

**САМАРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**
имени академика
С.П. КОРОЛЕВА

*И. М. МАКАРОВСКИЙ,
О. Н. МАТЕЙКО*



**ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ
ТЕХНИКИ**

САМАРА 2001

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА**

И. М. МАКАРОВСКИЙ, О. Н. МАТЕЙКО

**ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие

САМАРА 2001

УДК 629.7.658.58.004

Основы технической эксплуатации авиационной техники:

Учеб. пособие / И.М. Макаровский, О.Н. Матейко. Самар., гос. аэрокосм. ун – т. Самара, 2001. 76 с.

ISBN 5-7883-0166-1

Излагаются теоретические основы технической эксплуатации авиационной техники; рассматриваются свойства ЛА как объектов технического обслуживания и ремонта; методы анализа эффективности и оптимизации процессов технической эксплуатации; стратегии технического обслуживания и ремонта; методы установления ресурсов и периодичности проверок; нормирования значений контролируемых параметров; формирования плана технического обслуживания и ремонта ЛА; порядок перевода изделий на техническую эксплуатацию по состоянию.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 130.300. Разработано на кафедре ЭЛАиД.

Ил. 24. Библиогр.: 4 назв.

Печатается по решению редакционно – издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензент: В.Н. Ш у б и н

ISBN 5-7883-0166-1

© И.М. Макаровский,

О.Н. Матейко, 2001

© Самарский государственный

аэрокосмический университет, 2001

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Общая характеристика системы ТЭ.....	5
2. Современная программа ТЭ.....	8
3. Эксплуатационная надежность АТ.....	12
4. Эксплуатационная технологичность АТ.....	18
5. Эффективность процесса ТЭ.....	21
6. Структура процесса ТЭ.....	25
7. Состояния процесса ТЭ.....	27
8. Оптимизация процесса ТЭ.....	30
9. Стратегии ТО и Р.....	33
10. Стратегия ТО и Р по наработке (ТОНАР).....	35
11. Ресурсы объектов ТОНАР.....	37
12. Стратегия ТО и Р с контролем надежности (ТОСКН).....	41
13. Нормирование надежности объектов ТОСКН.....	43
14. Контроль надежности объектов ТОСКН.....	45
15. Периодичность проверок объектов ТОСКН.....	47
16. Стратегия ТО и Р с контролем параметров (ТОСКП).....	50
17. Изменение ТС объектов ТОСКП с наработкой.....	52
18. Изменение вида ТС объектов ТОСКП с наработкой.....	55
19. Нормирование параметров объектов ТОСКП.....	56
20. Упреждающий допуск на параметры объектов ТОСКП.....	58
21. Периодичность проверок объектов ТОСКП.....	62
22. Программа ТО и Р АТ.....	65
23. Распределение изделий по стратегиям ТО и Р.....	69
24. Порядок перевода изделий на эксплуатацию по техническому состоянию(ЭТС).....	71
Список рекомендуемой литературы.....	75

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное использование ЛА определяется не только уровнем их летно – технических характеристик, но и существенно зависит от внедрения прогрессивных технологий технической эксплуатации (ТЭ). Техническая эксплуатация ЛА представляет собой состояния и процессы:

- функционирования АТ;
- подготовки ЛА к полетам;
- контроля и восстановления свойств АТ.

Осуществляемую в наземных условиях часть указанных процессов и состояний составляют мероприятия, определяемые как техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) АТ.

Основным предназначением ТЭ является обеспечение надежности, исправности и своевременной готовности ЛА к полетам, а также экономичности при проведении работ по ТО и Р. ТЭ включает в себя такие стадии, как техническое обслуживание, ремонт, хранение и транспортирование АТ.

Под влиянием научно – технического прогресса происходит непрерывное совершенствование и усложнение конструкций ЛА, что сказывается на стоимости их разработки и изготовления, а также затратах на проведение ТО и Р. В этих условиях возникает необходимость постоянного совершенствования процесса ТЭ ЛА с целью повышения эффективности их использования и снижения затрат на ТО и Р.

Эффективность процесса ТЭ в общем случае определяется большим числом факторов, действующих при создании и эксплуатации ЛА. Это прежде всего обеспечение требований к надежности и эксплуатационной технологичности конструкций, совершенство программы ТО и Р ЛА, уровень производственно – технической базы эксплуатационных и ремонтных авиапредприятий.

Кардинальная перестройка процессов ТЭ ЛА во многом зависит от успехов в разработке и внедрении современной теории ТЭ на базе имеющихся научных достижений. Ее реализация позволяет одновременно и согласованно выполнять весь комплекс работ по обеспечению приспособленности конструкций ЛА к наиболее эффективным методам ТЭ с целью решения проблемы управления эффективностью процессов ТЭ ЛА.

К числу других прикладных проблем теории ТЭ относится проблема управления техническим состоянием АТ, решение которой неразрывно связано с реализацией прогрессивных стратегий ТО и Р.

Сложные условия и характер задач ТЭ, высокая ответственность за обеспечение безопасности и регулярности полетов диктуют особые требования к инженерно – техническому персоналу, занятому в сфере эксплуатации ЛА. В вопросах реализации эффективных систем ТО и Р ЛА, базирующихся на прогрессивных методах ТЭ и стратегиях ТО и Р, инженер должен быть специалистом высокой квалификации, опирающимся на глубокие знания современной теории ТЭ.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ТЭ

Гражданская авиация (ГА) представляет собой самостоятельную отрасль народного хозяйства, выполняющую все виды летной работы. Сегодня в состав ГА входит большое число разнообразных предприятий и авиакомпаний, объединенных в единую авиационную транспортную систему (АТС). Минимальной структурной единицей АТС, сохраняющей ее основные свойства, является эксплуатационное предприятие, которое рассматривается во взаимодействии с соответствующим авиаремонтным заводом. АТС обладает всеми свойствами, присущими сложным техническим системам, а именно: единством цели, управляемостью, взаимосвязью элементов и иерархической структурой. В силу этого при разработке мероприятий, направленных на ее совершенствование, реализуется системный подход, который требует учета влияния принятых решений на эффективность функционирования как отдельных элементов, так и системы в целом.

Основными требованиями, предъявляемыми к АТС, являются: обеспечение высокой безопасности и регулярности полетов, а также экономичности эксплуатации ЛА. Пригодность системы удовлетворять этим требованиям характеризует ее качество, которое определяется качеством входящих в ее состав элементов, а именно: объектов эксплуатации (ЛА), наземных средств и личного состава, занятого их эксплуатацией.

В состав АТС входит ряд взаимосвязанных систем: летной эксплуатации (СЛЭ), технической эксплуатации (ТЭ), управления воздушным движением (УВД), коммерческой эксплуатации (СКЭ) и аэродромной эксплуатации (САЭ).

Каждой из выделенных систем соответствует свой процесс функционирования (рис. 1): для АТС в целом - процесс эксплуатации (ПЭ), для СЛЭ - процесс летной эксплуатации (ПЛЭ), для СТЭ - процесс технической эксплуатации (ПТЭ) и т.д.

Взаимосвязь между процессами определяется общностью цели - обеспечение высокой эффективности использования ЛА и наличие единого объекта производственной деятельности - ЛА, которые в каждой системе представляются определенной совокупностью своих свойств (летных, технических и т.д.).

Каждый из выделенных процессов характеризуется определенной структурой, т.е. числом различаемых состояний и распределением по ним ЛА.

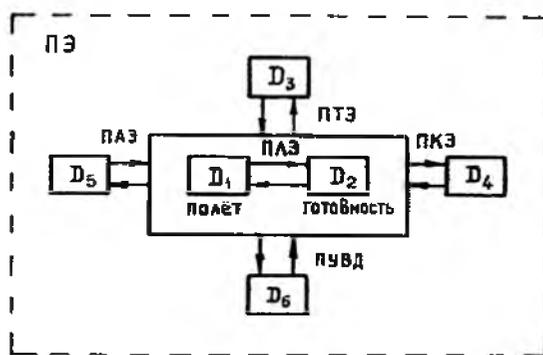


Рис. 1. Структура процесса эксплуатации ЛА:

D_1, D_2 - состояния процесса ЛЭ; D_3 - состояния процесса ТЭ;
 D_4 - состояния процесса КЭ; D_5 - состояния процесса АЭ;
 D_6 - состояния процесса УВД.

Особое место в АТС по степени влияния на эффективность ПТЭ занимает система ТЭ, которая представляет собой совокупность объектов и средств ТЭ, летного и инженерно-технического

состава, а также средств управления ПТЭ, взаимодействующих между собой с целью поддержания и восстановления исправности (работоспособности) и обеспечения летной годности ЛА.

Качество системы ТЭ проявляется при ее функционировании, т.е. в ПТЭ, который представляет собой последовательную во времени смену различных состояний эксплуатации, наступающих в соответствии с принятой стратегией ТО и Р. К состояниям ПТЭ относятся: состояние использования ЛА по назначению (полет, рейс), различные виды и формы ТО и Р, диагностирование, устранение неисправностей, хранение и т.д. Посредством мероприятий, проводимых в ПТЭ, обеспечивается безопасность и регулярность полетов, надежность и исправность ЛА, а также их правильная эксплуатация в полете.

Эффективность ПТЭ определяется его результативностью по обеспечению требуемых уровней безопасности и регулярности полетов, а также эффективного использования ЛА при минимальных эксплуатационных расходах.

В состав системы ТЭ входят (рис. 2): системы летно-технической эксплуатации (СЛТЭ), технического обслуживания и ремонта (СТОР).

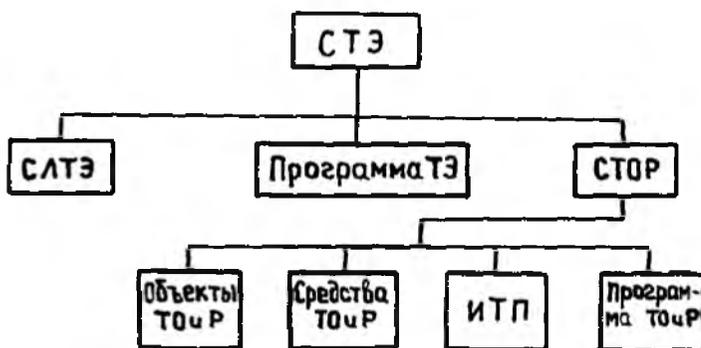


Рис. 2. Структура системы ТЭ ЛА

Система ЛТЭ предназначена для обеспечения эффективной эксплуатации АТ в полете путем выбора и поддержания наилучших режимов ее работы.

Система ТО и Р представляет собой совокупность взаимодействующих объектов, средств и программы ТО и Р, а также инженерно - технического состава, взаимодействующих с целью обеспечения готовности ЛА к полетам и их работоспособности в процессе использования.

Эффективность системы ТО и Р характеризуется способностью выполнять функции по управлению надежностью и долговечностью объектов ТО и Р при минимальных затратах труда, времени и средств. При этом под объектом ТО и Р понимается всякое изделие АТ, нуждающееся в работах по поддержанию или восстановлению исправности (работоспособности) и приспособленное к их выполнению.

Управление системой осуществляется в соответствии с принятой программой ТО и Р, содержащей основные принципы и решения по применению наиболее эффективных методов и стратегий ТО и Р.

Метод ТО и Р представляет собой совокупность правил и норм, определяющих форму организации работ по ТО и Р (закрепленный, бригадный, поэтапный, зонный и т.д.).

Стратегия ТО и Р представляет собой совокупность правил и норм, определяющих управление ТС объектов ТО и Р путем заданного управления ПТЭ.

Средства ТО и Р включают: комплекс наземных сооружений, технологическое оснащение цехов, участков и лабораторий, необходимое для проведения работ по ТО и Р объектов.

2. СОВРЕМЕННАЯ ПРОГРАММА ТЭ

Проблема повышения эффективности использования ЛА на современном этапе развития ГА связывается с высокой себестоимостью воздушных перевозок, а также с дефицитом и высокой стоимостью АТ. Ее решение идет по пути приобретения ЛА, обладающих высокими технико-экономическими характеристиками, а также совершенствования системы ТЭ.

В общем случае уровень совершенства системы ТЭ определяется степенью взаимодействия между объективно существующим процессом изменения ТС объектов и процессом их ТЭ.

Традиционная система ТЭ базируется на методах и стратегиях ТО и Р, требующих выполнения заданных объемов профилактических и восстановительных мероприятий через заранее запланированные интервалы времени (наработки). При этом практически не учитываются изменения ТС объектов в процессе эксплуатации, что в конечном итоге ведет к длительным простоям ЛА на ТО и Р, а также к снижению уровня надежности (безотказности) изделий из-за необходимости проведения большого объема демонтаж-но-монтажных работ.

Повышение эффективности ПТЭ при этом достигается путем реализации стратегий ТО и Р по состоянию, которые позволяют осуществить перевод изделий на безресурсную эксплуатацию, т.е. на эксплуатацию по техническому состоянию (ЭТС).

В условиях ЭТС большая часть работ по ТО и Р (более 75%) выполняется по результатам диагностирования, т.е. по технической необходимости. В результате удается существенно сократить простои ЛА на ТО и Р, снизить трудоемкость и стоимость работ, а также повысить уровень надежности (безотказности) изделий.

Необходимость перевода АТ на ЭТС диктуется наличием объективно протекающего процесса накопления повреждений в элементах конструкции. Начальный запас работоспособности изделий постепенно исчерпывается, что ведет к повышению интенсивности возникновения отказов. В этих условиях для поддержания требуемых уровней надежности необходимо проводить корректировку режимов ТО и Р, т.е. периодичностей и объемов выполняемых работ.

Комплекс работ по ТО и Р можно условно разделить на планово-предупредительные (профилактические) и восстановительные. Профилактические работы (контроль ТС объектов, замена отработавших ресурс агрегатов, смазка, промывка фильтров и т.д.) направлены на предупреждение отказов и неисправностей. Они выполняются в установленных объемах через заранее запланированные интервалы наработки и наиболее характерны для технологических процессов ТО, т.е. для эксплуатационных предприятий (АТБ). Восстановительные работы (устранение неисправностей, восстановление поврежденных элементов и т.д.) направлены на устранение накопленных повреждений и выпол-

няются по технической необходимости. Они наиболее характерны для технологических процессов капитального ремонта АТ, выполняемого силами специализированных авиаремонтных предприятий (АРЗ).

В зависимости от принятых критериев оптимальности ПТЭ между объемами профилактических и восстановительных работ могут быть различные соотношения. Анализ действующих технологических процессов ТО и Р, в особенности тяжелых транспортных самолетов (Ил-62, Ту-154, Ил-86, Ил-76 и т.д.), указывает на отсутствие между ними принципиальных различий как по характеру, так и по объемам выполняемых работ. На долю восстановительных операций при капитальном ремонте ЛА и двигателей сегодня приходится до 25% от общего объема работ, а остальные носят профилактический характер.

При ТО наряду с профилактическими операциями сегодня выполняется большой объем восстановительных работ, доля которых по мере укрепления материально-технической базы эксплуатационных предприятий постоянно возрастает. Таким образом, можно говорить о том, что на практике идет сближение технологических процессов ТО и Р. На это указывает и опыт ведущих зарубежных авиакомпаний, которые выполняют большую часть восстановительных операций непосредственно в условиях эксплуатации силами авиакомпаний и фирм-изготовителей АТ.

Существующая в ГА практика деления работ на ТО и Р во многом обусловлена слабой материально-технической базой эксплуатационных предприятий (АТБ) и устаревшей программой ТЭ.

Современная программа ТЭ, направленная на повышение эффективности ПТЭ, была разработана и успешно прошла проверку на ограниченном парке ЛА в начале 80-х годов. Она предусматривает поэтапный перевод на ЭТС всей эксплуатируемой и вновь создаваемой АТ, начиная с отдельных комплектующих изделий, кончая функциональными системами и ЛА в целом. Программой определены основные направления совершенствования системы ТЭ (рис. 3) и основные принципы формирования программы ТО и Р.

