

На правах рукописи

Панов Владимир Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА
ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ В
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ.**

**Специальность 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2012

Работа выполнена в Московском авиационном институте
(национальном исследовательском университете) «МАИ»

Научный руководитель:

д. т. н., профессор Новиков Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Марчуков Евгений Ювенальевич, д.т.н., профессор,
ОКБ им. А.Люльки ОАО «УМПО», генеральный конструктор;

Пайкин Александр Григорьевич, к.т.н., ЗАО «НПК «Авиапромтех»,
заместитель Генерального директора – технический директор

Ведущая организация: Открытое акционерное общество

«Научно-производственное объединение «Сатурн»

Защита состоится «11» марта 2013 года в 13 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского
авиационного института (национального исследовательского университета)
по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
авиационного института (национального исследовательского университета)

Автореферат разослан " ____ " _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08,
д.т.н., профессор

 Зувев Ю. В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Единая система управления техническим состоянием авиационных двигателей представляет собой совокупность экономически и административно самостоятельных структурных элементов (предприятий, организаций), деятельность которых и соответствующий ей характер функциональных связей подчинены единой цели: обеспечению, поддержанию и восстановлению исправного состояния авиационных двигателей для всех структурных элементов при минимизации финансовых затрат. Центральное место в системе управления техническим состоянием авиационных двигателей принадлежит ее информационному обеспечению. Объем и характер получаемой информации зависит от функционального предназначения того или иного структурного компонента системы управления техническим состоянием двигателя. Головной эксплуатант должен иметь информацию о состоянии двигателей, являющихся его собственностью, нормативных требованиях к техническому состоянию объекта, допустимым средствам и методам обеспечения исправности в различных условиях восстановления исправности двигателей.

Естественно предположить, что создание такой системы управления техническим состоянием авиационных двигателей и организация обмена информацией в общекорпоративных интересах всей структуры способны существенно упростить правила функционирования отдельных предприятий. Разработка и внедрение экономически обоснованной стратегии, единой системы управления техническим состоянием авиационных двигателей позволит успешно решать задачи по обеспечению, поддержанию и восстановлению исправного состояния всех составных компонентов силовых установок летательных аппаратов. В настоящее время отсутствуют обоснованные критерии по принятию решений о виде ремонта двигателя.

Цель диссертационной работы На основе современных достижений фундаментально-прикладной науки по технической диагностике и статистического анализа дефектов, выявленных в процессе эксплуатации тысяч авиационных двигателей, предложить методы обеспечивающие эксплуатацию двигателей по техническому состоянию. Для достижения поставленных целей решаются следующие задачи:

1. Разработать принципы построения и управления системой послепродажного обслуживания с выполнением восстановительного ремонта авиационных двигателей непосредственно в эксплуатации и в ЦВИД (центрах восстановления исправности двигателей);
2. Разработать алгоритмы поиска и локализации неисправностей ТРДДФ для дальнейшего их устранения в эксплуатации и ЦВИД по специально разработанным технологиям.
3. Экспериментально исследовать и математически доказать нормы максимально допустимых величин виброакустических параметров неразборных подшипников с двигателями поступивших в ремонт.
4. Разработать предложения по модульности конструкций ТРДДФ для обеспечения модульного восстановительного ремонта в эксплуатации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм поиска и локализации неисправности авиационного двигателя объединяющий в себя, как параметрические данные, так и физические параметры технического состояния двигателя с последующей выдачей не только вероятного дефекта, но и технологии его устранения.
2. Впервые разработаны нормы максимально допустимых величин виброакустических параметров неразборных подшипников с двигателями поступивших в ремонт.
3. Разработаны методы эксплуатации и ремонта двигателей по техническому состоянию отличающиеся от известных алгоритмом поиска неисправностей, и принятий решений по их устранению для заданного уровня надежности.

Достоверность научных положений.

1. Разработанные методики опробованы на десяти двигателях семейства РД-33, с выявлением локальных дефектов с вероятностью более 85%.
2. Достоверность результатов по виброакустической диагностике подшипников экспериментально подтверждена на 1500 экземплярах.
3. Алгоритмы поиска неисправностей двигателя подтверждены результатами диагностирования двигателей проходящих длительные и технологические испытания.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритмы поиска неисправности авиационного двигателя с глубиной до сборочной единицы в условиях эксплуатации с применением параметрического анализа, оценки уровня вибрации и физико-химического анализа масла.
2. Результаты работы по оценке технического состояния неразборных подшипников виброакустическим методом с двигателями поступивших в ремонт.
3. Технологии восстановления исправности авиационных двигателей в условиях эксплуатации и ЦВИДах при локальном и восстановительном ремонте.
4. Предложения по модульности конструкций ТРДДФ для обеспечения модульного восстановительного ремонта в эксплуатации.

Личное участие автора.

Автор научно обосновал методологию поиска неисправностей двигателя в условиях эксплуатации на месте базирования авиационной техники.

Разработал технологическую документацию на выполнение локального восстановительного ремонта двигателей в условиях эксплуатации.

Руководил и выполнял экспериментальные работы по анализу технического состояния двигателей в эксплуатации и испытательном стенде.

Разработал техническое предложение по организации региональных центров восстановления исправности двигателей.

Разработал технологию замены модулей роторных узлов двигателя при проведении восстановительного ремонта.

Практическая значимость и ценность проведенных работ.

1. Разработанные алгоритмы поиска и локализации неисправности авиационного двигателя позволяют с большой степенью вероятности производить обнаружение дефекта, даже на его ранних стадиях развития. Алгоритмы позволяют

сопоставить объем восстановительного ремонта для устранения неисправности с необходимым выполнением предупредительного ремонта по замене сборочных единиц имеющих ресурс менее ресурса двигателя и имеющих наработку на отказ менее установленного ресурса двигателя, на который они установлены.

2. Экспериментально разработанные максимально допустимые нормы виброакустического состояния неразборных подшипников, с двигателями поступивших в ремонт, позволяют с высокой точностью выявить дефекты на деталях подшипника, тем самым обеспечить повышение надёжности двигателя. Данный метод позволяет произвести разбраковку подшипников и оценить их фактическое техническое состояние даже при наличии таких дефектов как стружка в масле и консервация маслосистемы не соответствует требованиям технических условий.

3. Разработанная методика балансировки ротора газогенератора с РКТВД обеспечивает выполнение модульной замены РКТВД в эксплуатации на частично разобранном двигателе в условиях эксплуатации.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в журналах из списка ВАК Минобрнауки.

Апробация и внедрение результатов. Материалы диссертации докладывались на конференции в Самарском авиационно-космическом университете (2011г) и научно техническом совете ОАО КЛИМОВ (2012г). Методика и максимально допустимые нормы виброакустических параметров неразборных подшипников двигателей поступивших в ремонт, приняты и внедрены в производство ремонта двигателей на ММП им. В.В. Чернышева. Алгоритмы поиска неисправности апробированы на двигателях проходящих длительное испытание на испытательных боксах ММП им.В.В. Чернышева.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, общих выводов к работе и списка использованной литературы. Материалы диссертации изложены на 186 страницах, содержат 28 рисунков, 10 таблиц и список используемой литературы из 102 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной по эксплуатации ТРДДФ, как сложной технической системы с точки зрения диагностирования и принятия решения по восстановлению исправности в интересах эго эксплуатации по техническому состоянию. Сформулированы задачи исследования для достижения поставленной цели.

В первой главе рассмотрены закономерности изменения технического состояния двигателя, причин появления и закономерностей развития отказов, рассматриваемых в качестве случайных событий, возникающих и изменяющихся во времени, в процессе эксплуатации. Из результатов рассмотрения возможных последствий отказов в зависимости от их характера развития и проявления можно различить следующие условные формы надежности:

- функциональную, когда изделие не способно выполнять заданные функции;

- параметрическую, когда выполняемые функции не удовлетворяют требованиям высокой точности, экономичности и эффективности;
- прочностную, повреждения или отказ которые не обеспечиваются необходимой долговечностью. В главе приведены характерные дефекты, встречающиеся на типовом двигателе, а так же проведен анализ статистики отказов и систематизированы диагностические признаки их обнаружения и локализации (табл.1).

Таблица 1. Перечень характерных дефектов на семействе двигателей РД-33.

№ пп	Детали и системы двигателя	Диагностические признаки		отказы	
		В полете	На земле	Локализо- ванные	Не локализо- ванные
1.	Лопатка вентилятора 1-й, 2-й, 3-й ступеней	Вибрация	При осмотре	+	+
2.	Лопатки компрессора	Вибрация	При осмотре	+	+
3.	Жаровая труба	-	При осмотре	+	+
4.	Корпус камеры сгорания	-	При осмотре	+	+
5.	Коллектор камеры сгорания	Срабатывание пожарной сигнализации	-	+	+
6.	Сопловой аппарат ТВД	Заброс Тг	При осмотре	+	
7.	Сопловой аппарат ТНД	Заброс Тг	При осмотре	+	
8.	Рабочие лопатки ТВД	Заброс Тг вибрация	При осмотре	+	+
9.	Рабочие лопатки ТНД	Заброс Тг вибрация	При осмотре	+	+
10.	Диски вентилятора	-	-	+	+
11.	Диски компрессора	-	-	+	+
12.	Диски турбины	-	-	+	+
13.	Места соединения дисков с валом (шпильки)	-	-	+	+
14.	Топливная система САР	Отклонение основных параметров от норм	-	+	
15.	Подшипники трансмиссии	Вибрация, срабатывание сигнализатора стружки	-	+	
16.	Шестерни ц/привода	Отказ топливной и масляной систем	-	+	
17.	Масляная система	Отклонение основных параметров от норм	-	+	
18.		-	-	+	+

№ пп	Детали и системы двигателя	Диагностические признаки		отказы	
		В полете	На земле	Локализованные	Не локализованные
	Форсажные коллектора				
19.	Продольные швы обечаек форсажной камеры	-	-	+	+
20.	Трубки наружного контура	-	Обнаружена течь	+	
21.	Трубки управления соплом		То же	+	

Так же рассмотрена существующая практика эксплуатации двигателей по техническому состоянию, которая определяет эксплуатацию двигателя по фиксированному межремонтному ресурсу, после выработке которого, переборке и ремонту на предприятии изготовителе или предприятиях выполняющих ремонт подвергаются двигатели находящиеся и в исправном состоянии.

