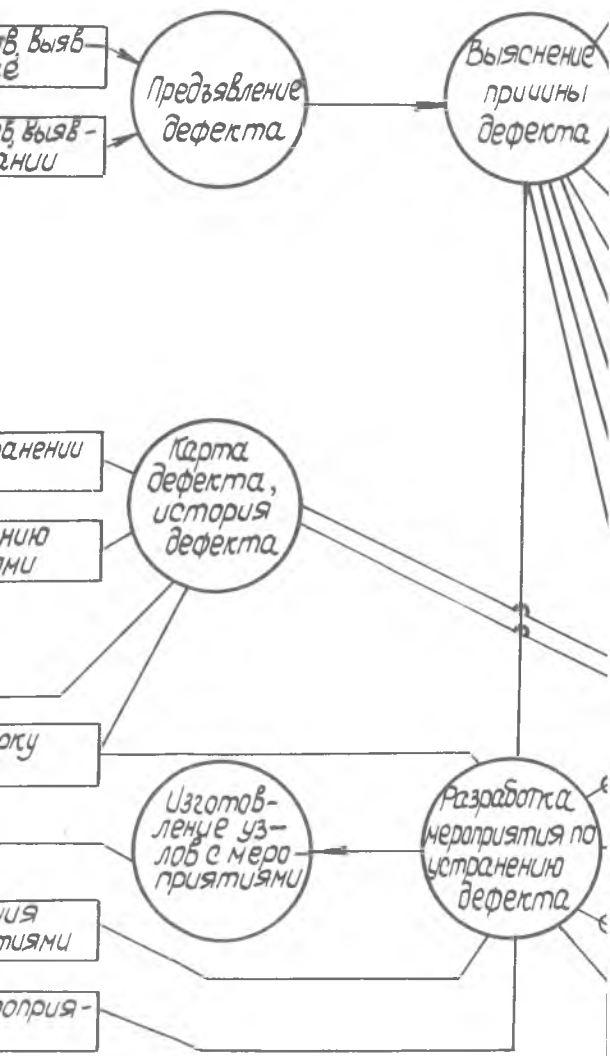
Спец. и
длит. испы-
тан. двигат.

Комплекс прове-
надежности
двигателя

- Статич. испытания макета двигателя и основных деталей
- Вибрационные испытания узлов и деталей
- Контроль выносливости лопаток
- Испытания агрегатов и трубок на вибростенд.
- Отработка амортизации и демпфирования
- Испытание лопаток на термобойкость
- Отработка системы охлаждения турбинных лопат.
- Проверка отсутствия автоколебаний лопаток компрессора
- Проверка надежности при максимально возмож. оборотах
- Проверка прочн. роторов при оборот. Выше максимальн
- Проверка работоспособности на критическ. оборот
- Проверка при попадании на вход птиц и льда
- Проверка непробиваемости карп. при обрыв. лоп.
- Проверка работоспособности двигателя при повышенной температ. масла
- Длительн. испытания по эксплуатаци. программе
- Эквивалентные испытания
- Испытания в термобарокамере
- Испытания на летящей лаборатор.
- Летные и эксплуатационные испытания



Р и с . 16 . Организация работы



ты по устранению дефектов

Запуск программ на исследование и установление причин дефекта

Препарирование узлов и деталей для исследования

Стендовые и лабораторные испытания машины, узлов, детал.

Исследование материала и повреждений

Обследование технологических и металлургических процессов изгот.

Газодинамические расчеты

Прочностные расчеты

Контроль конструкции дефектного узла

Выпуск отчета или технич. справки по причине дефекта

Проведение необходимых газодинамических расчетов

Проведение необходимых прочностных расчетов

Разработка изменений конструкции, детал., узлов

Выпуск документации на изготовление деталей узла с мероприятиями

Отчет или тех. справка обоснования разраб. меропр.