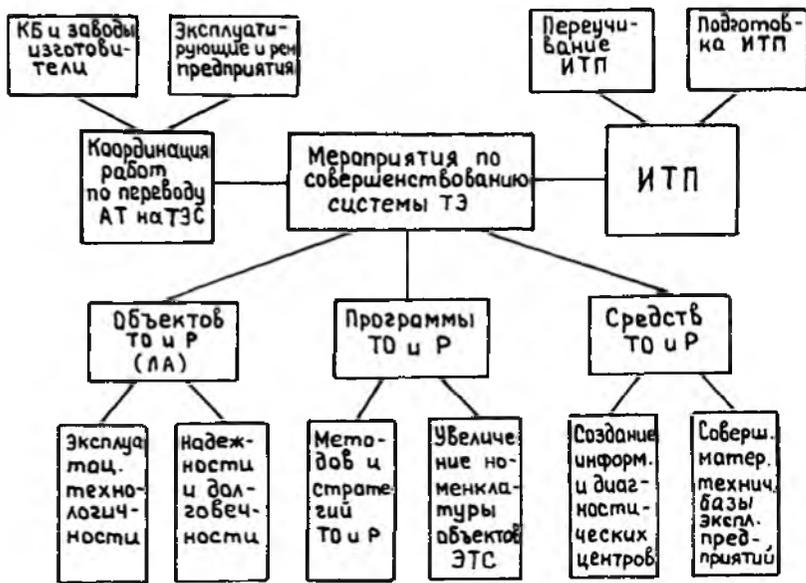


Рис. 3. Мероприятия по совершенствованию системы ТЭ ЛА

К ним, в частности, относятся следующие принципы:

- профилактические мероприятия планируются только для тех объектов, на которых с высокой вероятностью можно ожидать возникновение отказов, предупреждаемых путем введения профилактики;
- профилактические мероприятия не планируются для объектов, ТС которых постоянно контролируется в полете, отказ которых не приводит к возникновению аварийных ситуаций и носит внезапный, не поддающийся прогнозированию характер;
- восстановительные мероприятия проводятся в случаях, когда основные параметры объекта выходят за установленные границы (допуски) и, по возможности, совмещаются с периодическими формами ТО;
- капитальные ремонты выполняются по дифференцированному методу (по отдельным блокам, системам, агрегатам с учетом их ТС и наработки).

Программой предусматривается проведение комплекса мероприятий, направленных на повышение уровня эксплуатационной технологичности (ЭТ) и контролепригодности АТ, развитие служб диагностики и информационного обеспечения и переучивание инженерно-технического состава и другие. Для реализации программы создан координационный центр (ГосНИИ ГА), который призван обеспечить взаимодействие всех заинтересованных организаций (КБ, НИИ, заводов - изготовителей АТ, эксплуатирующих и ремонтных предприятий).

3. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ АТ

Важнейшим показателем, характеризующим эффективность системы ТО и Р, является уровень эксплуатационной надежности АТ, который во многом определяет безопасность и регулярность полетов, величину годового налета, а также величину эксплуатационных расходов. Надежность изделий закладывается на стадиях проектирования, изготовления и доводки, а реализуется в процессе их эксплуатации. Основными факторами, определяющими уровень эксплуатационной надежности изделий, являются качество изготовления, ТО и Р, характер летной работы, условия хранения и транспортировки.

В силу случайного характера внешних воздействий интенсивность возникновения отказов, даже у однотипных изделий, имеет существенные различия. Поэтому при проведении расчетов, связанных с оценкой надежности и установлением ресурсов, обычно прибегают к теории вероятностей и математической статистики. При этом используются данные эксплуатации большого числа однотипных изделий.

В теории надежности объекты разделяются на невосстанавливаемые и восстанавливаемые. Невосстанавливаемыми считаются объекты, работоспособность которых при возникновении отказа не может быть восстановлена силами эксплуатационного предприятия. Поэтому они подлежат снятию с эксплуатации и отправке в капитальный ремонт (списанию). Восстанавливаемыми считаются объекты, работоспособность которых в случае возникновения отказа может быть восстановлена в условиях эксплуатации путем замены или ремонта отказавших элементов.

К невосстанавливаемым объектам относится большая часть комплектующих изделий (детали и узлы конструкций, агрегаты функциональных систем, элементы радио- и электрооборудования и т.д.), а к восстанавливаемым - функциональные системы (топливная, масляная и гидросистема), а также некоторые агрегаты (колеса шасси, фильтры т.д.).

Под отказом объекта в общем случае понимается событие, заключающееся в утрате работоспособности в процессе функционирования. Работоспособность объекта при этом характеризуется способностью выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в установленных пределах (допусках).

Основным показателем надежности невосстанавливаемых объектов служит безотказность - свойство сохранять работоспособность в течение заданного времени (наработки) при условии соблюдения заданных правил эксплуатации.

Основным показателем надежности восстанавливаемых объектов служит долговечность - способность сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при заданной системе восстановительных мероприятий (ремонтов). При этом под предельным понимается состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация невозможна из-за неустранимого ухода параметров или нецелесообразна из-за недопустимого снижения эффективности использования. Признаки предельного состояния устанавливаются индивидуально для каждого изделия.

Отказы объектов делятся на внезапные и постепенные, физические и параметрические. Внезапные отказы характеризуются коротким (соизмеримым с одним циклом нагружения) периодом развития и постоянной интенсивностью возникновения с наработкой. Как правило, они являются следствием попадания изделий (обычно наиболее слабых экземпляров) в экстремальные (нерасчетные) условия нагружения. В ряде случаев внезапные отказы являются конечной стадией развития постепенных отказов, связанных с эксплуатационными повреждениями конструкций, картина развития которых недоступна для наблюдения.

Постепенные отказы объектов характеризуются длительным (соизмеримым с общим сроком службы) периодом развития

и возрастающей интенсивностью возникновения с наработкой. Постепенным отказам подвержены практически все изделия АТ. Причиной их возникновения, как правило, являются скрытые производственные дефекты, а также разнообразные эксплуатационные повреждения конструкций.

При этом под "дефектом" понимается каждое отдельное несоответствие свойств изделия требованиям нормативно-технической документации, а под "повреждением" - событие, заключающееся в изменении свойств изделия вследствие недопустимых эксплуатационных воздействий. При наличии одного или нескольких дефектов возникает неисправность - состояние изделия, при котором оно не отвечает всем требованиям исправности. Одна и та же неисправность может быть следствием различных дефектов. Так, падение давления масла может произойти вследствие зависания редукционного клапана, износа деталей насоса, снижения вязкости масла и т.д.

Основными показателями надежности невосстанавливаемых объектов являются:

- $P(t)$ - вероятность безотказной работы за наработку t ;
- $\lambda(t)$ - интенсивность отказов в момент t ;
- $f(t)$ - плотность вероятности отказов в момент t ;
- t_{cp} - средняя наработка до отказа;
- σ - среднее квадратическое отклонение (СКО) наработки до отказа.

Для восстанавливаемых изделий основными показателями надежности являются:

- T_o - наработка на отказ;
- $\omega(t)$ - параметр потока отказов в момент t ;
- K_{1000} - число отказов на 1000 часов наработки;
- $P(t_1, t_2)$ - вероятность безотказной работы в интервале наработки t_1, t_2 .

При большом объеме статистических данных расчет показателей надежности может проводиться по формулам

$$P(t) = N(t) / N_o = 1 - n(t) / N_o,$$

где $N_o, N(t), n(t)$ - число объектов, поступивших в эксплуатацию, неотказавших и отказавших к моменту t ;

$$\lambda(t) = n(\Delta t) / N(t) \Delta t,$$

где $n(\Delta t)$ - число изделий, отказавших на интервале наработки Δt ;

$$f(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t,$$

$$t_{cp} = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) / n,$$

где t_i - наработка i -го объекта до отказа;
 n - число отказавших объектов;

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2 / (n-1)},$$

$$\omega(t) = m(\Delta t) / N \cdot \Delta t_i,$$

где $m(\Delta t)$, N - суммарное число отказов и число объектов, находившихся в эксплуатации в интервале Δt ;

$$P(t_1, t_2) = P(\tau) = 1^{-\omega \cdot \Sigma} \text{ при } \omega(t) = \omega = \text{const},$$

$$K1000 = \frac{m_{\Sigma}}{T_{\Sigma}} \cdot 1000 = \omega(t) \cdot 1000,$$

где m_{Σ} , T_{Σ} - суммарное число отказов и суммарная наработка объектов за рассматриваемый период эксплуатации.

При решении задач, связанных с определением причин возникновения отказов и установлением безопасных сроков эксплуатации (ресурсов), особый интерес представляет знание закона распределения наработки объектов до отказа. В теории надежности рассматривается ряд законов (экспоненциальный, нормальный, Вейбулла и др.), каждый из которых является отображением определенных закономерностей возникновения и развития отказов. На практике наиболее часто встречаются экспоненциальное и нормальное распределения.

Экспоненциальное распределение характеризуется постоянной интенсивностью отказов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, характерно для

внезапных отказов. Графики параметров $P(t)$, $\lambda(t)$ и $f(t)$ для экспоненциального распределения представлены на рис. 4.

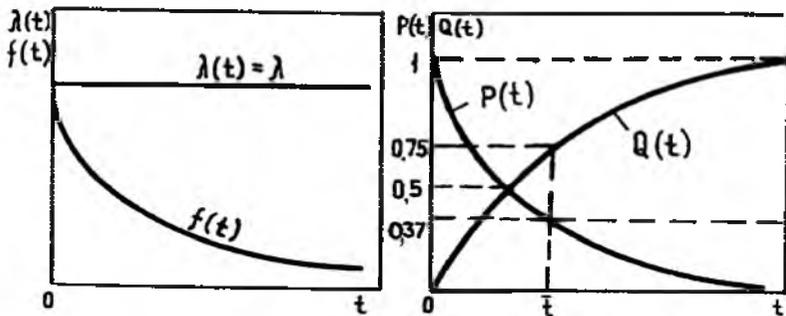


Рис. 4. Экспоненциальное распределение наработки до отказа

Вероятность безотказной работы объекта в случае экспоненциального распределения рассчитывается по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = e^{-\lambda t}$$

где $Q(t)$ - вероятность отказа объекта за наработку t .

Нормальное распределение характеризуется ростом интенсивности отказов с наработкой и специфической формой кривой плотности вероятностей (рис. 5).

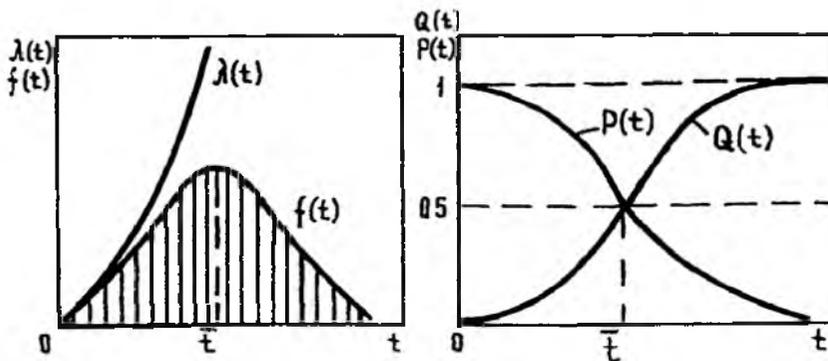


Рис. 5. Нормальное распределение наработки до отказа

Данное распределение характерно для постепенных отказов. Вероятность безотказной работы объектов при нормальном распределении обычно рассчитывается с использованием табличных значений интеграла вероятностей:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \Phi^* \left\{ \frac{t - t_{cp}}{\sigma} \right\} = 1 - \Phi^* \{ U_q \},$$

где U_q - квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности отказа q .

С использованием квантилей могут проводиться различные расчеты, связанные с оценкой надежности объектов. Так, например, наработка t_p , при которой обеспечивается заданный уровень безотказности $P_{зад}$, рассчитывается по формуле

$$P(t_p) = 1 - \Phi^* \left\{ \frac{t_p - t_{cp}}{\sigma} \right\} P_{зад} = 1 - q_{доп} = 1 - \Phi^* \{ U_{q_{доп}} \},$$

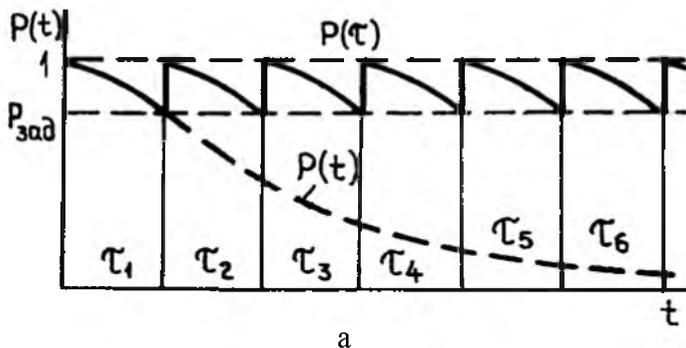
или
$$\frac{t_p - t_{cp}}{\sigma} = U_{g_{доп}},$$

откуда
$$t_p = t_{cp} - U_{q_{доп}} \sigma,$$

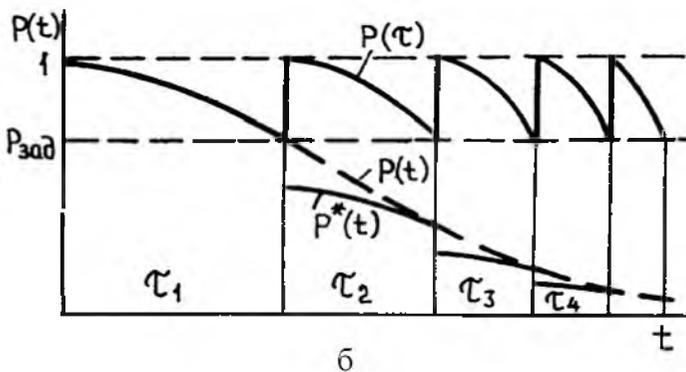
где $q_{доп}$ - допустимая вероятность отказа объекта.

При введении периодических проверок ТС объектов с устранением накопленных повреждений (профилактики) удается поддерживать заданный уровень надежности (безотказности) изделий в течение заданных сроков эксплуатации. Характер изменения эксплуатационной надежности $P(\tau)$ при этом имеет вид "пилы" (рис. 6) с максимумами $P(\tau) = 1$ непосредственно после проведения проверок (восстановления) и минимумами $P(\Sigma) = P_{зад}$ к моменту очередной проверки.

Если восстановление объектов не проводится, то поддержание надежности достигается за счет снятия с эксплуатации объектов, находящихся в предотказном состоянии. Характер изменения надежности при этом будет также иметь вид пилы с максимумами $P(\tau) = 1$ и минимумами $P(\tau) = P_{зад}$, но для этого придется прибегать к сокращению периодичности проверок с наработкой. Периодичность проверок τ при этом зависит от заданного уровня безотказности $P_{зад}$, скорости развития отказов, надежности контроля и других факторов.



а



б

Рис. 6. Характер изменения эксплуатационной надежности для невосстанавливаемых (а) и восстанавливаемых (б) объектов при введении периодических проверок

4. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ АТ

Повышение эффективности использования ЛА связывается с переводом изделий на ЭТС. Возможности данного метода во многом зависят от уровня их эксплуатационной технологичности (ЭТ). Под ЭТ понимается совокупность свойств изделий, определяющих приспособленность их конструкций к проведению работ

по ТО и Р. Такие свойства изделий закладываются на стадиях их макетной проработки и совершенствуются путем доработки конструкции в процессе эксплуатации. Работы по обеспечению ЭТ изделий ведутся в соответствии с "Общими техническими требованиями к эксплуатационной технологичности пассажирских самолетов". Они включают в себя конкретные указания по обеспечению контролепригодности, приспособленности к устранению неисправностей и проведению работ по ТО и Р. Требования формируются с учетом реализации прогрессивных методов и стратегий ТО и Р.

В процессе эксплуатации проводятся оценки ЭТ изделий, целью которых является разработка мероприятий, направленных на совершенствование конструкций с учетом изменений в организации и технической оснащенности технологических процессов ТО и Р. При проведении оценок используется ряд обобщенных и единичных показателей (рис. 7).