Рассмотрена организация восстановления исправности авиационных двигателей в ВВС США, Великобритании, Германии и России. Организация технического обслуживания и восстановления авиационной техники в войсках НАТО исходит из принципа максимальной самообеспечиваемости и автономности авиационных крыльев. Согласно наставлению по ИАТО ВВС США, принцип максимальной самообеспечиваемости и автономности авиационных крыльев состоит в том, чтобы максимальный объем ремонтных работ выполнялся войсковой ремонтной сетью. «Все что может быть сделано на низшей инстанции не должно выполняться на высшей инстанции».

В нашей стране на сегодняшний день все виды ремонта авиационной техники выполняются, как правило, на авиационно-ремонтных заводах или предприятиями-изготовителями.

Мировая практика показывает, что более экономичной является такая структура, когда указанные организации выполняют, прежде всего, капитальный ремонт объектов авиационной техники. При восстановлении исправности техники путем замены отдельных модулей, узлов или деталей более целесообразно ремонт осуществлять в непосредственной близости от мест базирования летательных аппаратов. Такой подход дает возможность рационально перераспределять технику для восстановления исправности между заводскими и соответствующими региональными центрами.

Во второй главе приведены общие решения диагностической задачи (отнесение двигателя к исправному или неисправному) которое всегда связано с риском ложной тревоги или пропуска дефекта. Решение задач технической диагностики связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации (до следующего технического осмотра). Здесь решения должны основываться на моделях отказов, изучаемых в теории надежности. Другим важным направлением технической диагностики является теория контролеспособности, основной задачей которой является изучение средств и методов получения диагностической информации.

В конструкции современных авиационных двигателей используется автоматизированный контроль параметров, которым предусматривается обработка диагностической информации и формирование управляющих сигналов. На рисунке 1 показана структура технической диагностики.

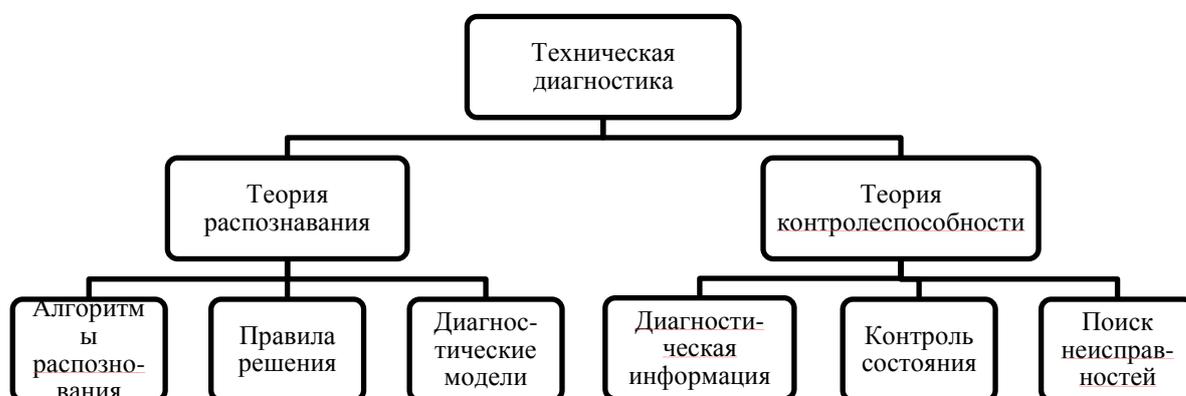


Рисунок 1

В процессе эксплуатации современных двигателей контролируется 20—40 параметров, причем показания приборов имеют три уровня информации: индикация в кабине летчика; регистрация на борту самолета; наземные проверки. Во всех случаях, когда значения параметров достигают предельно допустимых, используется дополнительная сигнализация (световая или звуковая). Значительное количество информации регистрируется на борту самолета с помощью специальных записывающих устройств с последующим хранением информации на магнитных лентах. Ряд диагностических признаков выявляется при наземной проверке (визуальные осмотры, проверка фильтров и т. п.).

В данной главе приведен анализ диагностической информации полученной в процессе разборки двигателей поступивших в ремонт по характерным дефектам, так же возможные методы их обнаружения непосредственно в эксплуатации:

- Попадание постороннего предмета.
- Расход масла. Стружка в масле (табл. 2).

Таблица 2. Дефекты масляной системы двигателя.

Заявленный дефект	Причина дефекта	Следственные связи
Расход масла выше допустимого для дальнейшей эксплуатации	Потеря подвижности сегментов и выработка графитового уплотнения 5 опоры	Расход масла, попадание масла в проточную часть двигателя, дымление из сопла, попадание масла в полость наддува графитовых уплотнений с последующим выбросом из патрубков.
Расход масла выше допустимого для дальнейшей эксплуатации	Ослабление затяжки гайки крепления втулки уплотнения 1 опоры.	Разрушение графитового уплотнения, ослабление посадки подшипника 1 опоры, выработка на деталях подшипника с образованием стружки, попадание паров масла в газоздушный тракт и кабину пилота
Расход масла выше допустимого для дальнейшей эксплуатации	Разрушение подшипника 3 опоры.	Выработка деталей подшипника с образованием стружки, разрушение графитового уплотнения, попадание паров масла в газоздушный тракт и кабину пилота, попадание масла в полость наддува графитовых уплотнений с последующим выбросом из патрубков.

- Вибрация.

Различается несколько видов вибраций, генерируемых газотурбинными двигателями:

роторная вибрация; аэродинамическая вибрация; газоздушная вибрация; редукторная вибрация; подшипниковая вибрация, лопаточная и дисковая вибрации.

Основными причинами, вызывающими изменения уровня вибрации в полете являются:

1. изменения условий полета, приводящих к возникновению нестационарности воздушного потока на входе в двигатель (атмосферная турбулентность, вариация угла атаки, боковой ветер и т.д.);
2. замена сборочных единиц или модулей, перестановки двигателя или регулировки его характеристик;
3. возникновения неисправностей и замена бортовой виброизмерительной аппаратуры;
4. возникновения неисправностей двигателя к которому относятся:

обрыв элементов ротора (рабочих лопаток, болтов и т.д.); нарушение соединений роторов (вытяжка соединительных элементов, смещение соединяемых деталей); возникновение трещин в дисках компрессора и турбины; изнашивание деталей ротора (рабочих лопаток, лабиринтных уплотнений, подшипников); трещины рабочих лопаток турбины и компрессоров; разбандажирование лопаток рабочих колес; образование значительного количества забоин, загибов рабочих лопаток; деформация неподвижных элементов газоздушного тракта (ГВТ), направляющих и сопловых лопаток, трактовых колец и т.д.;

статистическая и динамическая разбалансировка роторов, в том числе связанная с изменением жесткости роторов; дефекты, приводящие к увеличению неравномерности поля температур; износ лабиринтов.

Задачами диагностирования являются задачи поиска дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования. Строгая постановка этих задач предполагает, во-первых, задание класса возможных дефектов и, во-вторых, наличие формализованных методов построения алгоритмов диагностирования, реализация которых обеспечивает обнаружение дефектов из заданного класса с требуемой полнотой или поиск последних с требуемой глубиной.

Для решения задачи поиска места и определение причин отказа (неисправности) в большинстве случаев требуется создание диагностических моделей - формализованного описания объекта диагностирования. Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах. Одной из основных методик выработки решений на восстановление двигателя является метод теории вероятности. Для дефектов $H(l)$ одного типа вероятность отказа при наличии системы контроля за дефектами будет равна:

$$H(l^*) = 1 - \exp \left[-k(l^*) \frac{1 - P_a(l)}{P_a(l)} \right] \quad (1)$$

В этой главе предлагается методическое, организационное, технологическое оснащение ЦВИДов для выполнения восстановительного ремонта двигателя, которое территориально должно располагаться при одной из авиационных баз, расположенных в регионе, где эксплуатируется однотипная авиационная техника и

в территориальной близости, предполагающей более быструю доставку двигателя в ЦВИД, чем в заводские условия.

В третьей главе приведена классификация методов диагностирования двигателя и приведены экспериментальные результаты выполнения работ по их выполнению.

Метод диагностирования проточной части с использованием таблиц коэффициентов влияния, заключается в решении диагностической матрицы использующей приведенные параметры обследуемого двигателя, полученные в процессе последнего полета. Расчет производится по малым отклонениям параметров для определения тренда.