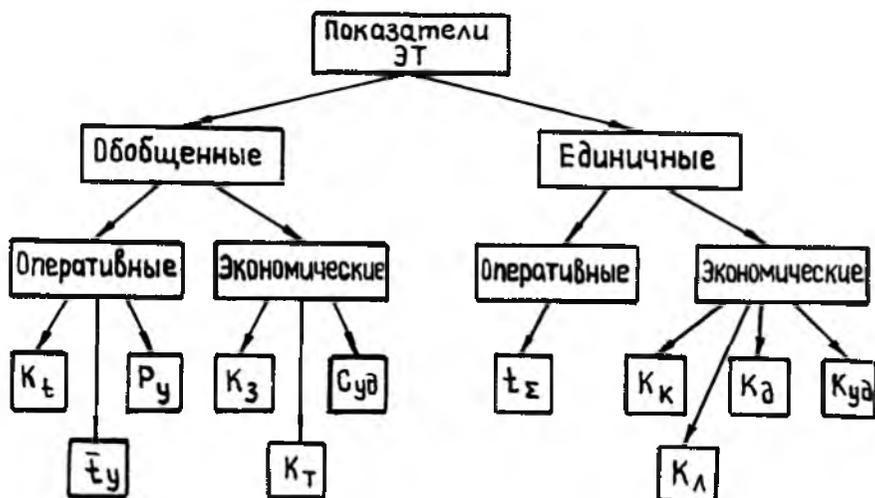


Рис. 7. Структура показателей ЭТ

Обобщенные показатели характеризуют изделие со стороны затрат труда, времени и средств на выполнение типовых работ по ТО и Р. К ним, в частности, относятся показатели:

- K_t - удельная продолжительность ТО и Р, ч/ч налета;
- t_y - среднее время устранения отказов, ч;

P_y - вероятность устранения отказов за заданное время;
 K_t - удельная трудоемкость ТО и Р, чел-ч/ч налета;
 $C_{уд}$ - удельная стоимость То и Р, руб/ч налета;
 K_3 - удельная стоимость запасных частей и другие.

Обобщенные показатели рассчитываются на основе статистических данных эксплуатации парка однотипных ЛА.

Так, показатели K_t , t_y и P_y вычисляются по формулам

$$K_t = (t_o + t_{п} + t_{кр}) / t_{мр},$$

где t_o , $t_{п}$, $t_{кр}$ - суммарная продолжительность пребывания на оперативных и периодических формах ТО, а также в капитальном ремонте, ч;

$t_{мр}$ - величина межремонтного ресурса, ч;

$$P_y = 1 - e^{-\lambda \cdot t_{дир}},$$

где $t_{дир}$ - директивное время устранения отказов, ч;

$\lambda = 1 / t_y$ - интенсивность устранения отказов, 1/ч.

Единичные показатели характеризуют изделие со стороны приспособленности к выполнению работ по ТО и Р. К ним, в частности, относятся показатели (коэффициенты):

K_d - доступности; K_l - легкосъемности; $K_{уд}$ - удобства работ;

K_k - контролепригодности; t_s - суммарного времени выполнения целевой операции и другие.

Единичные показатели рассчитываются на основе данных хронометража работ целевой операции ТО и Р (замена колеса, промывка фильтра, смена двигателя и т.д.). Так, показатели K_d и K_l вычисляются по формулам

$$K_d = 1 - T_{доп} / (T_{доп} + T_{осн}),$$

где $T_{доп}$, $T_{осн}$ - трудоемкости дополнительных и основных работ, чел-ч;

$$K_l = 1 - T_{доп} / (T_{доп} + T_{дм}) \quad \text{или} \quad K_l = 1 - \Delta T_{дм} / T_{дм},$$

где $T_{дм}$ - трудоемкость демонтажно-монтажных работ, чел.-ч;

$\Delta T_{\text{дм}}$ - превышение фактической трудоемкости демон-
тажно-монтажных работ над их нормативными значе-
ниями для данного изделия, чел. -ч.

Оценка ЭТ проводится раздельно по каждому показателю с
использованием относительного показателя D_i :

$D_i = K_i^* / K_i$ - для показателей K_t , t_y , $C_{\text{уд}}$ и других;

$D_i = K_i / K_i^*$ - для показателей P_y , K_d , K_k , K_l и других,

где K_i , K_i^* - фактическое и нормативное значения i -го пока-
зателя.

Значение K_i^* устанавливается с учетом требований к эффек-
тивности процесса ТЭ и показателей ЭТ лучших образцов отече-
ственной и зарубежной АТ.

Изделие считается технологичным, если выполняется усло-
вие $D_i > 1$ по всем показателям. В противном случае разрабаты-
ваются мероприятия, направленные на совершенствование его
конструкции.

Эффективность мероприятий по совершенствованию ЭТ
изделий оценивается по изменению значений соответствующих
показателей.

5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТЭ

Техническая эксплуатация представляет собой совокуп-
ность состояний, связанных с использованием ТО и Р, а также
подготовкой ЛА к вылетам. Последовательная во времени смена
состояний эксплуатации образует процесс технической эксплуа-
тации (ПТЭ). К нему предъявляются высокие требования по
обеспечению безопасности полетов и регулярности вылетов, ин-
тенсивности и экономичности использования ЛА. По степени со-
ответствия этим требованиям судят об эффективности процесса.

Проблема обеспечения высокой эффективности ПТЭ носит
комплексный характер. В силу этого при разработке мероприя-
тий, направленных на совершенствование процесса, необходимо
учитывать влияние принятых решений на все его показатели.

Так, например, с целью повышения интенсивности использования ЛА обычно прибегают к разработке мероприятий, направленных на сокращение простоев ЛА на ТО и Р, что в конечном итоге может привести к снижению безопасности полетов.

Эффективность ПТЭ оценивается с использованием ряда показателей, характеризующих уровень безопасности полетов, регулярность вылетов, интенсивность и экономичность использования ЛА, а также затраты труда, времени и средств на проведение ТО и Р. В зависимости от поставленной задачи предпочтение отдается той или иной группе показателей. Так, при оценке эффективности использования ЛА применяются показатели, характеризующие время их пребывания в различных состояниях ПТЭ.

При проведении анализов эффективности ПТЭ, как правило, выделяют до 25 типовых состояний (рейс, предрейсовая подготовка, устранение неисправностей, простои в исправном состоянии и т.д.), каждому из которых присваивается соответствующий индекс (К, Е, У, А и т.д.).

Для углубленного анализа ПТЭ парк ЛА разделяют на три группы. В первую группу включают ЛА, находящиеся в рейсе и на оперативном техническом обслуживании (состояния К, Г, А, М, Е, У, Об, Тб). Она охвачена процессом Q1, эффективность которого характеризует производственную деятельность оперативных цехов АТБ. Вторая группа включает ЛА, отнесенные к первой группе, а также находящиеся на периодическом ТО (состояния Оп, Тп, Ш, З, Дв, Ж, Жр, Д, В, С). Она охвачена процессом Q2, эффективность которого характеризует производственную деятельность эксплуатационного предприятия (АТБ) в целом. Третья группа дополняется ЛА, находящимися в капитальном ремонте (состояния Ор и Р). Эффективность соответствующего процесса Q3 характеризует совершенство системы ТЭ (эксплуатационного и ремонтного предприятий) в целом.

Оценки эффективности ПТЭ проводятся отдельно для каждого типа ЛА и уровня организационной структуры (Q1, Q2, Q3) в масштабах одного эксплуатационного предприятия (АТБ). Периодичность проведения оценок зависит от потребностей в результатах анализа (сутки, декада, месяц, квартал, год).

Оценки базируются на статистических данных, содержащихся в учетно-отчетной документации АТБ (диспетчерском графике ПДО).

На первом этапе вычисляются значения единичных показателей π_i и μ_i для каждого из выделенных состояний. Расчет ведется по формулам

$$\pi_i = n_i / \sum_{j=1}^N n_j,$$

где π_i - частота попадания ЛА в i -е состояние;

n_i - число попаданий в i -е состояние;

n_j - число попаданий в j -е состояние;

N - общее число выделенных состояний;

$$\mu_i = t_i / n_i,$$

где μ_i - среднее время пребывания ЛА в i -м состоянии, ч;

t_i - общее время пребывания ЛА в i -м состоянии, ч.

На втором этапе с использованием значений единичных показателей вычисляются значения обобщенных показателей:

$$K_{ин} = \pi_{п}^* \cdot \mu_{п} / \sum_{j=1}^N \pi_j^* \mu_j,$$

где $K_{ин}$ - показатель использования ЛА по назначению (в полете);

$\pi_{п}$, $\mu_{п}$ - частота попаданий и среднее время пребывания ЛА в полете (П);

$$K_{ир} = \pi_{к}^* \cdot \mu_{к} / \sum_{j=1}^N \pi_j^* \mu_j,$$

где $K_{ир}$ - показатель использования ЛА в рейсах;

$\pi_{к}$, $\mu_{к}$ - частота попаданий и среднее время пребывания ЛА в рейсе (К);

$$K_{ви} = \left(\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s^* \cdot \mu_s \right) / \sum_{j=1}^N \pi_j^* \mu_j,$$

где $K_{ви}$ - показатель возможного использования ЛА (готовности);

π_s, μ_s - частота попаданий и среднее время пребывания ЛА в исправных состояниях (К, Е, Г, А, М);
 N_s - число выделенных исправных состояний;

$$K_{\text{ши}} = \left(\sum_{r=1}^{N_r} \pi_r^* \mu_r \right) / \pi_{\text{п}}^* \mu_{\text{п}},$$

где $K_{\text{ши}}$ - показатель удельных простоев исправных ЛА, ч/ч полета;

π_r, μ_r - частота попаданий и среднее время пребывания в исправных (кроме К) состояниях;

N_r - число выделенных исправных состояний (кроме К);

$$K_{\text{пр}} = (\mu_k - \mu_{\text{п}}) / \mu_{\text{п}},$$

где $K_{\text{пр}}$ - показатель удельных простоев ЛА при выполнении рейсов, ч/ч налета;

$$K_{\text{пт}} = \left(\sum_{l=1}^{N_l} \pi_l^* \mu_l \right) / \pi_{\text{п}}^* \mu_{\text{п}},$$

где $K_{\text{пт}}$ - показатель удельных простоев ЛА в состояниях ТО и Р;

π_l, μ_l - частота попадания и среднее время пребывания ЛА в состояниях ТО и Р;

N_l - число состояний ТО и Р.

Оценка эффективности ПТЭ проводится с использованием относительных показателей $K_i^{//}$, значения которых вычисляются по формулам

$$K_i'' = K_i^* \cdot 100\% / K_i \text{ баз} - \text{ для показателей } K_{\text{ин}}, K_{\text{ир}} \text{ и } K_{\text{ви}};$$

$$K_i'' = K_i \text{ баз}^* \cdot 100\% / K_i - \text{ для показателей } K_{\text{ши}}, K_{\text{пт}} \text{ и } K_{\text{пр}},$$

где $K_i, K_i \text{ баз}$ - расчетные и базовые (нормативные) значения анализируемых показателей.

В качестве $K_i \text{ баз}$ обычно принимается значение соответствующего показателя за предшествующий период эксплуатации или за период, предшествующий проведению мероприятий по совершенствованию ПТЭ.

Значения $K_i < 100\%$ свидетельствуют о недостаточной эффективности ПТЭ по соответствующему показателю и необходимости проведения мероприятий по его совершенствованию.

6. СТРУКТУРА ПРОЦЕССА ТЭ

Под структурой ПТЭ понимается совокупность состояний эксплуатации и распределение ЛА по этим состояниям. Она характеризуется количеством выделяемых состояний, средним временем пребывания в них ЛА, а также частотами (вероятностями) попадания ЛА и переходов в различные состояния процесса. Структура зависит от типа ЛА, характера летной работы, совершенства организации и технической оснащённости ПТЭ.

Анализ структуры ПТЭ, как и анализ его эффективности, проводится с целью вскрытия и рационального использования резервов производства и, в частности, разработки мероприятий, направленных на повышение эффективности использования ЛА. Он ведется с использованием графической модели процесса, получившей название "Граф состояний и переходов ПТЭ". Модель наглядно иллюстрирует структуру процесса и позволяет проводить ее целенаправленную корректировку.

Построение модели проводится на основе статистических данных об использовании ЛА, содержащихся в отчетно-учетной документации АТБ (диспетчерском графике ПДО). Частоты (вероятности) переходов ЛА из одних состояний в другие π_{ik} и π''_{ik} вычисляются по формулам

$$\pi_{ik} = N_{ik} / N_i,$$

$$\pi''_{ik} = \pi_i * \pi_{ik},$$

где π_{ik} , π''_{ik} - абсолютная и относительная частоты переходов ЛА из i -го в k -е состояние;

N_{ik} , N_i - число попаданий в i -е состояние из k -го состояния и общее число попаданий в k -е состояние.

Полученные данные сводятся в таблицу "Матрица частот переходов ПТЭ", которая представляет собой математическую модель структуры ПТЭ.

В начальную вершину графа вводится целевое состояние процесса (рейс), а затем в вершины графа вводятся и остальные состояния. Вершины соединяются стрелками (ребрами) в соответствии с матрицей. Над ребрами проставляются частоты переходов π_{ik} и π''_{ik} , а у вершин - параметры состояний π_i и μ_i (рис. 8).

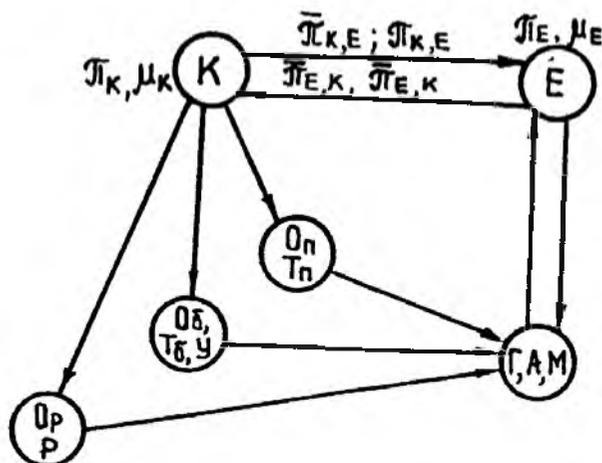


Рис. 8. Укрупненная модель процесса ТЭ (Q3)

При разработке мероприятий, направленных на повышение эффективности ПТЭ, выделяются доминирующие состояния и переходы, имеющие наиболее высокие значения параметров π_i , μ_i и π''_{ik} , а также состояния и переходы, параметры которых ухудшились за отчетный период. Начиная с доминирующих состояний и переходов, проводится инженерный анализ причин снижения эффективности ПТЭ. По результатам анализа разрабатываются мероприятия, направленные на совершенствование структуры процесса.

Сущность мероприятий заключается в разработке организационных и технических решений, направленных на сокращение "вынужденных" простоев и "лишних" переходов. Так, например, с целью сокращения простоев ЛА в ожидании запасных частей и двигателей (З, Дв) может быть предложена автоматизированная система учета и планирования материально - технического

снабжения авиапредприятия; для сокращения простоев на устранении неисправностей (У) - автоматизированная система диагностирования, обеспечивающая оперативное выявление неисправностей; для сокращения простоев в состояниях ТО и Р - автоматизированная система контроля (АСК), обеспечивающая проведение проверок ТС изделий до начала выполнения работ и т.д.

Эффективность планируемых мероприятий оценивается по изменению соответствующих показателей ПТЭ, с учетом ожидаемых параметров доминирующих состояний и переходов.

7. СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ТЭ

Состоянием ПТЭ называется исход некоторого события, приведшего к его возникновению. Так, например, если событие заключается в проверке ТС объекта, то его исходами (состояниями) могут быть: использование объекта по назначению, устранение неисправности, замена и т.д.

Время пребывания объекта в состояниях процесса является величиной случайной и зависит от совокупного влияния различных факторов (потребностей в использовании ЛА, наличия свободных бригад, запасных частей и др.).

Так, например, время нахождения ЛА в полете при выполнении рейса зависит от протяженности трассы, высоты и скорости полета, состояния атмосферы, надежности работы систем ЛА, количества промежуточных посадок, времени обслуживания в транзитных аэропортах и т.д. Время устранения неисправности зависит от времени поиска и замены отказавшего элемента, наличия запасных частей и т.д.

На основе статистических данных для каждого состояния ПТЭ может быть определена средняя продолжительность пребывания, частота (вероятность) попадания, а также закон распределения времени пребывания в нем ЛА. Они используются для прогнозирования длительностей различных состояний при корректировке ПТЭ.

В общем случае ПТЭ можно представить достаточно большим числом состояний, которые по характеру выполняемых ра-

бот можно условно разделить на 4 группы: состояния использования ЛА по назначению (в полете, в рейсе); состояния готовности (простой в исправном состоянии, задержки по метеоусловиям, в резерве); состояния ожидания (ожидание ОТО и ПТО, ремонта, запасных частей, списания и т.д.) и состояния ТО и Р (ОТО, ПТО, замена двигателей, восстановление после ЛП, доработка конструкции и т.д.).