Используются следующие методы:

- статистический метод диагностирования – одновременно учитывающий признаки различной физической природы с пороговым значением для вероятности диагноза:

$$P(D_i/K^*) > P_a, \quad (2)$$

где P_a — заранее выбранный уровень распознавания D , обычно $> 0,9$;

- метод последовательного анализа;
- комбинированный метод диагностирования;
- физические методы диагностирования – трибодиагностика по видам износа:
 - усталостный при трении скольжения, с образованием обычных мелких частичек прямоугольной формы;
 - усталостный при трении качения, с образованием тонких частичек в виде листочков;
 - адгезионный, с образованием частиц в виде прямоугольников;
 - коррозионный, с образованием пластин, измельченных до тончайшей пыли;
 - абразивный, с образованием частиц размером 1... 15 мкм;
 - фреттинг-износ, с образованием частиц от 0,1 до 5 мкм;
 - фреттинг-коррозия, с образованием частиц от 0,1 до 5 мкм;
 - выкрашивание на беговых дорожках подшипников с образованием частиц от 50 до 500 мкм;

Экспериментальные данные по анализу масла двигателей типа РД-33 поступивших в ремонт по повышенной концентрации продуктов износа можно идентифицировать дефектные элементы ГТД, омываемые маслом:

- по железу - тела качения, кольца и сепараторы подшипников, шестерни, рессоры, детали уплотнений и др.;
- по меди - маслоуплотнительные кольца, бронзовые и латунные сепараторы подшипников;
- по алюминию и магнию - корпуса и детали масляных агрегатов (насосы, суфлеры, крыльчатки воздухоотделителя и суфлера), корпуса коробок и их крышки и др.

В составе силовой установки на самолете контролируются, как правило, роторные вибрации. В настоящее время на двигателях применяется система следящего анализа, которая позволяет наблюдать вибрации отдельно по частотам каждого ротора (рисунок 2).

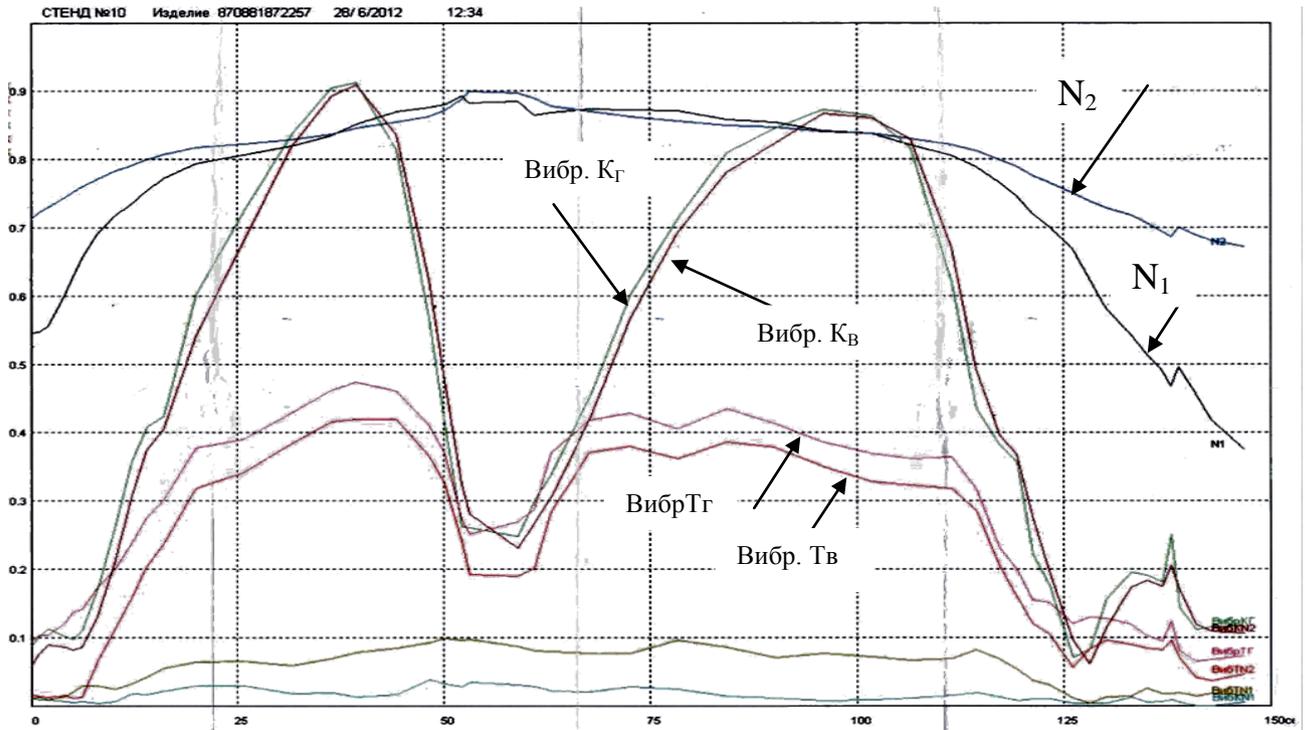


Рисунок.2 Амплитудно-временная характеристика виброскорости типового двигателя

Для идентификации виброактивных элементов конструкции по широкополосной вибрации двигателя следует использовать фактические частоты собственных колебаний, полученные на сборочном стапеле и испытательном стенде. Экспериментальные исследования трех двигателей РД-33МК методом тестовой вибродиагностики выявили частоты собственных колебаний элементов конструкции, что подтверждено их широкополосным спектром вибраций (рисунок 3).

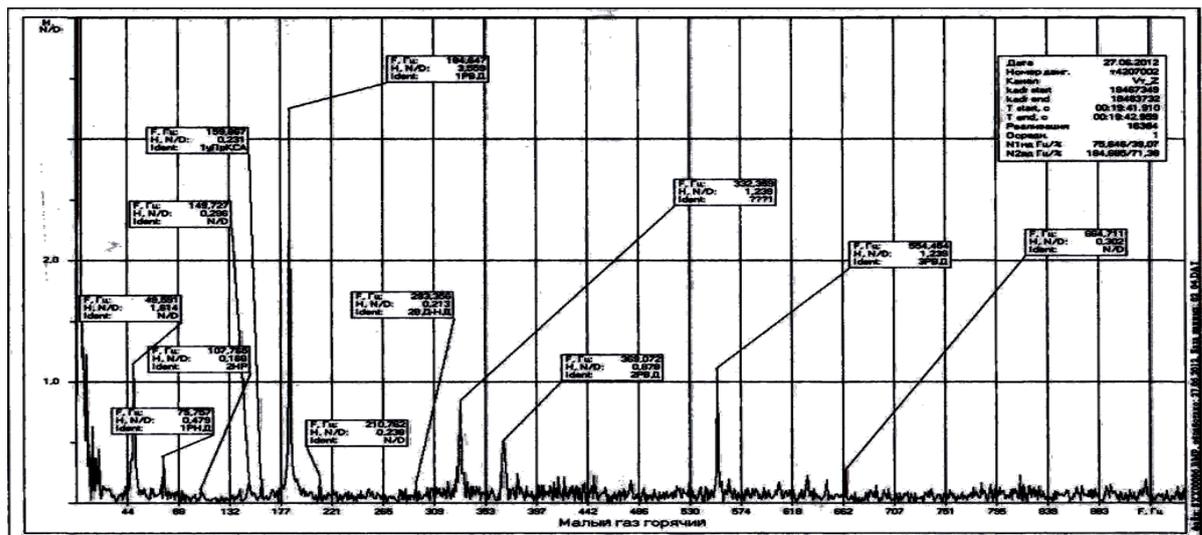
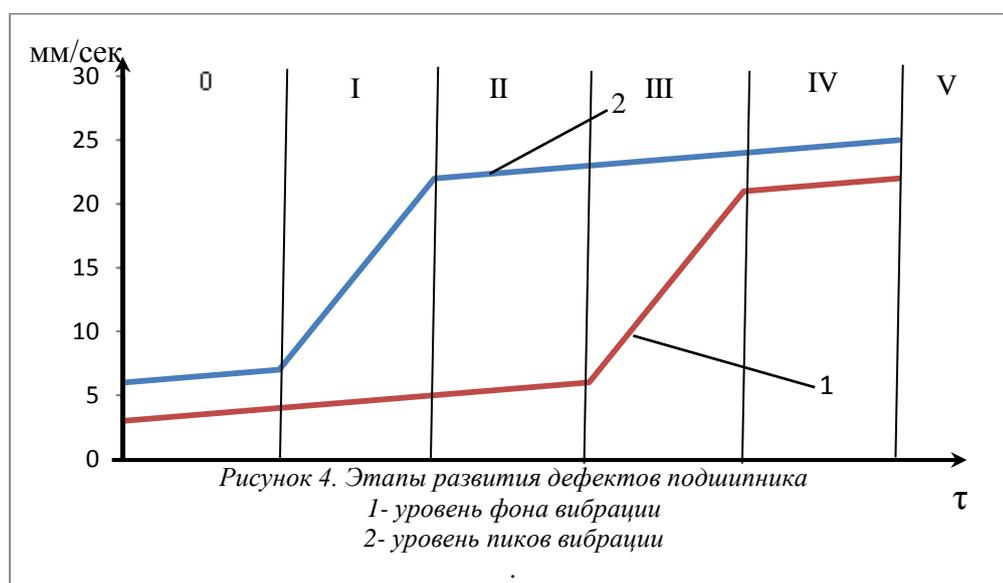


Рисунок 3. Спектр широкополосной вибрации

В четвертой главе приведены разработанные и экспериментально обоснованы критерии оценки технического состояния неразборных подшипников с двигателями поступивших в ремонт из эксплуатации.

В самом общем случае состояние подшипника, качения, развитие его дефектов, за весь период его службы можно разделить на пять этапов. Эти этапы схематически показаны на графике рисунке 4 построенном по результатам дефектации 1500 подшипников. На этом рисунке по вертикали отложен уровень вибрации в мм/сек, а по горизонтальной оси отложены этапы развития дефектов. Состояние подшипника определяется двумя ломанными линиями. Нижняя (1) соответствует уровню фона вибрации на каждом этапе развития дефектов, верхняя (2) - уровню пиков вибрации.

До начала первого этапа, на рисунке 4 этап «0», общее техническое состояние подшипника считается идеальным. На этом, “нулевом” этапе развития дефектов пики вибрации превышают уровень фона незначительно, а сам “фон” вибрации (в данном случае СКЗ виброскорости) значительно меньше нормируемого значения.



Этап I. В подшипнике появляется и начинает развиваться какой - либо дефект, возникают ударные виброимпульсы, растущие по величине. Энергия импульсов затрачивается на “углубление” дефекта, в результате чего происходит еще большее увеличение энергии импульсов. Уровень фона вибрации по своей величине при этом остается неизменным, т. к. дефект носит локальный характер и на общем состоянии подшипника пока не сказывается. Это этап возникновения дефекта в процессе эксплуатации.

Этап II. Ударные импульсы в подшипнике достигают по своей энергии практически максимального значения. Количественное значение максимума энергии импульсов определяется типом подшипника и условиями его эксплуатации. Выделяющаяся в подшипнике энергия импульсов уже столь велика, что ее достаточно для расширения зоны локализации дефекта. На данной стадии остановить дальнейшее развитие дефекта практически невозможно, началось его саморазвитие. Величина пиков вибрации на временном вибросигнале уже практически не растет, но и уровень фона тоже меняется мало.

Этап III. Этап перехода подшипника к полной деградации. Возрастают затраты энергии на вращение ротора и, как результат, увеличивается энергия,

выделяющаяся в подшипнике, растет уровень фона. Этап саморазрушения подшипника.

Этап IV. Этап развития дефекта, когда он охватил весь подшипник. Уровень фона вибрации практически сравнивается с уровнем пиковой вибрации.

Этап V. Этап ожидания аварии, с разрушением подшипникового узла.

Все эти вышеперечисленные этапы ухудшения состояния подшипника свойственны практически всем видам дефектов, имеющих место в любых разновидностях подшипников. В зависимости от ряда эксплуатационных параметров подшипников могут лишь наблюдаться различия в длительности этапов и интенсивности процессов в них, но общая картина развития не меняется при этом:

- каждому виду и уровню риска соответствует своя стадия развития повреждений подшипника;
- критические состояния подшипника (виды и размеры повреждений), соответствующие высоким указанным рискам, индивидуальны для конкретного типа подшипника, типа двигателя и положения подшипника в составе двигателя.

На установке типа КВП-3 производства ВНИПП выполнены работы по определению виброхарактеристик неразборных подшипников двигателей РД-33 поступивших в ремонт и оценка их технического состояния с контролем радиального зазора по серийной ремонтной документации. Работа по определению виброхарактеристик проводилась по виброскорости в трех диапазонах частот. Результаты работ показали:

- виброакустический контроль выявляет недостатки на поверхностях подшипников, которые не обнаруживаются при контроле по обычным методикам, принятым на предприятии;
- наиболее информативным для обнаружения повреждений подшипников является диапазон высоких частот;
- для обнаружения повреждений подшипников дополнительная обработка сигнала не требуется.

Примеры спектров нового (кондиционного) и некондиционного неразборного шарикоподшипника представлены на рисунках 5,6. Здесь частоты прокатывания тел качения по наружной и внутренней дорожкам и их гармоники указаны стрелками.

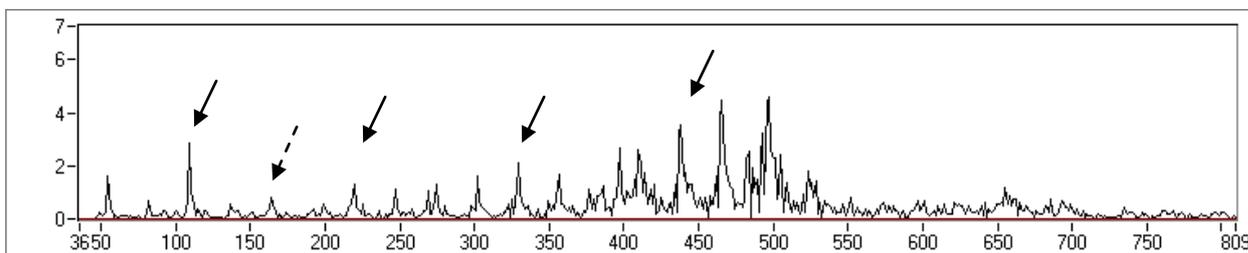


Рисунок 5. Спектр виброскорости нового подшипника 75-205P2 в диапазоне 800Гц
—▶ - частота прокатывания шариков по наружной дорожке и ее гармоники,
- - -▶ - частота прокатывания шариков по внутренней дорожке.

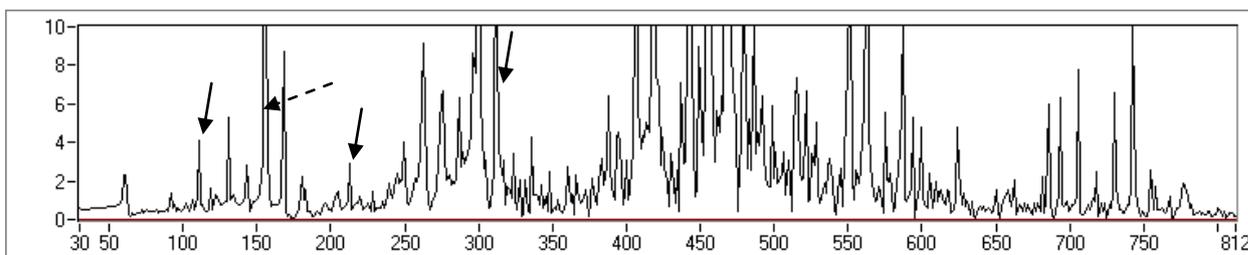


Рисунок 6. Спектр виброскорости некондиционного подшипника 75-205P2 в диапазоне 800Гц

- ▶ - частота прокатывания шариков по наружной дорожке и ее гармоники;
 - - -▶ - частота прокатывания шариков по внутренней дорожке

На всех подшипниках с повышенной вибрацией после разборки обнаружены потенциально опасные изменения состояния контактных поверхностей.

По результатам работ по определению технического состояния более чем 1500 подшипников с изделий поступивших в ремонт разработаны и приняты в ММП имени В.В.Чернышева нормы виброакустических характеристик, которые указаны в таблице 3, для использования их в качестве оценки технического состояния подшипников при сборке двигателей на следующий ресурс после ремонта.

Таблица 3 - Уровни допустимых виброакустических характеристик

Условное обозначение	Класс точн.	Габариты размеры, мм	Виброхарактеристика					
			низкие	средн	высок	низкие	средн	высок
			Дб			мкм/с		
76-1000904P2	6	20x37x9	88	84	83	1260	795	710
5-1000822BT2	5	110x140x16	87	85	90	1120	890	1580
76-100704	6	20x42x9	88	84	83	1260	795	710
4-46202BT2	4	15x32x8	85	81	80	890	560	500
6-42207P1	6	35x72x17	90	78	88	1580	1000	1260
6-305Ю1Т	6	25x62x17	90	79	86	1580	450	1000
75-206P7	5	30x61x16	87	82	85	1120	630	890
75-205P2	5	25x52x15	90	79	85	1580	450	900
75-202P2	5	15x35x11	85	81	80	890	560	500
25-104P1	5	20x42x12	88	84	83	1260	795	710
75-108P	5	40x68x15	90	79	86	1580	450	1000
76-106P1	6	30x55x13	87	82	85	1120	630	890
7000107BT2	6	35x62x9	90	78	88	1580	1000	1260

В пятой главе приведен алгоритм технической диагностики и назначения объема восстановительного ремонта авиационного двигателя в условиях эксплуатации на примере двигателей типа РД-33.

При построении графа причинно-следственных связей можно использовать не все входные, внутренние и выходные параметры (или события, отражающие предельно допустимые значения этих параметров) ГТД, а только те, которые доступны для измерения. Под возможной неисправностью анализируемой методом причинно-следственных связей, понимается дефект детали или сборочной

единицы, который может привести к выходу параметра любого блока логической схемы ГТД за установленные в процессе отработки математической модели пределы.