Состояния использования по назначению (П, К) включают все время нахождения исправных ЛА вне базового аэропорта. Время нахождения ЛА в рейсе зависит от протяженности трассы, количества промежуточных посадок и других факторов. Каждому рейсу соответствует некоторое среднее время нахождения в нем ЛА, которое составляет от 1 до 130 часов при частоте попадания в рейс от 0,15 до 0,35. Время нахождения ЛА в рейсе исчисляется с момента взлета до момента посадки в базовом аэропорту по завершении рейса. Налет ЛА за рейс исчисляется путем суммирования общего времени нахождения ЛА в полете.

Состояния готовности (Г, А, М) включают все время нахождения исправных ЛА в базовом аэропорту. В состоянии готовности ЛА обычно попадают после проведения ТО. Время нахождения в состояниях готовности исчисляется с момента окончания ТО и заканчивается в момент взлета ЛА. Оно зависит от расписания полетов, оснащения ВПП, организации полетов и т.д. Частота попаданий в эти состояния для большинства транспортных самолетов обычно составляет от 0,05 до 0,15, а среднее время пребывания - от 1 до 14 часов.

Состояния ожидания (Об, Оп, Ор и т.д.) включают все время простоя ЛА в базовом аэропорту в ожидании ТО и Р, списания, запасных частей и т.д. Время ожидания зависит от многих факторов и прежде всего от наличия свободных бригад для проведения работ, организации технологических процессов ТО и Р и т.д. Во всех случаях прибывающие на ТО и Р ЛА ставятся в очередь, где находятся случайное время, которое исчисляется с момента посадки (постановки в очередь) до момента начала работ. Частота попаданий в состояния ожидания обычно составляет от 0,05 до 0,15 и зависит от типа ЛА, вида ТО и Р, количества стоянок, средств заправки, буксировки и т.д. Среднее время нахождения ЛА в состояниях ожидания составляет от 1 до 25 часов.

Состояния ТО и Р (Тб, Тп, Р и т.д.) относятся к числу наиболее посещаемых состояний ПТЭ. Около половины годового фонда времени ЛА простаивают на оперативном и периодическом ТО, а также в капитальном ремонте.

Оперативное ТО (ОТО) включает предполетное и послеполетное обслуживание, а также обслуживание при кратковременной стоянке (КВС). Время нахождения ЛА в состояниях ОТО исчисляется с момента посадки ЛА до момента подписания карты-наряда инженером смены. Оно содержит постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая определяется в основном объемами типовых регламентных работ (осмотр, заправка, слив отстоя и т.д.), а переменная - объемом работ по поиску и устранению неисправностей, выявленных в полете. Переменная составляющая, в отличие от постоянной, характеризуется значительными разбросами объемов и времени выполнения работ. Время пребывания ЛА в состояниях ОТО обычно нормируется и составляет от 40 минут (КВС) до 5 часов (Ф-Б).

Периодическое ТО (ПТО) также содержит постоянную (дефектация, мойка, смазка, проверка работоспособности и т.п.) и переменную (устранение неисправностей, замена и регулировка агрегатов и т.д.) составляющие. Однако, в отличие от ОТО, объем переменной составляющей ПТО обычно значительно меньше постоянной. Объем работ и периодичность ПТО зависят от типа ЛА, его потребностей в ТО и Р, а также от уровня совершенства технологических процессов ТО и Р. Время пребывания ЛА в состояниях ПТО обычно нормируется и составляет от 10 часов (Ф-1) до 75 часов (Ф-3).

Время нахождения ЛА в капитальном ремонте (Р) характеризуется значительной продолжительностью (от месяца до года), а частота попаданий в ремонт относительно мала (около 0,002) и зависит от типа ЛА, формы ремонта и совершенства его технологического процесса. В силу этого время пребывания ЛА в ремонте слабо влияет на показатели эффективности ПТЭ. Время пребывания в ремонте исчисляется с момента вылета на ремонтный завод до момента посадки ЛА в базовом аэропорту после ремонта.

8. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЭ

Эксплуатация ЛА сопровождается протеканием двух взаимосвязанных процессов: объективного, заключающегося в изменении ТС изделий под воздействием внешних факторов, и субъективного, заключающегося в использовании ЛА по назначению (ПТЭ). Оба процесса носят дискретный характер, так как имеет место мгновенный переход объектов из одних состояний в другие. В силу взаимосвязанности процессов, состояния ПТЭ назначаются в некотором соответствии с возникающими ТС (исправен - в полет, неисправен - на ТО и т.д.). С другой стороны, ТС возникают в зависимости от назначения состояний ПТЭ (ТО - неисправен, Р - неисправен и т.д.).

Управление ПТЭ, направленное на предупреждение отказов и неисправностей, осуществляется в соответствии с принятой стратегией ТО и Р объекта. Выбор стратегий зависит от типа объекта и его потребностей в ТО и Р, технических возможностей системы ТЭ и т.д.

В общем случае управляющее воздействие Y_j , определяющее попадание объекта в определенное состояние ПТЭ, формируется в зависимости от величины отклонения X_i регулирующего параметра X от его нормативного значения X'' :

$$Y_j = f(X'' - X_i) = f(\Delta X).$$

В качестве регулирующего параметра используются входные (наработка, срок службы, условия эксплуатации и т.д.) или выходные (уровень надежности, запас работоспособности и т.д.) параметры объектов.

В зависимости от характера регулирующего параметра управление ПТЭ осуществляется по разомкнутой или замкнутой схеме. При разомкнутой схеме управляющие воздействия формируются по величине отклонения входных, а при замкнутой - по величине отклонения выходных параметров. Во втором случае (ЭТС) достигается наиболее сильное влияние ПТЭ на протекание процесса изменения ТС объекта.

Процесс изменения ТС объекта $\omega(t)$ представляет собой последовательную во времени смену конечного множества A исправных и неисправных состояний (рис. 9).

Среди них можно выделить две группы состояний: типа $A_i(A)$ и $A_i(D)$. Состояния типа $A_i(A)$ возникают под воздействием внешних факторов (накопление повреждений), а состояния типа $A_i(D)$ - под воздействием ПТЭ (постановка на ТО, в ремонт и т.д.).

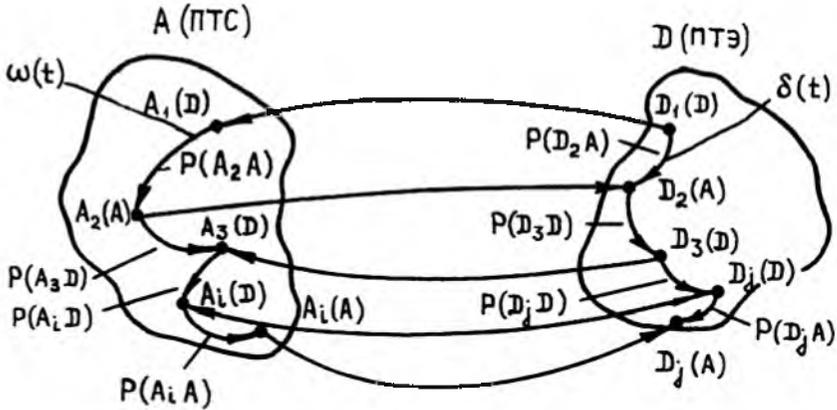


Рис. 9. Структура процесса ТЭ

Процесс ТЭ $V(t)$ представляет собой последовательную во времени смену конечного множества D состояний эксплуатации. Среди них можно выделить две группы состояний: $D_j(D)$ и $D_j(A)$. Состояния типа $D_j(D)$ назначаются по наработке (различные формы и виды ТО и Р), а типа $D_j(A)$ - с учетом возникающих ТС объекта (устранение неисправностей, замена отработавших ресурс элементов и т.д.).

Вероятности типа $P(A_i, A)$ и $P(A_i, D)$ характеризуют переходы объектов из одних ТС в другие, т.е. определяют процесс изменения их ТС, а вероятности типа $P(D_j, D)$ и $P(D_j, A)$ - переход объектов из одних состояний эксплуатации в другие, т.е. ПТЭ. В этом случае матрица P представляет собой обобщенную модель эксплуатации объекта:

$$P = \begin{pmatrix} P(A_i, A) & P(A_i, D) \\ P(D_j, A) & P(D_j, D) \end{pmatrix}$$

Модель позволяет определить оптимальную стратегию управления ПТЭ (стратегию ТО и Р), т.е. подобрать оптимальное с технико - экономических позиций соотношение между вероятностями типа $P(D_j, A)$ и $P(A_i, D)$. Для этого из множества состояний ПТЭ выделяется целевое (полет, рейс, готовность т.д.), по времени пребывания в котором судят об эффективности ПТЭ, т.е. о качестве принятой стратегии ТО и Р. Путем математического моделирования ПТЭ определяется число различаемых ТС объекта, при которых достигается максимум времени его пребывания в целевом состоянии.

Так, при малом числе различаемых ТС (малой глубине диагностирования) будет иметь место и малое число состояний типа $D_j(A)$, которые отличаются относительно большой продолжительностью (например, замена двигателя при отказе агрегата). При увеличении числа различаемых ТС наблюдается обратная картина - большое число состояний ПТЭ, связанных с устранением неисправностей относительно небольшой продолжительности.

Выбор оптимальной стратегии управления ПТЭ обычно начинают с анализа эффективности действующего процесса. Для него составляется матрица Р, на основе которой рассчитывается время пребывания объекта в целевом состоянии. Затем переходят к ПТЭ с большим числом различаемых ТС, для которого вновь составляется матрица Р и проводится оценка эффективности. Таким образом получают упорядоченный ряд процессов, в котором каждый последующий (без учета дополнительных расходов, связанных с его реализацией) обычно оказывается предпочтительнее предыдущего. Последний член ряда определяется техническими возможностями действующей системы ТЭ.

Расчеты показывают, что при существующих уровнях эксплуатационной технологичности и контролепригодности АТ традиционный ПТЭ по показателю $K_{\text{вн}}$ является наиболее предпочтительным (оптимальным), а по показателю $K_{\text{пт}}$ - более перспективными являются процессы, базирующиеся на стратегиях ТО и Р изделий по состоянию. Однако для их реализации должен быть проведен комплекс мероприятий, направленных на совершенствование системы ТЭ.

9. СТРАТЕГИИ ТО и Р

Стратегия ТО и Р представляет собой совокупность правил и норм, обеспечивающих заданное управление ТС объектов путем соответствующего управления ПТЭ. На практике реализуется несколько стратегий ТО и Р. Основным признаком, определяющим вид стратегии, служит характер информации о ТС объектов, которая используется при формировании управляющих воздействий на ПТЭ. По времени получения информация делится на априорную (получаемую до опыта) и апостериорную (получаемую после или в ходе опыта). При этом под опытом обычно понимается серийная эксплуатация объекта. По источникам получения информация делится на обобщенную (о всей совокупности однотипных объектов, находящихся в эксплуатации) и индивидуальную (о каждом объекте в отдельности).

С учетом возможных сочетаний времени и источников получения информации различают четыре вида стратегий ТО и Р:

По источнику	По времени	
	Априорная	Апостериорная
Обобщенная	1. По наработке для всех однотипных объектов, находящихся в эксплуатации (ТОНАР _о)	3. По состоянию с контролем надежности всех объектов, находящихся в эксплуатации (ТОСКН)
Индивидуальная	2. По наработке индивидуально для каждого объекта (ТОНАР _и)	4. По состоянию с контролем параметров ТС каждого объекта (ТОСКП)

Стратегии ТО и Р по состоянию (ТОСКН, ТОСКП) отличаются от стратегий по наработке (ТОНАР) как по структуре ПТЭ, так и по распределению материально-технических ресурсов, связанных с их реализацией. Стратегии по состоянию предполагают комплексное развитие материально-технической базы эксплуатационных предприятий (АТБ), проведение мероприятий по повышению эксплуатационной технологичности и контролепригодно-

монтажных предприятий, совершенствовании методов и средств установления ресурсов изделий.

Общим признаком для рассматриваемых стратегий является их планово-предупредительный характер. Однако и здесь имеются существенные различия. Так, при реализации стратегий по состоянию планируются (регламентируются) только те мероприятия, которые связаны с определением ТС объектов, а остальные выполняются по технической необходимости. Ограничения на межремонтные ресурсы изделий при этом отсутствуют.

Предупредительный характер стратегий по состоянию заключается в постоянном наблюдении за изменением ТС (надежности) объектов, находящихся в эксплуатации, и оперативном проведении мероприятий, направленных на выявление и устранение отказов и неисправностей. Основным преимуществом стратегий по состоянию является высокая эффективность ПТЭ, обусловленная малыми простоями ЛА на ТО и Р, сокращением расхода запасных частей, повышением уровня безотказности изделий и т.д. Практика показывает, что величина эксплуатационных расходов, связанных с ТО и Р, при переходе на стратегии по состоянию уменьшается более чем в 2 раза.

Следует отметить, что гарантийные и общетехнические ресурсы изделий при этом сохраняются. Первые призваны стимулировать качество изготовления АТ, так как при увеличении гарантийных ресурсов обычно повышается стоимость изделий, а вторые - интенсивность использования АТ, так как для изделий обычно оговаривается допустимый срок эксплуатации.

Перевод АТ на стратегии по состоянию (ЭТС) приводит к существенному изменению структуры ПТЭ, так как при этом вводятся дополнительные состояния (T_d) связанные с проверкой ТС изделий перед постановкой ЛА в различные состояния ТО и Р (рис. 10).

Следует отметить, что простои ЛА, связанные с введением дополнительных проверок (T_d) обычно полностью компенсируются за счет сокращения простоев в состояниях ТО и Р, связанных с ликвидацией последствий аварий, заменой отработавших ресурс двигателей и агрегатов.

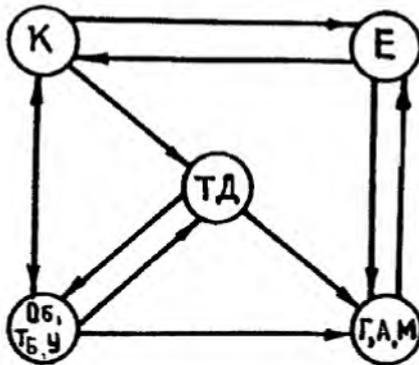


Рис. 10. Структура процесса ТЭ (Q1) при переходе на ЭТС

10. СТРАТЕГИЯ ТО И Р ПО НАРАБОТКЕ (ТОНАР)

Стратегия ТОНАР (метод ТЭ по ресурсу - ТЭР) представляет собой принцип управления ПТЭ, при котором объем и периодичность работ по ТО и Р (режим ТО и Р) устанавливаются в зависимости от наработки объекта с начала эксплуатации или после последнего капитального ремонта. Важнейшим требованием, предъявляемым к системе ТЭ при ТОНАР, является обеспечение заданного уровня надежности (безотказности) объекта при минимальных эксплуатационных расходах.

При установлении режимов ТО и Р объектов используются сведения об их потребностях в мероприятиях по поддержанию и восстановлению исправности (работоспособности), полученные в процессе лидерных испытаний и серийной эксплуатации ограниченного парка ЛА. Мероприятия по поддержанию и восстановлению работоспособности объектов группируются в различные виды и формы ТО и Р, которые жестко увязываются с наработкой (Ф1 - 300 ч, Ф2 - 900 ч, Ф3 - 1800 ч и т.д.). Режим ТО и Р остается практически неизменным в течение всего жизненного цикла объекта, вне зависимости от условий его эксплуатации.

В группу объектов, эксплуатирующихся по стратегии ТОНАР, входят наиболее ответственные изделия АТ (насосы, генераторы, силовые элементы конструкций и т.д.), подверженные

постепенным отказам, процесс развития которых при существующих средствах ТД не доступен для наблюдения. По мере совершенствования средств ТД объекты ТОНАР обычно переводятся на стратегии ТО и Р по состоянию (ТОСКП).

Поскольку отказы объектов ТОНАР не поддаются прогнозированию, проверки объектов обычно не увязываются с процессами изменения их ТС и направлены в основном на выявление скрытых производственных дефектов, а также разнообразных эксплуатационных повреждений. Требуемый уровень надежности (безотказности) объектов ТОНАР при этом обеспечивается за счет ограничения сроков их эксплуатации (ресурсов).

Под ресурсом объекта в общем случае понимается наработка (в часах, циклах, посадках и т.д.), в пределах которой обеспечивается поддержание заданного уровня безотказности при выполнении заданных правил эксплуатации. Для изделий АТ обычно устанавливаются гарантийный, межремонтный, общетехнический и гамма - процентный ресурсы.