Контроль состояния маслосистемы и проверка ее работоспособности осуществляются как в процессе технического обслуживания и предполетного осмотра, так и в процессе работы двигателя на земле и в полете. Выходным параметром, подлежащим инструментальному контролю данной системы смазки, является температура масла на выходе из двигателя. Для построения логической модели контроля состояния масляной системы при работе двигателя и представления её в виде алгоритма и графа причинно-следственных связей выбраны следующие события: температура масла выходе; уровень масла в маслобаке; качество масла соответствующее условию работы двигателя. Причиной понижения давления масла в системе могут быть недостаточный уровень масла в баке и ухудшение качества масла, выражающееся в уменьшении его кинематической вязкости. Для решения задачи по диагностированию маслосистемы двигателя типа РД-33 в условиях эксплуатации разработан алгоритм, представленный на рисунке 7.

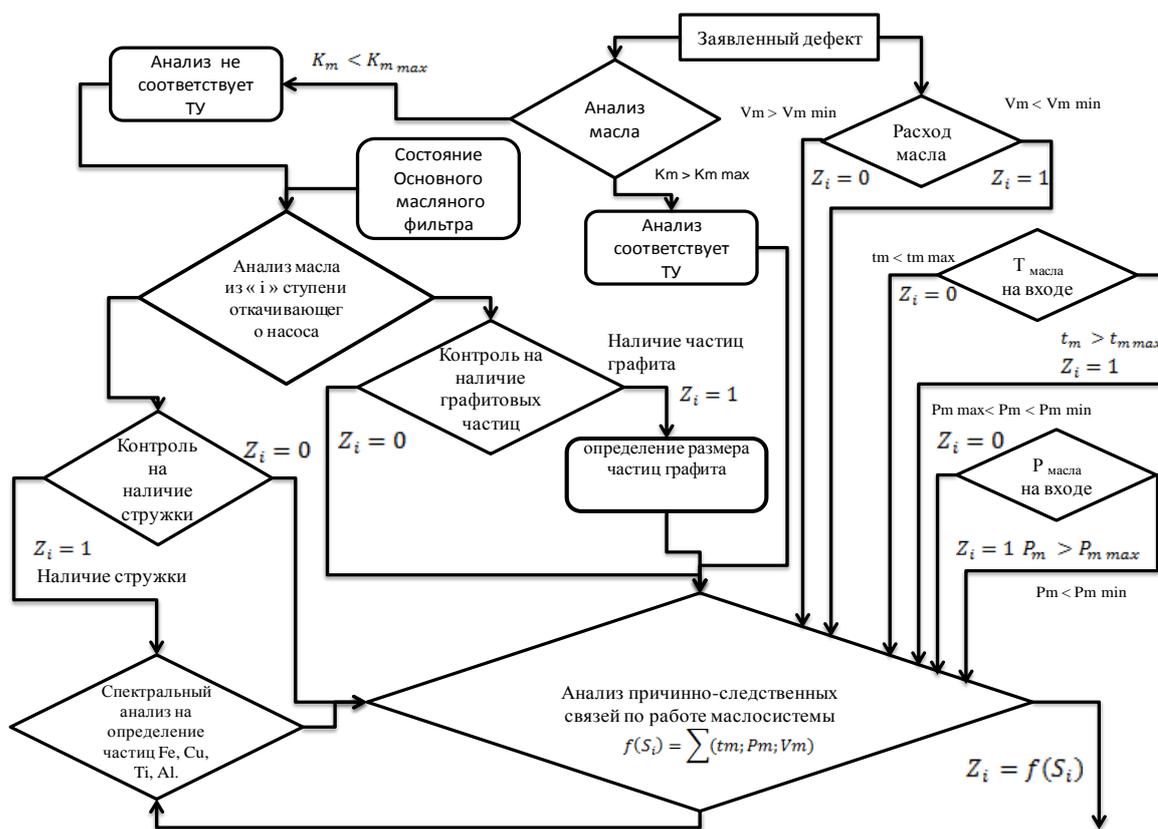


Рисунок 7

Для анализа причинно-следственных связей отказов в работе маслосистемы двигателя типа РД-33 разработана таблица функций неисправностей, столбцы которой представляют неисправные состояния S_j , или заявленный дефект, а строки — Z_i неисправности которые могут привести состояние маслосистемы двигателя до состояния S_j . Функции неисправностей масляной системы двигателей, построенные по графу причинно-следственных связей, приведены в таблице 4.

Таблица.4 Причинно-следственные связи работы масляной системы двигателя.

	S _j																
	e	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆
Z ₁	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1
Z ₂	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Z ₃ ¹	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Z ₃ ²	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
Z ₄	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
Z ₅	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z ₆	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Z ₇	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Z ₈	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Z ₉	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Z ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
Z ₁₁	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1

Где: e – исправное состояние

S_j - неисправные состояния

- S₁ Недостаточная заправка маслом
- S₂ Выброс масла через систему суфлирования
- S₃ Повышенный расход масла
- S₄ Засорение основного масляного фильтра
- S₅ Попадание масла в ГВТ (дым из сопла, дым в кабине)
- S₆ Выброс масла из патрубков сброса воздуха из 4-5 опор
- S₇ Не правильная работа блока заслонок
- S₈ Уменьшение вязкости масла
- S₉ Засорение радиатора
- S₁₀ Не исправен датчик замера температуры масла
- S₁₁ Разрушение подшипников
- S₁₂ Разрушение графитовых уплотнений
- S₁₃ Обрыв валика маслоагрегата
- S₁₄ Обрыв рессоры откачивающего масляного насоса
- S₁₅ Не герметичность соединений
- S₁₆ Обрыв трубопроводов в 1 контуре

Z_i - неисправности

- Z₁ Остаток масла в баке после полета V_м < 7л
- Z₂ P_м < P_{м min}
- Z₃ Качество масла K_{факт} < K_{оптим}
- Z₃¹ Стружка в масле
- Z₃² Наличие графита
- Z₄ T_м > T_{м max}
- Z₅ P_{м 2-3} > P_{м 2-3 max}
- Z₆ P₂₃ < P_{м 2-3 min} занижен перепад давления на графитовом уплотнении 3 опоры
- Z₇ P₂₃ < P_{м 2-3 max} завышен перепад давления на графитовом уплотнении 3 опоры
- Z₈ P_{м 2-3} > P_{м 2-3 min}
- Z₉ Вибрация V > 40мм/с
- Z₁₀ Увеличение уровня вибрации после последнего полета V > 25мм/с
- Z₁₁ Изменение частотных характеристик подшипников в спектре вибрации

Особенности построения математической модели ГТД при проведении диагностики работы по газодинамическим параметрам.

Оптимизированный метод построения алгоритма диагностирования авиационного двигателя основывается на формальном описании исправного и неисправного состояний. Такое формальное описание является аналитическим представлением основных свойств объекта диагностирования, которым является авиационный двигатель, который называется диагностической математической моделью. Математическая модель задаётся дифференциальными уравнениями, логическими соотношениями, таблицами и диаграммами. Для оценки тренда изменения параметров работы двигателя наиболее целесообразным является построение эталонной эксплуатационной математической модели при гонках в составе объекта которое должно описывать исправное состояние двигателя и математической модели полученной в текущий момент времени. Для диагностирования в качестве математической модели ГТД применяется система уравнений, описывающая изменение основных параметров, характеризующих его работу в процессе выработки ресурса. Зависимость основных функциональных параметров ГТД от геометрических характеристик элементов его проточной части может быть описана следующей системой уравнений:

$$\delta\Pi_j = \sum_1^m K_{ij} \delta\eta_i + \sum_m^n q_{ij} \delta F_i \quad (3)$$

Где:

$\delta\Pi_j$ — отклонение одного из основных функциональных параметров двигателя от эталонного и предыдущего контроля.

K_{ij} и q_{ij} — коэффициенты взаимного влияния постоянные для данного типа двигателя;

$\delta\eta_j$ — отклонение КПД сборочных единиц двигателя от эталонного и предыдущего контроля.

δF_i — отклонения площадей проточной части сборочных единиц

$j = 1, 2, 3 \dots$ - порядковый номер параметра

$i = 1, 2, 3 \dots$ - порядковый номер коэффициента потерь

Математическую модель ГТД можно представить и в простейшем виде как полную систему уравнений, описывающих характеристики его основных элементов и связи между ними. Характеристики двигателя при упрощенном их представлении обычно задаются через параметры подобия. Вид уравнений связей между отдельными элементами двигателя определяется конструктивной схемой двигателя, наличием отбора воздуха, мощности и геометрического регулирования элементов. Так параметры, ГТД типа РД-33 получают путем комбинации таких основных элементов, как воздухозаборник, компрессор высокого и низкого давления, камера сгорания, турбина компрессора высокого давления, турбина компрессора низкого давления, сверхзвуковое реактивное сопло, форсажная камера, наличие второго контура. В математической модели двигателя каждый его элемент, являющийся характеристикой основных элементов двигателя на рассматриваемых режимах и его связей, характеризуется уравнением по числу независимых параметров. Составленная математическая модель, обеспечивает расчеты параметров на подобных режимах работы как исправного двигателя, по параметрам предыдущего полета или наземной гонки, а так же в процессе

определения дефекта. Решение полученной системы уравнений с целью исследования технического состояния двигателя возможно при получении посредством бортовых, наземных, стендовых и интегральных диагностических систем контроля типа КСК-33 и регулирования и контроля БАРК. При построении математической модели двигателя, работающего в отличных от стендовых условий или имеющего определенные неисправности, математические модели физических неисправностей определяются изменением параметров, т.е. изменением величин коэффициентов, исключением имеющихся или вводом новых членов в уравнения и т. п.