Гарантийный ресурс - наработка изделия, в пределах которой изготовитель несет ответственность за его безотказную работу. Возникающие в этот период эксплуатации отказы и неисправности изготовитель устраняет своими силами и за свой счет. При этом возмещаются все убытки эксплуатирующего предприятия, связанные с возникновением отказов, включая и убытки от вынужденных простоев ЛА. Гарантийные ресурсы изделий АТ относительно малы (1...2 тыс. часов для ГТД, 2...5 тыс. часов для планера и т.д.), что объясняется как низким качеством их изготовления, так и малой материальной заинтересованностью заводов-изготовителей АТ в увеличении ресурсов.

Межремонтный ресурс - наработка изделия между двумя смежными капитальными ремонтами. Возникающие в этот период эксплуатации отказы и неисправности устраняются силами ремонтного или эксплуатационного предприятия, за счет ремонтного завода. Межремонтные ресурсы изделий АТ обычно соизмеримы с гарантийными, что также связано с низким качеством ремонта и малой заинтересованностью ремонтных заводов в их увеличении.

Общетехнический (назначенный) ресурс - суммарная наработка, при достижении которой применение изделия по назначе-

нию должно быть прекращено, вне зависимости от его ТС. В расход ресурса при этом засчитывается наработка объекта на всех режимах (в полете, при рулении, запусках, опробованиях и т.д.). Расчет наработки проводится по специальным методикам. Так, например, час наработки ГТД на земле соответствует 0,3 часа в полете и т.д. Общетехнические ресурсы для ГТД составляют 15...20 тыс. часов, для планера самолетов с ГТД - 30...40 тыс. часов и т.д.

Гамма - процентный ресурс - наработка, в пределах которой гамма процентов изделий не достигнет предельного состояния (не будет снято с эксплуатации). Признаки предельного состояния устанавливаются индивидуально для каждого изделия.

На ТС изделий наряду с наработкой сильное влияние оказывает и продолжительность эксплуатации (календарный срок службы). Поэтому для каждого изделия АТ наряду с ресурсом, как правило, устанавливаются и допустимые сроки службы. По аналогии с ресурсами обычно устанавливаются гарантийный, межремонтный и общетехнический сроки службы.

Ресурсы и сроки службы объектов ТОНАР обычно жестко регламентированы, однако при определенных условиях (дополнительные проверки, доработки конструкции и т.д.) допускается их незначительная корректировка в сторону увеличения. Так, например, для планера самолетов с ГТД допускается продление межремонтных ресурсов до 5%, для ГТД - до 2%, для вертолетов с ГТД - до 10% и т.д.

11. РЕСУРСЫ ОБЪЕКТОВ ТОНАР

Проблема установления ресурсов АТ остается актуальной, несмотря на имеющиеся достижения в теории и практике расчетов и испытаний изделий. Сложность решения этой задачи заключается в том, что в состав изделия обычно входит большое число элементов, каждый из которых обладает индивидуальным резервом долговечности. При установлении ресурсов используется ряд методов, основанных на вероятностных моделях долговечности. К их числу относятся модели: слабого звена, средне-взвешенной, дифференцированной и гамма - процентной долговечности.

Модель слабого звена (рис. 11) предполагает установление ресурса объекта t_p по минимальной долговечности $(t_i)_{\min}$ входящих в его состав критических элементов, т.е. из условия $t_p = (t_i)_{\min}$.

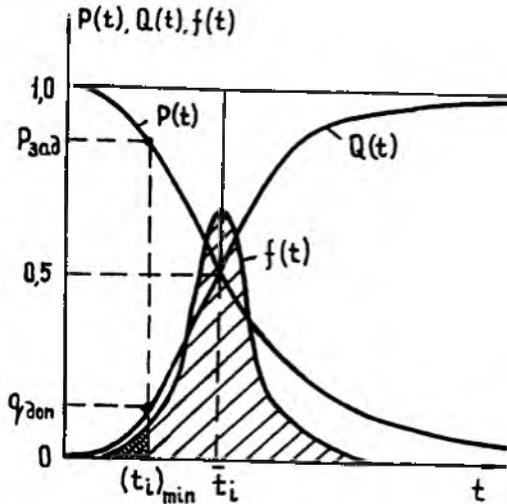


Рис. 11. Схема установления ресурса по модели слабого звена

Так, например, гарантийные ресурсы ГТД обычно устанавливаются по долговечности лопаток турбины, подшипников опор роторов или рабочих лопаток компрессоров.

В силу нормальности распределения долговечности критических элементов и высоких требований к безотказности АТ ($P_{зад} = 1 - q_{доп} = 1 - \Phi\{U_{q\ доп}\}$, $P_{зад} > 0,999$) ресурсы объектов рассчитываются по формуле

$$t_p = (\bar{t}_i)_{\min} = \bar{t} + U_{g\ доп} \cdot \sigma$$

где \bar{t} - средняя долговечность i -го критического элемента;

σ - среднее квадратическое отклонение долговечности критического элемента;

$U_{q\ доп}$ - квантиль нормального распределения, соответ-

вующий допустимой вероятности отказа $q_{\text{доп}}$ критического элемента (при $q_{\text{доп}} = 0,001$, $U_{q_{\text{доп}}} = -3,1$).

Модель средневзвешенной долговечности предполагает установление ресурса объекта по средневзвешенной долговечности t_{cp} входящих в его состав критических элементов, т.е. из условия

$$t_p = t_{\text{cp}} = \left(\sum_{i=1}^N t_{pi} \right) / N,$$

где t_{pi} - ресурс i -го критического элемента;

N - число критических элементов объекта.

Так, например, межремонтные ресурсы ГТД обычно устанавливаются с учетом долговечностей рабочих лопаток и дисков турбин, подшипников опор роторов и рабочих лопаток компрессора.

Модель дифференцированной долговечности предполагает установление ресурса объекта по максимальной долговечности $(t_{pi})_{\text{max}}$ входящих в его состав критических элементов, т.е. из условия $t_p = (t_{pi})_{\text{max}}$.

Так, например, общетехнический ресурс ГТД обычно устанавливается по долговечности основных силовых элементов (корпусов турбин и компрессоров, КС и т.д.).

Следует отметить, что модели средневзвешенной и дифференцированной долговечности предполагают контроль и замену критических элементов в процессе эксплуатации объекта.

Гамма-процентная модель долговечности предполагает установление ресурса объекта $t_{p\gamma}$ с учетом заданной вероятности γ ненаступления предельного состояния, т.е. выполнение условия

$$t_{p\gamma} = \bar{t} + U_{q_{\text{доп}}} \cdot \sigma,$$

где \bar{t} - средняя наработка объекта до предельного состояния;

σ - СКО наработки до предельного состояния;

$U_{q_{\text{доп}}}$ - квантиль нормального распределения, соответствующий допустимой вероятности наступления предельного состояния $q_{\text{доп}} = 1 - \gamma$ (при $\gamma = 0.75$; $U_{q_{\text{доп}}} = -0.67$).

При расчетах гамма - процентного ресурса учитываются все случаи наступления предельного состояния объекта.

С увеличением гамма-параметра уменьшается вероятность снятия объекта с эксплуатации, однако при этом уменьшается его ресурс (рис. 12).

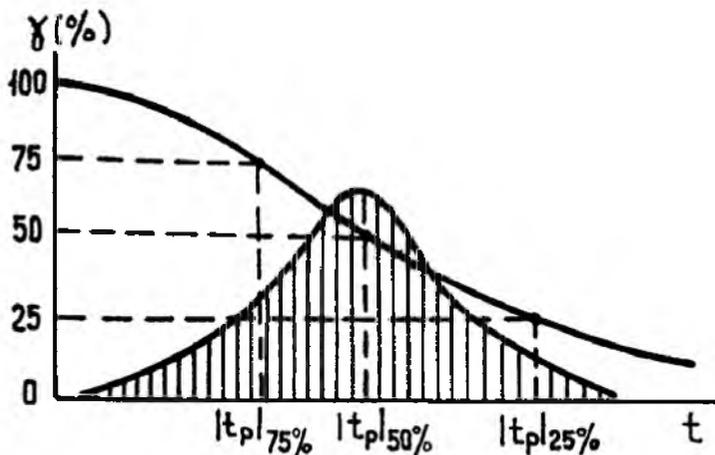


Рис. 12. Схема установления гамма - процентного ресурса

Выбор значений гамма-параметра проводится с учетом технико-экономических показателей ПТЭ объекта. Так, для наиболее ответственных изделий АТ, досрочное снятие с эксплуатации которых существенно влияет на эффективность ПТЭ (ГТД, стойки шасси, ВСУ и т.д.), значения гамма-параметра выбирают в пределах от 70 до 90%, а для менее ответственных (агрегаты функциональных систем, радио- и электрооборудования и т.д.) - в пределах от 50 до 70%. Следует отметить, что гамма-процентная модель долговечности используется в основном для тех объектов, возникновение предельного состояния у которых слабо влияет на безопасность полетов.

В ходе эксплуатации ЛА проводятся мероприятия, направленные на увеличение ресурсов изделий. В их разработке и реализации принимают участие КБ и заводы-изготовители АТ, эксплуатационные и ремонтные предприятия. Постоянно анализируются условия эксплуатации, закономерности изменения ТС объектов, технологические процессы их изготовления, проводят-

ся доработки конструкции критических элементов, корректируются режимы ТО и Р, совершенствуются методы и средства ТД.

12. СТРАТЕГИЯ ТО И Р С КОНТРОЛЕМ НАДЕЖНОСТИ (ТОСКН)

Стратегия ТОСКН (метод ТЭ до отказа - ТЭО) представляет собой принцип управления ПТЭ, при котором объем и периодичность работ по ТО и Р (режим ТО и Р) устанавливаются в зависимости от уровня надежности (безотказности) всех однотипных изделий, находящихся в эксплуатации. Важнейшим требованием, предъявляемым к режиму ТО и Р при ТОСКН, является поддержание заданного уровня надежности (безотказности) объекта при минимальных эксплуатационных расходах.

Среди комплектующих, входящих в состав ЛА, можно выделить большую группу изделий (до 70% от общего числа), отказы которых носят внезапный характер, не связаны с наработкой и слабо влияют на безопасность полетов, обладают высокой контролепригодностью и эксплуатационной технологичностью. К их числу относится большая часть агрегатов функциональных систем (гидравлической, высотной, радио, электро и т.д.). Причиной их отказа обычно служат случайные попадания отдельных наиболее ослабленных или поврежденных экземпляров в экстремальные условия эксплуатации (перегрузки). В силу внезапного характера отказов проверки ТС объектов ТОСКН дают положительные результаты только в тех случаях, когда утрате работоспособности (полному отказу) предшествует возникновение одной или нескольких неисправностей (частичных отказов). В этом случае выявленные неисправности устраняются путем замены или ремонта отказавшего элемента, а объект возвращается в эксплуатацию.

Стратегия ТОСКН получила широкое распространение как в зарубежных авиакомпаниях, так и в ГА при переводе на ЭТС разнообразных комплектующих изделий. Практика ее реализации показала, что высокой эффективности ПТЭ можно ожидать только при:

- рациональном подборе объектов;
- достаточном информационном обеспечении;

- наличии тесного взаимодействия заводов - изготовителей АТ и эксплуатирующих предприятий;
- оперативном проведении мероприятий, направленных на повышение надежности изделий.

Характерными особенностями ПТЭ при реализации стратегии являются:

- отсутствие ограничений на межремонтные ресурсы объектов;
- эксплуатация объектов до момента возникновения безопасного отказа;
- постоянный контроль уровня надежности объектов;
- проведение мероприятий по повышению уровня надежности объектов.

В качестве регулирующего параметра при реализации стратегии ТОСКН используется параметр потока отказов $\omega(t)$ или число отказов на 1000 часов наработки $K1000$. В зависимости от величины отклонения регулирующего параметра от соответствующего стандарта $[\omega(t)]$, $[K1000]$ формируется заданное управляющее воздействие на ПТЭ.

Так, в случае $\omega(t) < [\omega(t)]$ предполагается нормальная эксплуатация объекта, а в случае $\omega(t) > [\omega(t)]$ - проведение мероприятий, направленных на повышение его надежности (введение ограничений на нагрузки, дополнительные проверки, калибровка параметров и т.д.). С целью оперативного контроля и управления надежностью объектов в процессе эксплуатации ведутся постоянные наблюдения за изменением уровня их надежности, результаты которых представляются в виде графиков (рис. 13).

При этом значения параметров $\omega(t)$ и $K1000$ рассчитываются с учетом результатов эксплуатации всех однотипных объектов по формулам, рассмотренным в разд. 3.

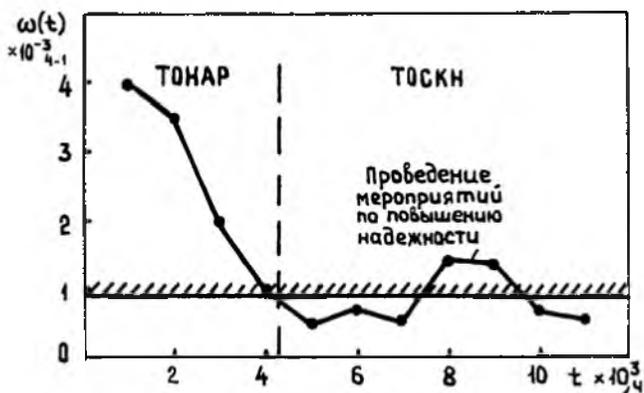


Рис. 13. Изменение надежности объектов ТОСН в процессе эксплуатации

13. НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТОСН

Важное место при реализации стратегии ТОСН занимают работы, связанные с нормированием параметров надежности изделий, т.е. с установлением стандартов $[\omega(t)]$ и $[K1000]$. Стандарты устанавливаются индивидуально для каждого изделия с учетом требований к безотказности и допустимых эксплуатационных расходов. На начальных этапах реализации стратегии ТОСН стандарты надежности обычно устанавливаются исходя из опыта эксплуатации изделий при традиционной системе ТО и Р за предшествующие 2...3 года, т.е. с учетом достигнутого уровня надежности, который и принимается в качестве соответствующего стандарта. По мере накопления данных об отказах изделий в условиях ТОСН и проведения мероприятий по повышению их надежности стандарты корректируются (обычно в сторону уменьшения). В работах по установлению и корректировке стандартов надежности принимают участие все заинтересованные организации (КБ, заводы-изготовители, эксплуатационные и ремонтные предприятия).

Особое внимание при реализации стратегии ТОСН уделяется оценке запаса работоспособности (безотказности) изде-

лий. В общем случае запас работоспособности P объекта характеризуется запасом прочности, который определяется соотношением между значениями параметров прочности η_{II} и действующих нагрузок η_n . Отказ объекта возникает в случае, если $\eta_n > \eta_{II}$ или $K_{II} = \eta_{II} / \eta_n < 1$.

В расчеты изделий АТ обычно закладываются высокие запасы прочности ($K_{II} > 3$), чем достигаются достаточно высокие запасы работоспособности ($P > 0,995$). На практике в силу значительных разбросов параметров η_{II} и η_n (скрытые производственные дефекты, возникновение повреждений, попадание в нерасчетные условия нагружения и т.д.) запас работоспособности может существенно уменьшиться.

При наличии информации о средних значениях параметров η_{II} и η_n и их среднеквадратических отклонениях σ_{II} и σ_n , учитывая нормальность распределений значений параметров (рис. 14), фактический запас работоспособности P можно вычислить по формуле

$$P = P(t_p) = 1 - Q(t_p) = 1 - \Phi^* \left\{ (\eta_{II} - \eta_n) / \sqrt{\sigma_{II}^2 + \sigma_n^2} \right\}.$$

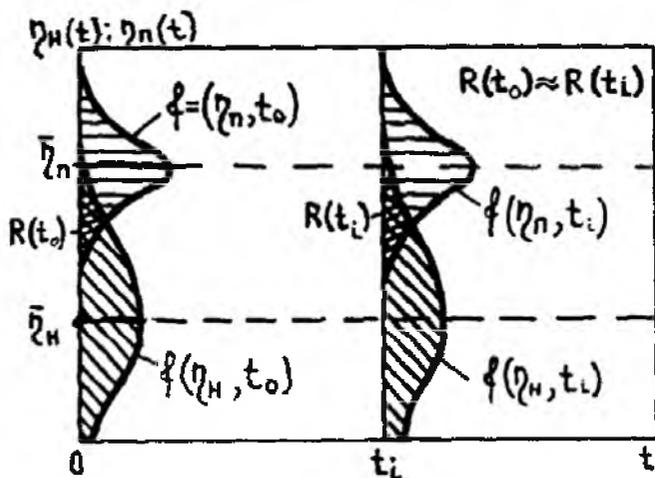


Рис. 14. Схема оценки запаса работоспособности объектов ТОСКН

$$\text{С другой стороны } P = P(t_p) = e^{-\omega(t) \cdot t_p} = e^{-K1000 \cdot t_p \cdot 10^{-3}},$$

где t_p - общетехнический ресурс объекта, откуда можно определить значения стандартов надежности $[\omega(t)]$ и

$$[K1000] \text{ по формулам: } [\omega(t)] = -\ln P / t_p, \\ [K1000] = [\omega(t)] \cdot 1000.$$

В силу независимости параметров η_n и η_n объектов ТОСКН от наработки (накопление повреждений отсутствует) запас работоспособности в процессе эксплуатации не изменяется, т.е. выполняется условие $P = P(t_o) = P(t_i)$. На практике по различным причинам запас работоспособности объектов может понизиться, что приведет к снижению уровня надежности, а следовательно к увеличению $\omega(t)$. Если при этом $\omega(t) > [\omega(t)]$, то возникает необходимость в проведении мероприятий, направленных на повышение запаса работоспособности. Они заключаются в повышении прочности объектов (η_n) или в снижении (ограничении) эксплуатационных нагрузок (η_n).

Мероприятия реализуются различными методами и средствами с учетом особенностей конструкции и эксплуатации объекта. Так, например, для предупреждения разрушений рабочих лопаток компрессоров ГТД, связанных с эксплуатационными повреждениями, вводятся проверки лопаток на предмет отсутствия забоин, ограничения на минимальную скорость выключения реверса тяги и т.д.

Эффективность мероприятий по повышению запасов работоспособности объектов оценивается по изменению их уровня надежности (значений $\omega(t)$ и $K1000$).

14. КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТОСКН

Применительно ко всей совокупности однотипных объектов ТОСКН, находящихся в эксплуатации, проводится постоянный контроль уровня надежности. Контроль осуществляется статистическим методом с использованием информации об отказах

объектов, содержащейся в учетно-отчетной документации эксплуатационных и ремонтных предприятий. В качестве критерия надежности при этом используется параметр потока отказов $\omega(t)$ или среднее число отказов на 1000 часов наработки $K1000$. В условиях отдельного эксплуатационного предприятия (АТБ) обычно приходится иметь дело с ограниченным объемом статистических данных. В силу этого при использовании показателей $\omega(t)$ и $K1000$ в качестве критериев надежности изделий не обеспечивается необходимая достоверность информации об их ТС. В этих условиях уровень надежности изделий обычно контролируется с использованием показателя "верхняя граница регулирования ($N_{вгр}$)", который определяет допустимое (планируемое) из технико-экономических соображений число отказов однотипных изделий за заданный период наблюдения (декада, месяц, квартал, год).

Контроль надежности изделий при этом проводится путем сравнения фактического числа отказов N с планируемым $N_{вгр}$. Значение $N_{вгр}$ с учетом заданного стандарта $[\omega(t)]$ или $[K1000]$ вычисляется с использованием распределения Пуассона по формулам

$$P_{зад} = \sum_{N=0}^{N_{вгр}} \frac{([\omega(t)] \cdot T \cdot a)^N \cdot e^{-[\omega(t)] \cdot T \cdot a}}{N!}$$

или

$$P_{зад} = \sum_{N=0}^{N_{вгр}} \frac{([K1000] \cdot T \cdot a \cdot 10^{-3})^N \cdot e^{-[K1000] \cdot T \cdot a \cdot 10^{-3}}}{N!},$$

где $P_{зад}$ - заданная вероятность непревышения фактического потока отказов ($K1000$) при $N = N_{вгр}$ соответствующего стандарта $[\omega(t)]$ ($[K1000]$);

T - суммарный налет ЛА за отчетный период эксплуатации, ч;

a - число однотипных изделий на ЛА.

Выполнение условия $N < N_{вгр}$ служит основанием для про-

должения нормальной эксплуатации изделия по стратегии ТОСКН. При $N > N_{\text{вгр}}$ изделие заносится в список ненадежных, для которых разрабатывается комплекс организационно - технических мероприятий, направленных на повышение уровня надежности.

По содержанию такие мероприятия можно разделить на конструктивные и эксплуатационные. К типовым конструктивным мероприятиям относятся доработки конструкции изделий, направленные на повышение их прочностных характеристик. К типовым эксплуатационным мероприятиям можно отнести ограничения на режимы работы изделий, введение дополнительных проверок, регулировок, калибровок параметров и т.д.

Если после реализации намеченных мероприятий надежность изделия не обеспечивается, то оно заносится в список наиболее ненадежных. Для таких изделий в отдельных случаях принимается решение о переводе на стратегию ТОНАР с установлением межремонтного ресурса.

15. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРОК ОБЪЕКТОВ ТОСКН

Возможность поддержания заданного уровня безотказности объектов ТОСКН во многом зависит от правильности установления периодичности проверок их ТС. По содержанию проверки, выполняемые при ТОСКН, практически не отличаются от проверок объектов ТОНАР. Они направлены на выявление эксплуатационных повреждений и отказавших элементов, проверку и калибровку параметров изделий. Отличительной особенностью проверок объектов ТОСКН является зависимость моментов их проведения от наработки, т.е. определенная периодичность проверок.

Проверки проводятся с использованием встроенных (бортовых) и внешних (наземных) средств контроля в полете, а также при ТО и Р. При этом наземные средства контроля используются только для тех объектов, ТС которых с достаточной точностью невозможно определить средствами бортового контроля.

При установлении периодичности проверок учитываются

заданный уровень безотказности $P_{\text{зад}}$, $[\omega(t)]$ или $[K1000]$, а также допустимые материальные расходы, связанные с эксплуатацией объекта. В силу того, что отказы объектов ТОСКН слабо влияют на безопасность полетов и имеют стоимостное выражение, имеется возможность проводить оптимизацию периодичности проверок и по экономическим критериям.

Предупреждение отказов объектов ТОСКН при введении проверок основывается на том, что утрате работоспособности объекта (полному отказу), как правило, предшествует возникновение одной или нескольких неисправностей (частичных отказов).

Так, например, отказ высотной системы самолета, в состав которой входит несколько выпускных клапанов, каждый из которых обеспечивает нормальную работу системы, может возникнуть только в случае их одновременного (в одном полете) отказа. Однако вероятность этого события очень мала в силу высокой безотказности выпускных клапанов. Вероятность отказа системы будет еще меньше при проведении проверок ТС выпускных клапанов при ТО самолета, так как в этом случае отказавшие клапаны заменяются на новые (ремонтируются).

В общем случае вероятность отказа объекта $Q_k(\tau)$, имеющего k - степеней резервирования, за период между проверками τ при потоке отказов $\omega(t)$ вычисляется с использованием распределения Пуассона (рис. 15).

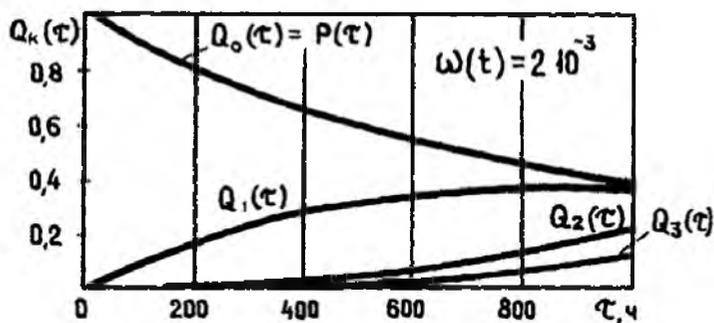


Рис. 15. Зависимость вероятности отказа объектов ТОСКН от периодичности проверок и степени резервирования

Выражение

$$Q_k(\tau) = \frac{[\omega(t) \cdot \tau]^k}{k!} \cdot e^{-\omega(t) \cdot \tau} \leq q_{\text{доп}} = 1 - P_{\text{зад}}$$

позволяет определить периодичность проверок, отвечающую заданной вероятности безотказной работы. В случае, когда отказ объекта наступает при возникновении первой неисправности ($k = 0$), добиться повышения надежности за счет сокращения периодичности проверок не удастся. Такие объекты эксплуатируются до безопасного отказа без проведения проверок. Безотказность объектов при этом вычисляется по формуле

$$P(\tau) = Q_0(\tau) = e^{-\omega(t) \cdot \tau}$$

Практика эксплуатации АТ указывает на то, что для сложных многофункциональных объектов (систем регулирования, радионавигационного оборудования и т.д.) установить число неисправностей, предшествующих возникновению отказа, как правило, не удастся. Однако значение параметров потока неисправностей $\omega_n(t)$ и потока отказов $\omega_o(t)$ обычно известны, причем $\omega_n(t) > \omega_o(t)$, что говорит о постепенном (многошаговом) процессе развития отказов. Оптимальная периодичность проверок, обеспечивающая минимальную вероятность отказа объекта (в часах), в этих случаях определяется по формуле

$$\tau = \frac{\ln \omega_n(t) - \ln \omega_o(t)}{\omega_n(t) - \omega_o(t)}$$

В силу того, что отказы объектов ТОСКН имеют стоимостное выражение, имеется возможность определить оптимальную периодичность проверок $\tau_{\text{опт}}$, отвечающую также и минимальным эксплуатационным расходам $C(\tau)$. При этом предполагается, что сокращение периодичности проверок приводит к уменьшению затрат, связанных с ликвидацией последствий отказов $C_q(\tau)$, и к увеличению затрат, связанных с проведением проверок $C_n(\tau)$. При этом функции $C_q(\tau)$ и $C_n(\tau)$ взаимопротивоположные и диф-

ференцируемые. Приравняв производную функции $C(\tau) = C_q(\tau) + C_n(\tau)$ к нулю, определяют значение τ_{opt} , отвечающее минимальным эксплуатационным расходам $\{C(\tau)\}min$.

Данная задача может быть решена и графически, путем построения зависимостей $C_q(\tau)$ и $C_n(\tau)$ (рис. 16).

При этом диапазон значений T_{opt} определяет периодичности проверок, отвечающие минимальным эксплуатационным расходам.

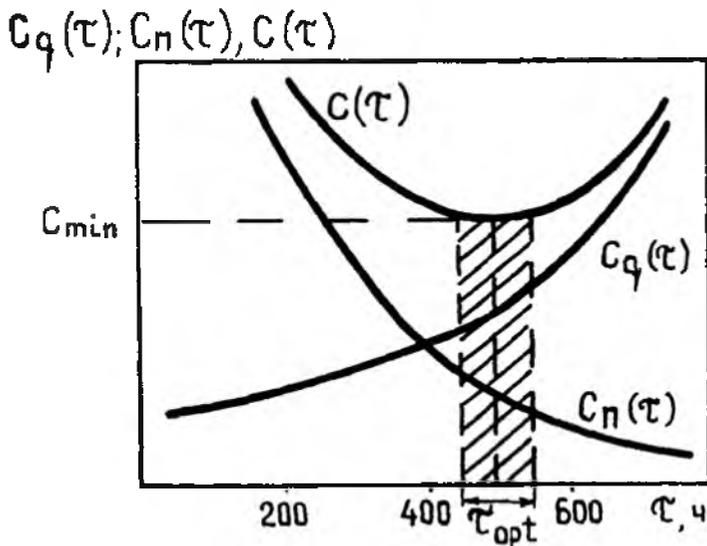


Рис. 16. Определение оптимальной периодичности проверок τ_{opt} с учетом величины эксплуатационных расходов

16. СТРАТЕГИЯ ТО И Р С КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ (ТОСКП)

Стратегия ТОСКП (метод ТЭ по параметрам - ТЭП) представляет собой принцип управления ПТЭ, при котором объем и периодичность работ по ТО и Р (режим ТО и Р) устанавливается с учетом положения текущих значений контролируемых параметров объекта относительно границ допусков.

Важнейшим требованием, предъявляемым режиму ТО и Р, при этом является поддержание заданного уровня надежности (безотказности) объектов между проверками при минимальных эксплуатационных расходах.

К объектам ТОСКП относится большая группа изделий АТ, для которых характерны постепенные отказы, оказывающие сильное влияние на безопасность полетов, процесс развития которых доступен для наблюдения существующими средствами ТД. К их числу относятся силовые элементы конструкций, подверженные усталостным разрушениям, источники давления (насосы), фильтры, узлы трения и т.д. Вероятность отказа объектов ТОСКП в значительной степени зависит от их наработки с начала эксплуатации, режима работы, качества ТО, ГСМ и т.д.

Период развития отказов объектов ТОСКП имеет протяженность во времени, соизмеримую с отдельными этапами эксплуатации ЛА (формами ТО, капитальными ремонтами и т.д.). В силу этого при проведении проверок удастся своевременно выявить и заменить (восстановить) объекты, находящиеся в предотказном состоянии, предупредив тем самым возникновение отказов. Таким образом, объекты ТОСКП эксплуатируются до момента возникновения предотказного состояния, а ограничения на межремонтные ресурсы при этом отменяются. Проверки проводятся с определенной периодичностью, которая устанавливается с учетом требований к безотказности объекта, "живучести" его конструкции, а также надежности контроля.

Управляющие воздействия на ПТЭ объекта формируются в зависимости от результатов проверок, т.е. от положения текущих значений контролируемых параметров относительно их граничных значений (допусков). Для распознавания предотказных состояний устанавливаются упреждающие допуски на параметры (УДП), значения которых зависят от периодичности проверок, скорости изменения ТС, а также требований к безотказности объекта.

По сравнению с ТОНАР стратегия ТОСКП имеет следующие преимущества: более полное использование резервов долговечности изделий за счет перехода от среднестатистических ресурсов к индивидуальным; сокращение простоев ЛА на ТО и Р за

счет снижения объема и трудоемкости плановых восстановительных мероприятий; возможность поддержания более высоких уровней безотказности изделий за счет своевременного выявления и устранения неисправностей.

Однако успешная реализация стратегии ТОСКП во многом зависит от наличия эффективных методов и средств ТД, уровней контролепригодности и технологичности объектов и других факторов.

Стратегия ТОСКП, как и другие, является плано-предупредительной. Плановость стратегии заключается в установлении определенных периодичностей проверок объектов, а ее профилактический характер - в своевременной замене (восстановлении) объектов, находящихся в предотказном состоянии.

При проведении капитальных ремонтов ЛА (двигателей) объекты ТОСКП проверяются в обычном порядке и возвращаются в эксплуатацию.

17. ИЗМЕНЕНИЕ ТС ОБЪЕКТОВ ТОСКП С НАРАБОТКОЙ

Техническое состояние объекта характеризуется совокупностью текущих значений параметров, подверженных изменению в процессе эксплуатации и оговоренных в его нормативно – технической документации. Влияние эксплуатационных факторов на ТС изделий проявляется в виде отклонений (обычно в сторону ухудшения) контролируемых параметров от исходных (базовых) значений. Такие явления обусловлены протеканием в элементах конструкций естественных процессов накопления повреждений, связанных с усталостью и старением материалов, износом трущихся поверхностей, коррозией и т.д. Скорость накопления повреждений зависит от начальных свойств изделия, условий его работы, качества ТО, ГСМ и других факторов, в силу чего она является величиной случайной.

Механизм возникновения и развития постепенных отказов не всегда достаточно изучен, поэтому для описания процессов изменения ТС объектов ТОСКП, как правило, используются вероятностные модели, базирующиеся на данных серийной эксплуатации ЛА.

Случайный характер протекания процессов изменения ТС изделий (рис. 17) обуславливает то, что при одинаковой наработке t_i они могут иметь различные запасы прочности, т.е. значения контролируемых параметров η_i .

Определение их фактического ТС при этом осуществляется с использованием различных средств ТД.

По скорости протекания процессы изменения ТС с наработкой делятся на процессы малой, средней и большой скорости.

Процессы малой скорости обусловлены накоплением повреждений в элементах конструкций под воздействием внешних факторов и характерны практически для всех изделий АТ.