Учитывая то что, временной интервал между диагностиками двигателей между полетами, которые составляют не более 2 часов, и проведение регламентных работ с апробированием его работы на земле проводится через каждые 50 часов, для диагностирования технического состояния ГТД применена математическая модель, выраженная уравнениями рабочего процесса в малых отклонениях. Это обусловлено тем, что тренд изменения параметров от предыдущего контроля отличается незначительно.

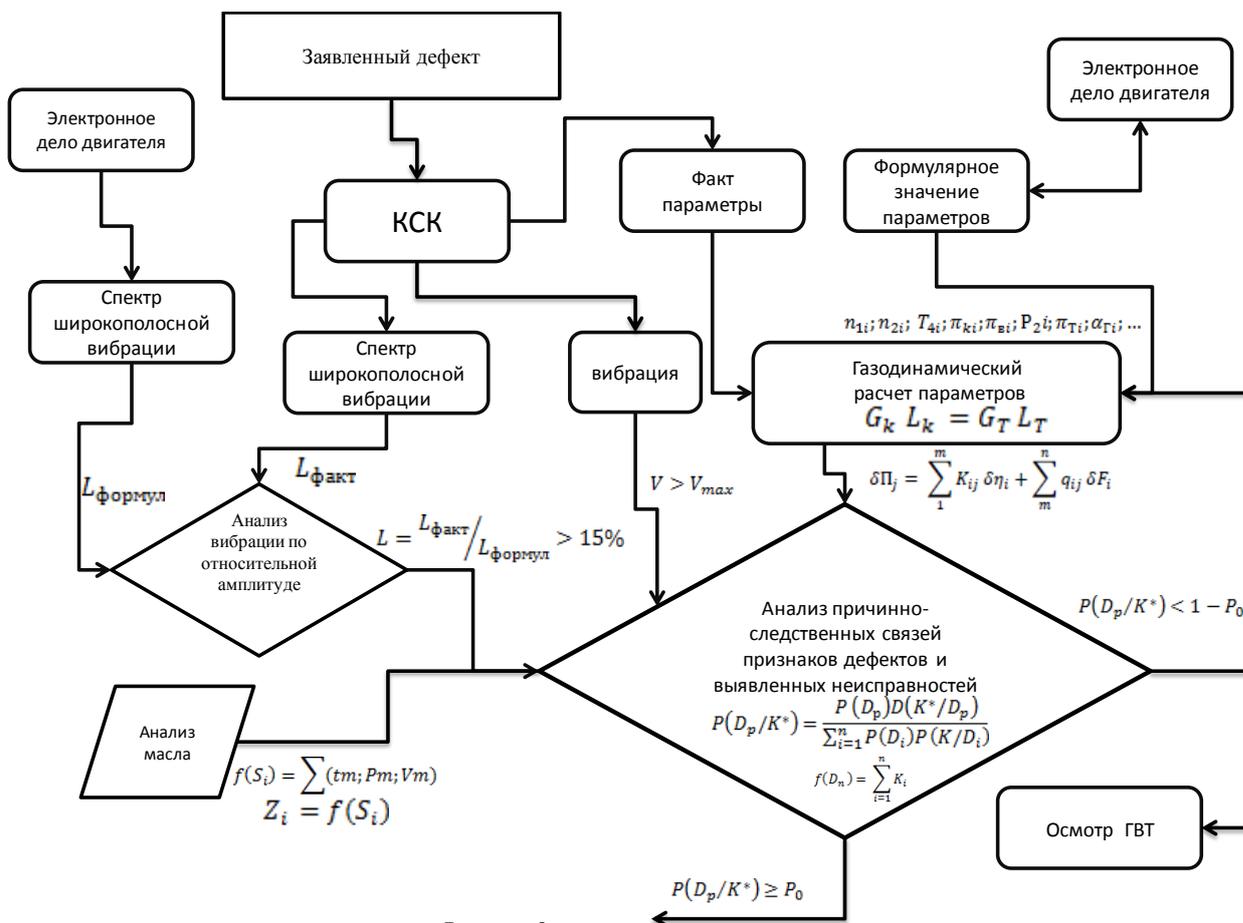
Структура определения технического состояния двигателя включает следующие этапы: составление уравнений в малых отклонениях рабочего процесса основных конструктивных узлов двигателя с учетом его конструктивных особенностей с определением коэффициентов влияния для конкретного режима работы двигателя. Математическая модель основывается на замеренные величины которые можно определять с помощью штатных измерительных приборов. Для определения неисправности ГТД с глубиной до узла на диагностируемом двигателе замеряется ряд функциональных параметров: T_2 , T_4 , P_2 , P_3 , π_k , π_v , π_t , т. д. Эти же параметры рассчитываются по эталонной модели ГТД. По этой модели рассчитываются коэффициенты потерь или геометрические размеры деталей газовоздушного тракта двигателя. Так как на коэффициенты потерь и геометрические размеры устанавливаются допуски изменений (технические нормы), то выход за их пределы указывает на наличие в двигателе дефекта. Данный метод позволяет определять техническое состояние двигателя с глубиной до узла.

Наиболее изнашиваемым элементом двигателя является компрессор, где износу подвергаются входная и выходная кромки и поверхность со стороны корыта лопаток. Проверка показывает, что рабочие лопатки изнашиваются сильнее, чем лопатки спрямляющих аппаратов. Износ лопаток первых ступеней происходит по всей высоте вследствие равномерного распределения потока пыли. Лопатки последних ступеней имеют ярко выраженный износ по периферии. При работе в пыльных условиях, кроме износа лопаток, в компрессоре происходит износ (выветривание) покрытия 20Б, нанесенного на кольца, установленные над рабочими лопатками для уменьшения радиального зазора. Износ рабочих и спрямляющих лопаток выветривание покрытия приводит к уменьшению степени повышения давления воздуха в компрессоре и соответственно его КПД, что приводит при работе на пониженных оборотах и к увеличению подачи топлива и, как следствие, к увеличению температуры газа перед турбиной. При работе на максимальном режиме двигатель не достигает расчетной тяги из-за ограничения температуры газа настроенным ограничителем в блоке цифрового регулятора. Кроме того, износ деталей проточной части компрессора является одной из основных причин помпажа компрессора. Детали турбины двигателя также подвержены износу. Наиболее всего газовой эрозии подвержены лопатки сопловых

аппаратов, что приводит к увеличению площади проходных сечений и как следствие к тренду температурного режима и снижению максимальной тяги двигателя из-за срабатывания режимов ограничителей настройки управляющих блоков.

Взаимосвязи неисправных состояния двигателя и признаков их проявления можно выразить диагностической таблицей, в которой отражаются априорные вероятности неисправностей двигателя $P(D_i)$ и условные вероятности признаков $P(K_j)$. В работе на основании статистических материалов построена такая диагностическая таблица для двигателя типа РД-33.

Вероятностный метод взаимосвязи состояний и признаков предполагает, что любой признак (параметр) характеризует несколько неисправных состояний, но наиболее характерно он отражает неисправное состояние с наибольшей вероятностью реализации. Этот метод диагностирования для двигателя РД-33 построен на основе алгоритма распознавания (рисунок 8), который позволяет на основании анализа распределений состояний и их признаков принимать решение о диагнозе.



Построение алгоритма основано на методе Бейеса и его подхода к вероятности появления признаков для распознавания неисправных состояний двигателя в процессе диагностирования.

$$P(D_p/K^*) = \frac{P(D_p)P(K^*/D_p)}{\sum_{i=1}^n P(D_i)P(K/D_i)} \quad (4)$$

Где: $P(D_p/K^*)$ - вероятность появления данной реализации комплекса признаков K^* при D_i

$P(D_i)$ - априорная вероятность рассматриваемого состояния;

i — 1, 2, ..., n - число диагнозов.

При этом вероятность ближайшего результата диагностирования должна быть не выше $(1 - P_0)$, при этом $P_0 = 0,8$ при этом:

$$P(D_p/K^*) < 1 - P_0 \quad (5)$$

Используя данные диагностической таблицы, определяется диагностический вес рассматриваемых признаков состояний и диагностическая ценность обследования по выбранным признакам. Диагностический вес реализации признака рассматриваемого технического состояния D_i определяется как:

$$ZD_i(K_j^*) = ZD_i(K_{js}) = \log \frac{P\left(\frac{D_i}{K_{js}}\right)}{P(D_i)} \quad (6)$$

Где:

$P(D_i/K_{js})$ – вероятность появления рассматриваемого состояния D_i при условии, что признак K_j получит значение K_{js}

Используя из теории вероятности равенство:

$$P(D_i)P(K_{js}/D_i) = P(K_{is})P(D_i/K_{is}) \quad (7)$$

можно определить вид определения диагностического веса реализации признака:

$$ZD_i(K_{js}) = \log \frac{P(K_{is}/D_i)}{P(K_{is})} \quad (8)$$

По этой формуле можно произвести расчет диагностических весов реализаций всех выбранных двухразрядных признаков по возможным состояниям. Из анализа таблицы для каждого состояния можно определить, по каким признакам обследование имеет наибольшую диагностическую ценность. Соответственно из дальнейшего анализа можно исключить обследование по признакам, имеющим небольшую диагностическую ценность.