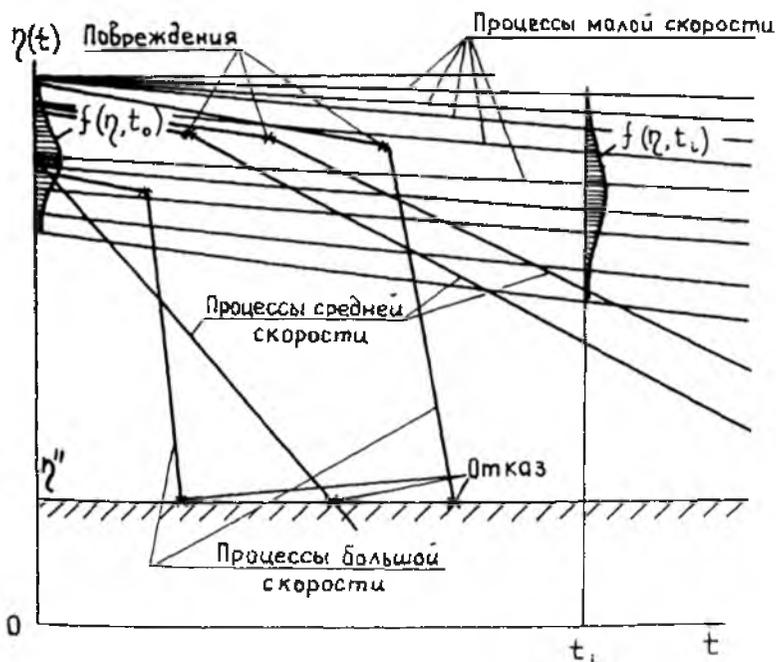


Рис. 17. Изменение ТС объектов ТОСКП с наработкой

Период развития отказов при этом обычно соизмерим с межремонтным ресурсом ЛА (двигателя) и зависит от начальных запасов прочности изделия, условий его эксплуатации, качества ТО и т.д. Изделия, для которых характерны медленнопротекающие

процессы, являются основными объектами ТОСКП. Проверки их ТС обычно совмещают с капитальным ремонтом или периодическими формами ТО.

Процессы средней скорости обусловлены воздействием на элементы конструкций повышенных нагрузок, возникновением эксплуатационных повреждений, наличием скрытых производственных дефектов и другими причинами. Они характерны для объектов, работающих в неблагоприятных условиях (силовые элементы конструкции, узлы трения, элементы проточной части ГТД и т.д.). Вероятность возникновения отказов при этом зависит от качества ТО и, в частности, от своевременного выявления и устранения производственных дефектов и эксплуатационных повреждений. Период развития отказов в этом случае обычно соизмерим с периодичностью проведения оперативных и периодических форм ТО. Изделия АТ, для которых характерны процессы средней скорости, также являются объектами ТОСКП. Проверки их ТС при этом совмещаются с периодическими или оперативными формами ТО ЛА.

Быстропротекающие процессы характерны практически для всех изделий АТ. Они обусловлены воздействием на элементы конструкций чрезмерных (нерасчетных) нагрузок (помпаж компрессора, масляное голодание подшипников и т.д.), возникновением эксплуатационных повреждений (забоины на лопатках компрессоров, перегрев лопаток и дисков турбин и т.д.), грубыми нарушениями технологий ТО (перезатяжка резьбовых соединений, нарушения регулировки агрегатов и т.д.). Быстропротекающие процессы часто являются конечной стадией процессов малой и средней скорости, картина развития которых недоступна для наблюдения существующими средствами ТД. Период развития отказов в случае быстропротекающих процессов соизмерим с одним циклом нагружения объекта (полет, запуск, посадка и т.д.). Изделия АТ, для которых характерны такие отказы, требуют непрерывного контроля ТС и поэтому обычно не являются объектами ТОСКП.

18. ИЗМЕНЕНИЕ ВИДА ТС ОБЪЕКТОВ ТОСКП С НАРАБОТКОЙ

Вид ТС объекта характеризуется совокупностью ТС, отвечающих (не отвечающих) требованиям исправности, работоспособности или правильного функционирования, оговоренным в соответствующей нормативно-технической документации. Таким образом, объект ТОСКП может иметь шесть видов ТС: исправное (неисправное), работоспособное (неработоспособное), правильного (неправильного) функционирования. Для определения вида ТС объектов проводятся соответствующие проверки: исправности, работоспособности и правильности функционирования.

Проверка вида ТС заключается в том, что выбирается некоторая совокупность параметров объекта, отражающих изменение его ТС с наработкой, измеряются их текущие значения, которые сопоставляются с соответствующими допусками. По положению текущих значений параметров относительно границ допусков формируется заключение о виде ТС объекта.

В технической документации изделий АТ обычно устанавливаются номинальный (НДП), упреждающий (УДП) и эксплуатационный (ЭДП) допуски на контролируемые параметры, которые и определяют границы соответствующих видов ТС (рис. 18). При создании изделий стремятся к увеличению ЭДП, что способствует расширению области их работоспособности, т.е. увеличению длительности эксплуатации.

В ходе эксплуатации значения параметров объектов под воздействием внешних факторов относительно быстро (обычно к моменту отработки гарантийного ресурса) выходят за нижнюю границу НДП, т.е. объекты из исправного (*И*) переходят в неисправное (условно исправное) состояние, оставаясь при этом работоспособными (*Р*) и правильно функционирующими (*ПФ*). При пересечении верхней границы УДП η' объекты из работоспособного состояния переходят в неисправное (условно работоспособное) (*Р**), оставаясь при этом правильно функционирующими.

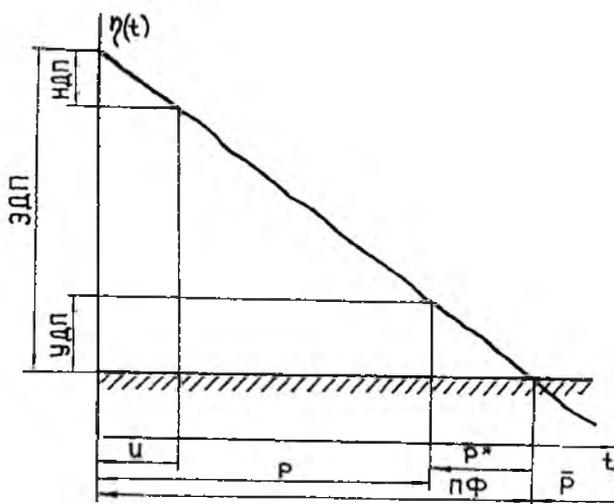


Рис. 18. Изменение вида ТС объектов ТОСКП с наработкой

При пересечении нижней границы УДП η'' они из условно работоспособного переходят в неработоспособное состояние, т.е. в состояние параметрического отказа. Одновременно нарушается и правильность их функционирования. Таким образом, от величины УДП во многом зависит длительность пребывания объектов в работоспособном состоянии, т.е. длительность эксплуатации.

19. НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ ТОСКП

На начальных этапах эксплуатации объекты ТОСКП обычно имеют большие запасы прочности ($K_{п} > 3$) и работоспособности ($P > 0,995$). В ходе эксплуатации под воздействием внешних факторов происходит постепенное снижение средней прочности $\eta_{п}$ и увеличение разброса значений параметров $\sigma_{п}$, что приводит к снижению запасов работоспособности (рис. 19).

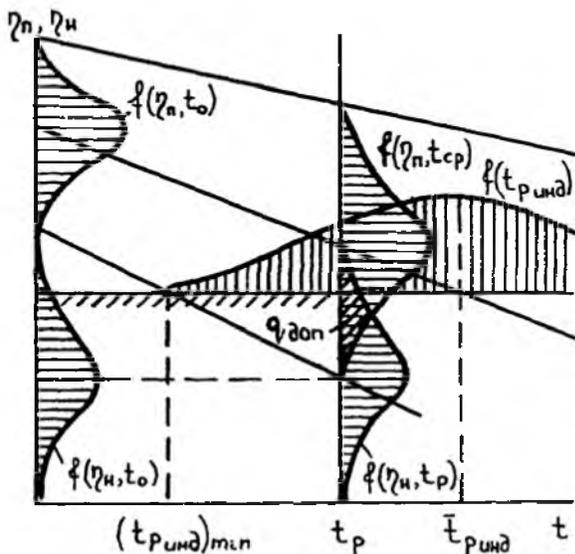


Рис. 19. Нормирование параметров объектов ТОСКП

Процессы изменения ТС объектов с наработкой обычно описываются линейными зависимостями вида

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_t &= \bar{\eta}_0 + K_\eta \cdot t; \\ \bar{\sigma}_t &= \bar{\sigma}_0 + K_\sigma \cdot t, \end{aligned}$$

где $\bar{\eta}_t$, $\bar{\eta}_0$, $\bar{\sigma}_t$, $\bar{\sigma}_0$ - значения параметров объекта и СКО при наработке t и в начале эксплуатации;

K_η , K_σ - показатели изменения параметров объекта с наработкой.

Начальный запас работоспособности объекта при этом составит

$$P(t_0) = 1 - Q(t_0) = 1 - \Phi^* \left\{ \frac{(\eta_{но} - \eta_{по})}{\sqrt{\sigma_{но}^2 + \sigma_{по}^2}} \right\} > P_{зад}.$$

При наработке t_p запас работоспособности объектов достигает минимально допустимого значения $P(t_p) = P_{зад} = 1 - q_{доп}$ и их дальнейшая эксплуатация становится опасной. Поэтому, начиная

с наработки t_p , вводят проверки ТС объектов, т.е. осуществляется перевод на стратегию ТОСКП. При этом каждый объект будет эксплуатироваться до наработки $t_{p \text{ инд.}}$, которой соответствует значение параметра прочности $\eta_{п} = \eta''$, где η'' - предельно допустимое (граничное) значение параметра.

Граничные значения параметров прочности η'' для изделий АТ обычно устанавливаются с учетом заданной безотказности $P_{\text{зад}}$ и параметров нагрузки η_n и σ_n :

$$P_{\text{зад}} = 1 - q_{\text{доп}} = P(t_{p \text{ инд.}}) = 1 - \Phi\{(\bar{\eta}_n - \eta'') / \sigma_n\},$$

откуда $\eta'' = \bar{\eta}_n - U_{q \text{ доп.}} \cdot \tau_n$ - при снижении и $\eta'' = \bar{\eta}_n - U_{q \text{ доп.}} \cdot \sigma_n$ - при росте η_n с наработкой.

Таким образом, при введении проверок прочности ($\eta_{п} \geq \eta''$) запас работоспособности (безотказность) объектов будет не ниже $P_{\text{зад}}$, а средний индивидуальный ресурс ($t_{p \text{ инд.}}$) - в несколько раз больше среднестатистического (t_p). С учетом скорости изменения ТС объектов (K_{η}) величина $t_{p \text{ инд.}}$ составит

$$t_{p \text{ инд.}} = (\eta_0 - \eta'') / K_{\eta} = (2 \dots 5) \bar{t}_p.$$

20. УПРЕЖДАЮЩИЙ ДОПУСК НА ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТОВ ТОСКП

Стратегия ТОСКП базируется на проведении периодических проверок ТС объектов, находящихся в эксплуатации. Проверки проводятся путем измерения и сопоставления текущих значений контролируемых параметров объектов η_t с их предельно допустимыми η'' и предотказовыми η' значениями.

При переводе изделий на эксплуатацию по стратегии ТОСКП решается задача установления оптимальных режимов диагностирования (состава и граничных значений контролируемых параметров, а также периодичности проверок), отвечающих требованиям, предъявляемым к эффективности ПТЭ. При этом периодичность проверок τ обычно устанавливается с учетом дей-

ствующих форм технического обслуживания ЛА, граничные значения параметров η'' - с учетом заданной безотказности объекта, а предотказовые η' - с учетом принятой периодичности проверок.

При установлении УДП исходят из того, что за время между проверками τ текущее значение параметра η_t не достигнет его граничного значения η'' , т.е. будет выполняться условие $\eta_t > \eta''$. Таким образом, с увеличением τ происходит увеличение УДП, а следовательно сокращение длительности эксплуатации объектов. Задача оптимизации периодичности проверок в этом случае решается аналогично оптимизации периодичности проверок объектов ТОСКН.

В случае заданной периодичности проверок задача установления УДП формулируется следующим образом. Имеется некоторый объект ТОСКП и формальное описание процесса изменения его ТС с наработкой $\eta(t)$. Требуется по заданной безотказности $P_{\text{зад}}$ определить момент первой проверки t_1 , а также величину УДП и, в частности, положение его верхней границы η' . При этом предполагается, что процесс изменения ТС объектов с наработкой, а следовательно и значений контролируемых параметров, протекает монотонно, а процессы средней и малой скорости не возникают (рис. 20).

Скорость изменения ТС является величиной случайной и зависит от начальных свойств объекта и условий его эксплуатации. Переход объекта из одного вида ТС в другое происходит дискретно в момент пересечения процессом некоторых уровней, разделяющих эти состояния. На практике обычно устанавливаются предельно допустимый и предотказовый уровни параметров.

Предельно допустимый уровень η'' (нижняя граница УДП) определяет предельное состояние объекта, при достижении которого он не может использоваться по прямому назначению и подлежит аварийной замене. предотказовый уровень η' (верхняя граница УДП) определяет неисправное состояние объекта, при достижении которого он подлежит профилактической замене (допускается незначительная дополнительная наработка).

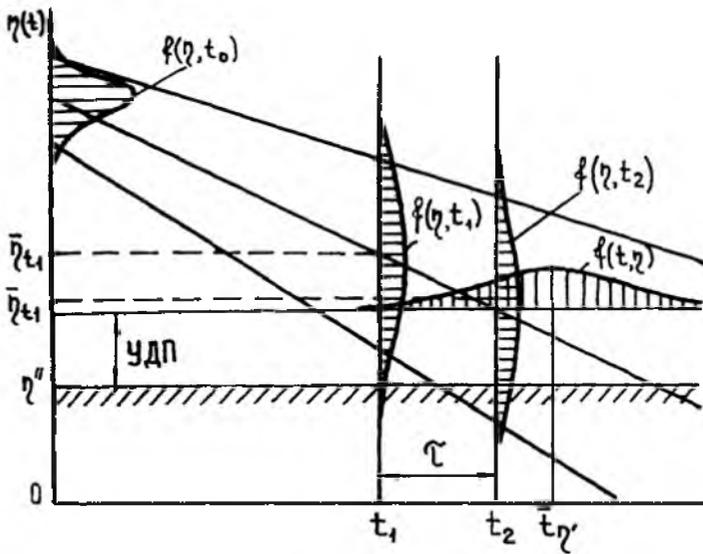


Рис. 20. Определение величины УДП объектов ТОСКП

Таким образом, УДП $d\eta = \eta' - \eta''$ определяет область работоспособности объекта, в пределах которой обеспечивается его безотказная работа между проверками. Если в момент t выполняется проверка, то при $\eta_t > \eta'$ выдается команда на дальнейшую эксплуатацию, при $\eta' > \eta_t > \eta''$ - на профилактическую, а при $\eta_t < \eta''$ - на аварийную замену объекта.

Таким образом, проверки играют роль своеобразного экрана, прозрачного при $\eta_t > \eta'$ и поглощающего при $\eta_t < \eta'$. Значение η' при этом должно быть выбрано так, чтобы в очередном цикле эксплуатации после проверки длительностью τ значение η_t не вышло за границу η'' .

В силу случайного характера протекания процесса $\eta(t)$ значения η_t в моменты t_1 и t_2 распределены нормально со средними значениями η_1, η_2 и плотностями $f(\eta; t_1), f(\eta; t_2)$. С другой стороны уровни η' и η'' пересекаются процессом $\eta(t)$ в случайные моменты t', t'' и плотностями $f(t; \eta'), f(t; \eta'')$.

Пусть t_1 и t_2 соответственно моменты первой и второй про-

верок, а t - случайный момент пересечения процессом уровней η' и η'' . Тогда $t < t_1$ при $\eta_t > \eta'$, а $t_1 < t < t_2$ при $\eta' > \eta_t > \eta''$. Переходя к плотностям распределений, условие невыхода η_t за границу η'' в очередном цикле эксплуатации длительностью τ можно представить

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t; \eta') dt = \int_{\eta''}^{\eta'} f(\eta; t_2) d\eta. \quad (1)$$

Данное условие означает, что все траектории процесса, прошедшие через горизонтальный экран (ab), попадают на вертикальный экран (bc), т.е. $P(ab) = P(bc)$.