Алгоритм принятия решения по ремонту в условиях ТЭЧ или региональных ЦВИД с формированием необходимого комплекта технологической документации, формирования комплекта запасных частей с учетом предупредительного ремонта.

При переходе к эксплуатации по техническому состоянию авиационного двигателя, остается необходимость определения ресурсов заменяемых при отказах его агрегатов, которые в процессе эксплуатации имеют возрастающую интенсивность отказов, т.е. имеющие наработку на отказ меньшую, чем у всего двигателя. Так как доступ к этим агрегатам возможен только при разборке двигателя, то они зависимы по времени обслуживания.

В зарубежной практике эксплуатации авиационных двигателей существует одна из форм технического обслуживания - «обслуживание при случае», т.е. при выполнении определенных работ по ТО (например, при устранении отказов авиационной техники) оказывается целесообразным заменить и некоторые еще

исправные агрегаты или сборочные единицы имеющие ресурс меньше ресурса двигателя (стареющих), или вероятность отказа рассчитанная по теории вероятности как наработка на отказ не соответствует межремонтному ресурсу двигателя.

$$P = \frac{\sum_{N_i}^{N=i} T_i}{N_i} \quad (9)$$

Обоснование таких замен основывается только на опыте специалистов по ТО. При принятии оптимального решения на примере необходимости замены двух $n = 2$ сборочных единиц в процессе ремонта по устранению неисправности возможны следующие решения: А; Б; В. Области принятия оптимальных решений указаны на рисунке 9 на примере замены двух сборочных единиц – САТНД и лопатки РКТВД при выполнении локального ремонта двигателя РД-33. Если в момент контроля наработка сборочной единицы «Q» (лопатки ТВД) и второй «D» (САТНД) превышает установленную наработку на отказ, то необходимо заменить обе сборочные единицы несмотря на то, что они исправны (области принятия решений Б, В). Если к моменту контроля, или при выполнении локального ремонта отказала вторая сборочная единица «D» при наработке лежащей в области принятия решений «А», то первая сборочная единица «Q» замене не подлежит, а заменяется только вторая. При внезапном отказе сборочной единицы с $\lambda = const$, если его устранение требует разборки двигателя, то в момент контроля при достижении наработки на отказ сборочных единиц, принимается решение о замене не отказавших стареющих сборочных единиц двигателя на основании упомянутой выше общей схемы решений. Изложенный подход, связанный с решением задачи методом стохастического динамического программирования, может быть положен в основу планирования текущих ремонтов авиационных двигателей с повышенной интенсивностью отказов по вычисляемым оптимальным наработкам (ресурсам) при организации эксплуатации двигателей по техническому состоянию.

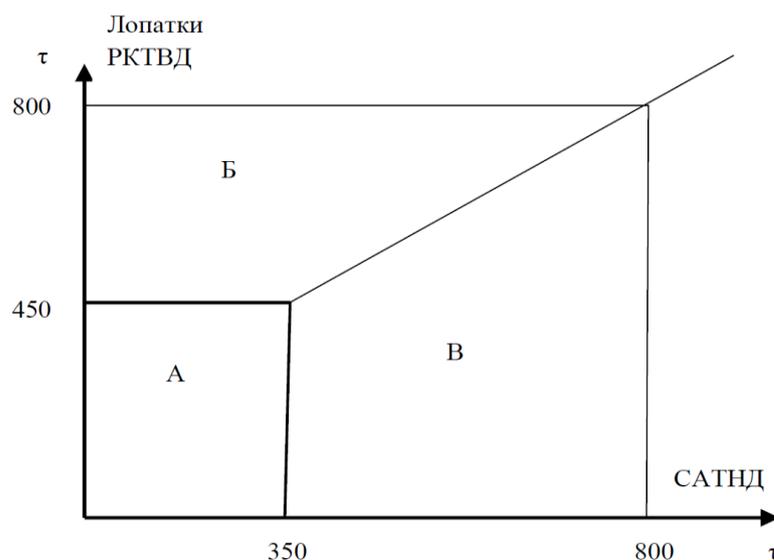


рисунок 9

Алгоритм принятия решения и выдача рекомендаций по выполнению ремонта представлен на рисунке 10. При организации и назначении ремонта в условиях

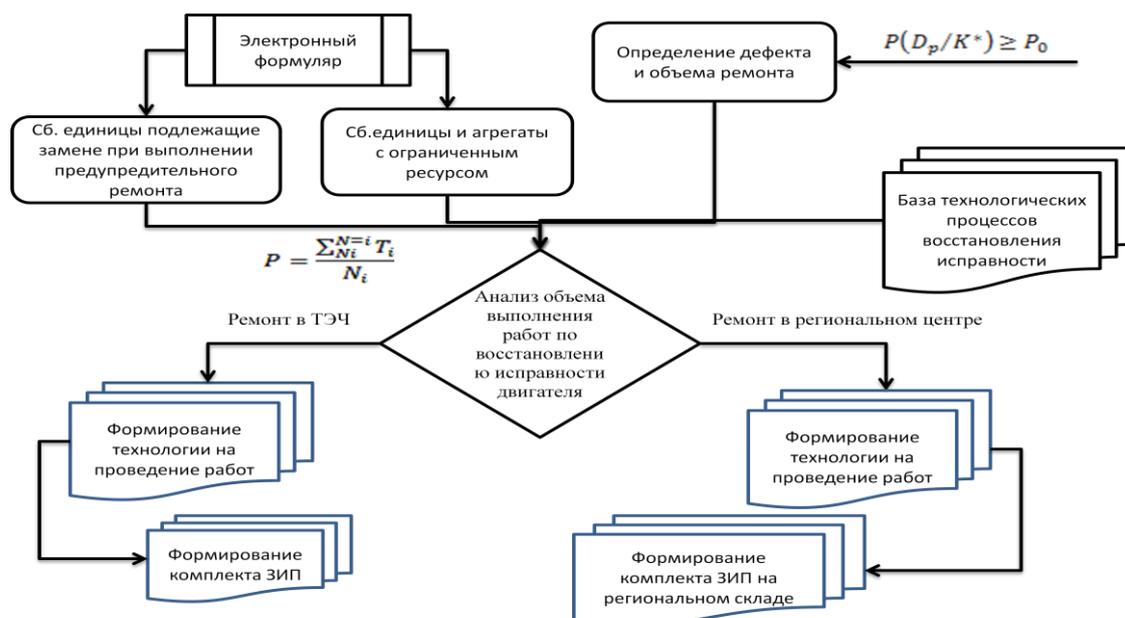


рисунок 10

территориального центра ТО и Р (ЦВИД) авиадвигателей необходимо принять обоснованное решение о локализации тех или иных работ и о назначении рационального уровня ремонтных мощностей по каждому виду выполняемых работ.

В результате анализа состояния 164 двигателей типа РД-33 были разработаны и внедрены технологические процессы для выполнения работ по устранению заявленного дефекта или предупредительному ремонту двигателей типа РД-33 (таблица 6), которые были реализованы в условиях сборочного цеха и эксплуатирующих организациях.

Таблица 6. Технологические процессы

Кол. двигателей	Диагностический параметр	Выявленные дефекты	Метод (технология устранения)	Вид ремонта
50	Разрушение диска ТВД в эксплуатации	Трещины на полотне диска от пазов под лопатки (выявлено в процессе дефектации при поступлении в ремонт)	Замена диска по технологии: Замена лопаток ТВД или диска ТВД на частично разобранном двигателе	Предупредительный
6	Визуальный контроль	Трещина по сварному шву стойки переднего корпуса вентилятора	Замена и устранение дефекта методом заварки по технологии: Технология устранения дефекта и замена переднего корпуса вентилятора на собранном двигателе.	локальный
25	Визуальный контроль	Повреждение лопаток ротора газогенератора	Замена лопаток и устранение дефектов по технологии КБРС	локальный

Кол. двигателей	Диагностический параметр	Выявленные дефекты	Метод (технология устранения)	Вид ремонта
32	Визуальный контроль	Повреждение лопаток ротора вентилятора	Замена лопаток и устранение дефектов по технологии: Замена и устранение дефектов на лопатках вентилятора в эксплуатации.	локальный
2	Визуальный контроль	Повреждение лопаток САТНД	Замена модуля по технологии замены САТНД на частично разобранном двигателе	локальный
3	Визуальный контроль Анализ масла Контроль параметров G масла $\geq 0,8$ л/ч	Темное масла наличие частиц графита	Замена графитового уплотнения 5 опоры по технологии замены модулей	локальный
45	Выработка ресурса	Плановые работы	Замена модуля газогенератора по технологии замены модулей	предупредительный
1	Визуальный контроль	Повреждение лопаток ротора ТНД	Замена модуля ротора ТНД по технологии замены модулей с донорского двигателя	локальный

В главе 6 приведены предложения по обеспечению модульности конструкции с точки зрения технологичности конструкции для обеспечения модульного ремонта в условиях эксплуатации.

В рамках концепции модульности конструкции, в соответствии с ОСТ 1.02666-88 «Двигатели газотурбинные модульные авиационные. Методы обеспечения и оценки модульности при проектировании», предложена конструкция задней опоры модуля вентилятора и опор турбины (рисунки 11,12). Эти предложения были одобрены НТС ОАО «Климов».

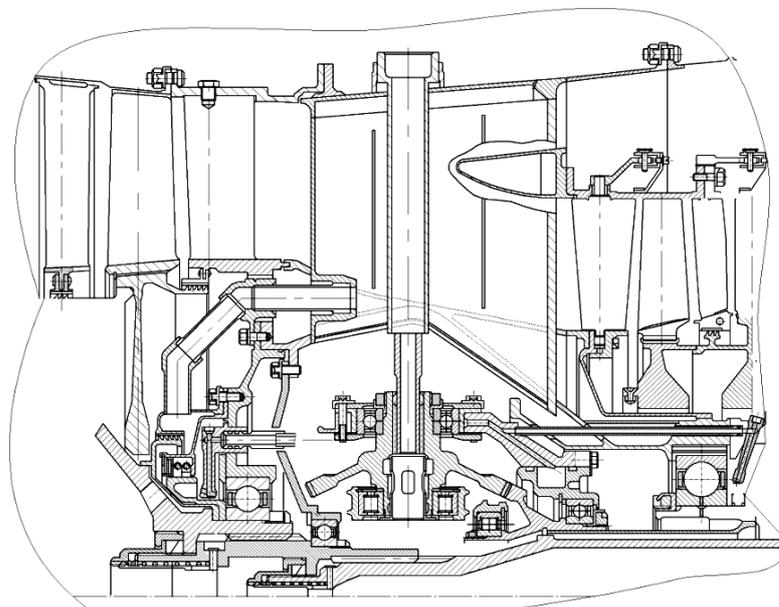


Рисунок 11

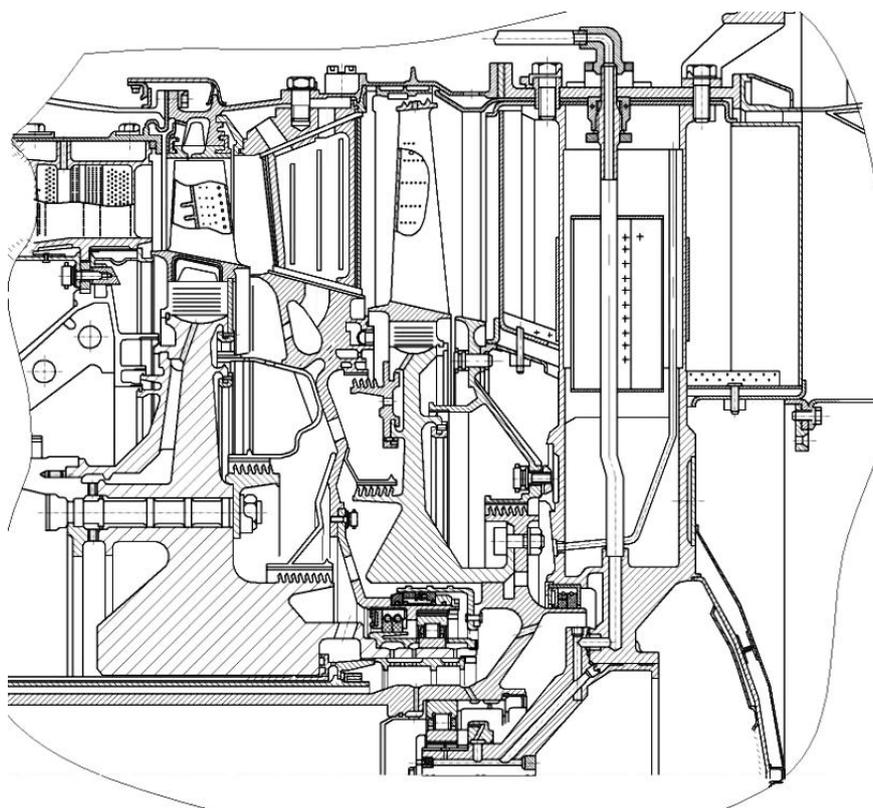


рисунок 12

В 7 главе приведена характеристика центра восстановительного ремонта двигателей типа РД-33.

В отличие от существующей структуры восстановления исправности двигателей военной авиации, в которой ремонт осуществляется только в условиях АРЗ МО РФ или на заводе – изготовителе (заводские условия), предложено добавить еще ремонтное подразделение – региональный (мобильный) Центр восстановление исправности двигателей (ЦВИД) и центр послепродажного обслуживания (ЦППО).

В этом случае ЦППО осуществляет:

- разработку руководящей эксплуатационной и ремонтной документации (Руководство по текущему ремонту и бюллетени о внесении изменений в Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию);
- заключает договора с Заказывающей организацией на выполнение текущего ремонта;
- формирует выездные бригады для выполнения текущего ремонта в условиях ЦВИД;
- приобретает (изготавливает) необходимые средства технологического оснащения, запасные части и материалы;
- принимает от эксплуатирующей организации двигатели в ремонт;
- разбирает, дефектирует, заменяет дефектные детали и сборочные единицы на исправные, собирает и испытывает двигатели в условиях ЦВИД;
- организует ремонт снятых с двигателя неисправных деталей, сборочных единиц и (при необходимости) двигателя в целом на своем предприятии, в условиях заводов изготовителей или АРЗ МО РФ;
- оформляет отчетную документацию о выполненных работах (Дело ремонта) и оформляет Формуляр двигателя по установленной форме.

Подразделением дивизиона ОДК (ММП имени В.В. Чернышева) приняты к внедрению разработанные в диссертации эти предложения. По предварительной оценке эффективности работы центра ППО порядка 40% дефектов, по которым двигатель эксплуатирующей организации отстранен от эксплуатации, могут быть устранены на месте.

Таким образом, при выполнении текущего ремонта решаются три основные задачи:

- 1) восстановление исправного состояния дефектной детали или сборочной единицы (путем их замены или ремонта);
- 2) установление остатка ресурса и срока службы двигателя после проведения текущего ремонта при известном его объеме;
- 3) оценка технического и функционального состояния конкретного двигателя в целом и обосновать, что оно будет соответствовать требованиям действующей нормативно-технической документации для установленных остатков его послеремонтной наработки и срока службы.

Основные выводы по работе.

1. В диссертации решены задачи по техническому обслуживанию и ремонту авиационных двигателей в свете требований к их обобщенным характеристикам как сложной технической системы.
2. В работе доказано, что переход эксплуатации двигателей по техническому состоянию с проведением комплексного мониторинга, диагностирования и восстановления его исправности на месте базирования или в ЦВИД обеспечивает поддержание заданного уровня надежности.
3. Разработан и апробирован метод эксплуатации двигателей по техническому состоянию, отличающийся комплексной диагностикой и новыми технологическими процессами восстановления для поддержания заданного уровня надежности.
4. Разработан и предложен алгоритм поиска неисправностей с глубиной до сборочной единицы обеспечивающий принятие оптимального решения по виду ремонта двигателя: локальный, средний или капитальный. Данный алгоритм опробован при испытании десяти двигателей типа РД-33 сер.2,3 и РД-33МК на ММП имени В.В. Чернышева.
5. В диссертации сформулированы, и внедрены в производство, технические предложения и нормы по диагностированию неразборных подшипников виброакустическим методом в процессе проведения капитального ремонта двигателей, обеспечивающие надежность работы агрегатов масляной системы в пределах установленного межремонтного ресурса.
6. Разработаны технологии замены основных модулей, сборочных единиц и отдельных деталей при восстановительном ремонте.
7. Предложены изменения конструкции двигателя для обеспечения его модульности, для обеспечения технологичности конструкции при выполнении локальных ремонтов в условиях эксплуатации.
8. Предложены и приняты к внедрению в дивизионе Объединенной двигателестроительной корпорации рекомендации по организации послепродажного обслуживания двигателей с выполнением их восстановления в ЦВИДах и непосредственно на месте базирования авиационной техники.

Публикации по теме диссертации:

1. Панов В.А. и др. Обеспечение соосности опор при модульном ремонте // Двигатель. 2002. №1. С. 38-41.
2. Панов В.А. Диагностика двигателей и устранение выявленных дефектов на месте базирования АТ и в центрах восстановления исправности // Двигатель. 2011. №3. С.24-27.
3. Панов В.А. Виброакустическая диагностика неразборных подшипников при ремонте авиационных двигателей // Двигатель. 2011. №4. С.10-13.
4. Панов В.А. Модульность конструкций авиационных двигателей. Методы достижения модульности конструкции авиационного двигателя на примере конструкции семейства двигателей типа РД-33 // Двигатель. 2011. №5. С.28-32.
5. Панов В.А. Целесообразность внедрения послепродажного обслуживания с введением текущего ремонта двигателей в условиях эксплуатирующей организации и центрах восстановления исправности // Двигатель. 2011. №6. С.12-16.
6. Панов В.А., Стешенко И.Г. Ремонт авиационных двигателей и его концепция в условиях современного производства на заводах изготовителях и в центрах восстановления исправности двигателей // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Тезисы докладов, Самара СГАУ, 2011, часть 2 С. 28-29.
7. Панов В.А., Стешенко И.Г. Ремонт авиационных двигателей и его концепция в условиях современного производства на заводах изготовителях и в центрах восстановления исправности двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. №3 часть 2, С. 16 – 19.