Момент проведения первой проверки t_1 определяется с учетом заданной безотказности $P_{\text{зад}} = 1 - q_{\text{доп}}$ из условия

$$\int_0^{\eta''} f(\eta; t_1) \cdot d\eta \leq q_{\text{доп}},$$

отсюда получаем

$$\eta_1 = \eta'' - U_{q_{\text{доп}}} \cdot \sigma_1. \quad (2)$$

Процессы, связанные с накоплением повреждений (износ, старение и т.д.), обычно описываются линейными зависимостями вида

$$\begin{aligned} \eta_t &= \eta_0 + K_\eta \cdot t, \\ \sigma_t &= \sigma_0 + K_\sigma \cdot t. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения параметров K_η и K_σ при этом вычисляются на основе статистических данных серийной эксплуатации объектов.

С учетом (2) и (3) может быть получено выражение для определения момента проведения первой проверки t_1 :

$$t_1 = (\eta'' - \eta_0 - U_{q_{\text{доп}}} \cdot \sigma_0) / (K_\eta + U_{q_{\text{доп}}} \cdot K_\sigma). \quad (4)$$

Аналогично с учетом (1) и (3) может быть получено выражение для определения верхней границы УДП η' :

$$\eta' = [\eta''(\sigma_0 + K_\sigma \cdot t_1) - (K_\sigma \cdot \sigma_0 - \bar{\eta}_0 \cdot K_\eta) \cdot \tau] / (\sigma_0 + K_\sigma \cdot t_1 + K_\sigma \cdot \tau)$$

21. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРОК ОБЪЕКТОВ ТОСКП

Практика эксплуатации ЛА указывает на то, что значительная часть отказов изделий АТ приходится на процессы изменения ТС средней скорости. Причиной их возникновения обычно служат разнообразные эксплуатационные повреждения конструкции, а также скрытые производственные дефекты.

С целью предупреждения таких отказов вводятся проверки объектов, находящихся в эксплуатации. Периодичность проверок τ устанавливается с учетом заданной безотказности объекта $P_{\text{зад}}$ в очередном цикле эксплуатации из условия

$$P(\tau) = 1 - q(\tau) \geq P_{\text{зад}} = 1 - q_{\text{доп}} \quad (5)$$

Вероятность отказа объекта в очередном цикле эксплуатации $q(\tau)$ определяется произведением трех вероятностей:

появления повреждения в предыдущем цикле эксплуатации $r(\tau)$;

пропуска поврежденного объекта в эксплуатацию из-за низкой надежности контроля β ;

возникновения процесса развития отказа, период существования которого $t_{\text{жив}}$ меньше принятой периодичности проверок $s(\tau)$:

$$q(\tau) = r(\tau) \cdot s(\tau) \cdot \beta.$$

При многократных пропусках повреждений за период развития отказа может быть проведено $n = t_{\text{жив}} / \tau$ проверок объекта. При этом вероятность его отказа в очередном цикле эксплуатации составит

$$\begin{aligned}
 q(\tau) &= r(\tau) \cdot s(\tau) \cdot \beta^0 + r(\tau) \cdot s(2\tau) \cdot \beta^1 + \dots + r(\tau) \cdot s(n\tau) \cdot \beta^{n-1} = \\
 &= r(\tau) \sum_{i=1}^n s(i\tau) \cdot \beta^{i-1} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Наработка объектов до отказа $t_{\text{жив}}$ обычно распределена по нормальному закону с параметрами $t_{\text{жив}}$ и $G_{\text{жив}}$ (рис. 21).

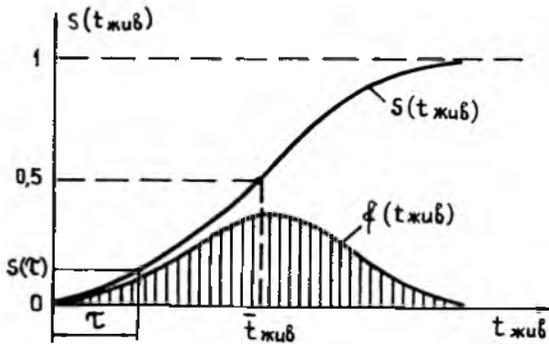


Рис. 21. Оценка запаса "живучести" объектов

Используя функцию стандартного нормального распределения $\Phi\{\dots\}$, вероятность $s(i\tau)$ можно вычислить из выражения

$$s(i\tau) = \Phi\left\{\frac{i\tau - \bar{t}_{\text{жив}}}{\sigma_{\text{жив}}}\right\}$$

Если моменты возникновения повреждений распределены по экспоненциальному закону, то вероятность $r(\tau)$ можно вычислить по формуле

$$r(\tau) = 1 - e^{-\lambda_{\text{пов}} \cdot \tau} \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{пов}}$ - интенсивность возникновения повреждений.

С учетом (5), (6), (7) выражение для определения периодичности проверок при постоянной интенсивности возникновения повреждений имеет вид

$$q(\tau) = (1 - e^{-\lambda_{\text{пов}} \cdot \tau}) \cdot \sum_{i=1}^n \Phi^* \left\{ \frac{(i\tau - \bar{t}_{\text{жив}})}{\sigma_{\text{жив}}} \right\} \cdot \beta \leq q_{\text{доп.}} \quad (8)$$

Если моменты возникновения процессов средней скорости распределены по нормальному закону с параметрами $\bar{t}_{\text{пов.}}$ и $\sigma_{\text{пов.}}$ (рис. 22), то вероятность $r(\tau)$ можно вычислить по формуле

$$r(\tau) = q(t_i) - q(t_{i-1})$$

или

$$r(\tau) = \Phi^* \left\{ \frac{\bar{t}_i - t_{\text{пов.}}}{\sigma_{\text{пов.}}} \right\} - \Phi^* \left\{ \frac{\bar{t}_{i-1} - t_{\text{пов.}}}{\sigma_{\text{пов.}}} \right\}, \quad (9)$$

где t_{i-1} , t_i - соответственно наработка объекта к моменту предыдущей и текущей проверок;
 $q(t_i), q(t_{i-1})$ - соответственно вероятности возникновения повреждений к моментам t_i и t_{i-1} .

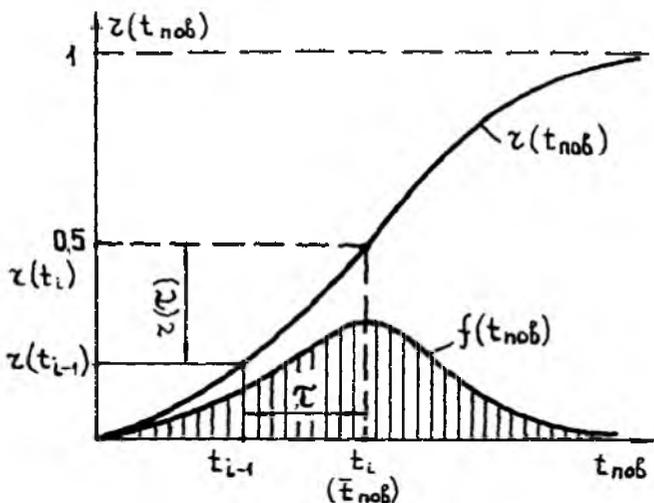


Рис. 22. Оценка вероятности возникновения процессов средней скорости при нарастающей интенсивности повреждений

Приняв в запас безотказности $t_i = \bar{t}_{пов}$, $t_{i-1} = \bar{t}_{пов} - \tau$, из (9) имеем

$$r(\tau) = \Phi^* \{ \tau / \sigma_{пов} \} - 0,5 \quad (10)$$

С учетом (5), (6) и (10) выражение для вычисления периодичности проверок при нарастающей интенсивности отказов имеет вид

$$q(\tau) = (\Phi^* \{ \tau / \sigma_{пов} \} - 0,5) \cdot \sum_{i=1}^n \Phi \left\{ \frac{i\tau - \bar{t}_{жив}}{\sigma_{жив}} \right\} \cdot \beta \leq q_{доп} \quad (11)$$

Решение уравнений (8) и (11) проводится методом подстановки значений τ . Параметры распределений $t_{жив}$, $\sigma_{жив}$, $\lambda_{пов}$, $t_{пов}$, $\sigma_{пов}$ определяются с использованием стандартной методики оценки надежности на основе статистических данных, полученных в ходе серийной эксплуатации и стендовых испытаний изделий. Надежность контроля β определяется на основе данных проверок большого числа однотипных изделий с повреждениями по формуле

$$\beta = m / N,$$

где m - число результатов "годен", полученных при проверках N "негодных" (поврежденных) изделий.

22. ПРОГРАММА ТО и Р АТ

Программа ТО и Р представляет собой базовый нормативно-технический документ, регламентирующий методы, стратегии и режимы ТО и Р комплектующих изделий, а также порядок их корректировки на протяжении жизненного цикла ЛА. Конечной целью реализации программы является обеспечение исправности

и эффективности ПТЭ парка однотипных ЛА. Решение данной проблемы сегодня связывается с формированием программ, базирующихся на широком использовании стратегий ТО и Р по состоянию. В связи с этим в программах большое внимание уделяется созданию условий для их успешной реализации.

Программы разрабатываются индивидуально для каждого типа ЛА и представляют собой совокупность программ более низкого уровня (планера, функциональных систем, силовых элементов и т.д.). Работы по формированию программ ведутся на этапах макетной проработки ЛА с участием всех заинтересованных организаций и предприятий (КБ, НИИ ГА, головных НИИ, заводов-изготовителей, ведущих АТБ и ремонтных заводов). Параллельно с формированием программы ТО и Р ведутся работы по формированию программ безопасности полетов, надежности, эксплуатационной технологичности, организационно - технического обеспечения ТО и Р и др.

В силу того, что программа ТО и Р служит основой для разработки и корректировки эксплуатационно-технической документации (регламентов ТО, технологических указаний и т.д.), до момента ее утверждения ЛА не может быть передан в серийную эксплуатацию.

Программа содержит ряд разделов: общие положения, условия эксплуатации, эксплуатационные ограничения, характеристика ЛА как объекта ТО и Р, план ТО и Р, организация и средства ТО и Р и приложения.

Особое место в программе занимает "План ТО и Р", в котором оговариваются основные принципы построения и организации системы ТО и Р, приводится перечень комплектующих изделий и их распределение по стратегиям ТО и Р, режимы ТО и Р изделий, а также другая информация, необходимая для обеспечения эффективной эксплуатации ЛА.

Формирование "Плана ТО и Р" осуществляется на основе результатов специальных исследований, в состав которых входят (рис. 23): системный и структурный анализы, анализы надежности и эксплуатационной технологичности, а также эффективности ПТЭ ЛА или его прототипа.

Системный анализ проводится с целью группирования изделий по конструктивным и функциональным признакам (насо-

сы, клапаны, емкости, фильтры и т.д.). В результате анализа номенклатура объектов, подлежащих дальнейшим исследованиям, существенно сокращается.

Структурный анализ проводится с целью группирования изделий по уровню функциональной значимости. При этом используются элементы функциональной логики, которая позволяет выявить действующие в системах ЛА причинно-следственные связи и оценить влияние каждого изделия на работоспособность системы в целом. В частности, для всех изделий вычисляются значения показателя функциональной значимости $K_{фз}$:

$$K_{фз} = n_{ф} / N_{ф},$$

где $n_{ф}$ - число функциональных связей изделия;

$N_{ф}$ - общее число функциональных связей, действующих в системе.

Анализ надежности (безотказности) проводится с целью группирования изделий по степени влияния на безопасность полета и надежность системы, а также по характеру протекания процессов изменения ТС и т.д. В частности, для всех изделий вычисляются значения показателя опасности последствий отказов $K_{оп}$:

$$K_{оп} = n_{оп} / N_{оп},$$

где $n_{оп}$ - число опасных последствий (аварий, вынужденных посадок и т.д.), имевших место по причине отказа изделия;

$N_{оп}$ - общее число опасных последствий по причине отказов системы.

Анализ эксплуатационной технологичности (контролепригодности) проводится с целью группирования изделий по уровню приспособленности к выполнению типовых работ ТО и Р (ТД). В частности, для всех изделий вычисляются значения показателя невыявляемости отказов в полете $K_{но}$:

$$K_{но} = n_{но} / N_{но},$$

где $n_{но}$ - число невыявленных в полете отказов изделия;

$N_{но}$ - общее число невыявленных в полете отказов системы.

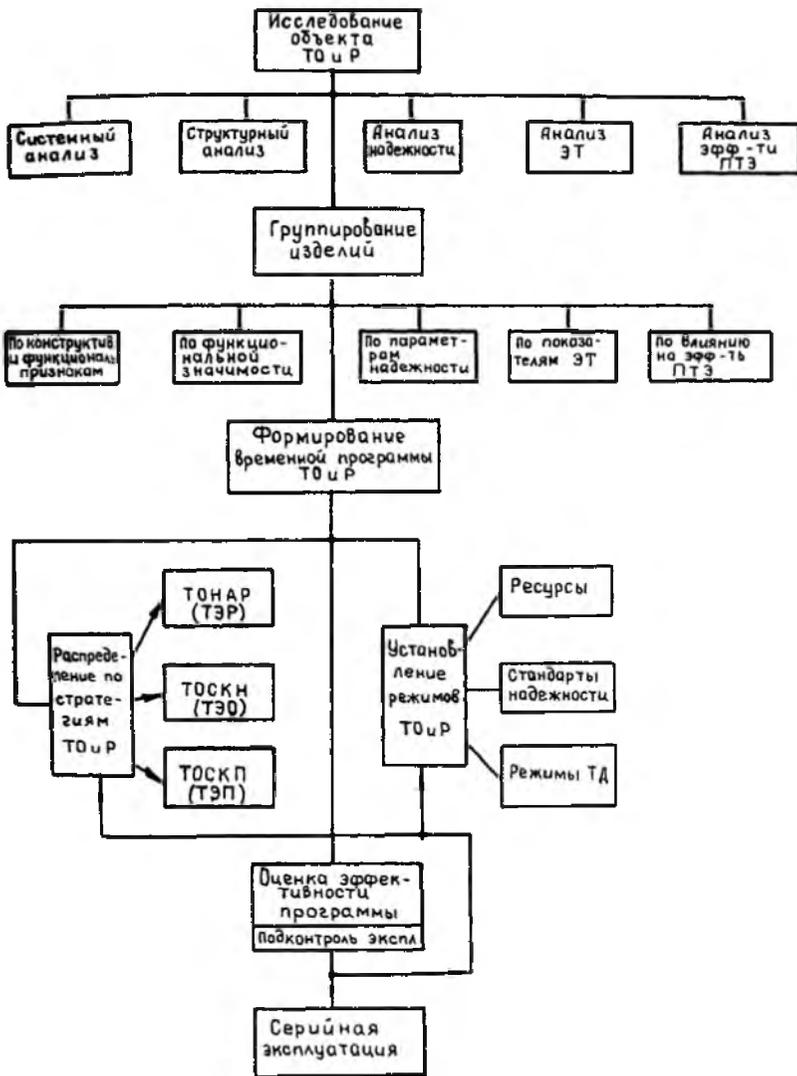


Рис. 23. Структура работ при формировании "Плана ТО и Р"

Анализ эффективности ПТЭ проводится с целью группирования изделий по степени влияния на показатели эффективности

эксплуатации ЛА. В частности, для всех изделий вычисляются значения показателя регулярности полетов (задержек вылетов) $K_{зв}$:

$$K_{зв} = n_{зв} / N_{зв},$$

где $n_{зв}$ - число задержек, связанных с ТО изделия;
 $N_{зв}$ - общее число задержек, связанных с ТО системы.

По результатам исследований проводится распределение изделий по стратегиям ТО и Р, устанавливаются режимы ТО и Р, разрабатываются организационно-технические мероприятия, направленные на реализацию программы.

Эффективность программы оценивается по результатам подконтрольной эксплуатации группы ЛА. Если при этом основные показатели ПТЭ соответствуют установленным требованиям, то работа над программой заканчивается и она передается в серийную эксплуатацию. Если показатели ПТЭ при реализации программы не соответствуют заданным значениям, проводятся дополнительные работы по ее корректировке (перераспределение изделий по стратегиям, изменение режимов ТО и Р и т.д.). В ходе серийной эксплуатации ЛА ведутся работы по дальнейшему совершенствованию программы ТО и Р и условий ее реализации в направлении повышения эффективности ПТЭ.

23. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ПО СТРАТЕГИЯМ ТО И Р

При разработке "Плана ТО и Р" решается задача распределения комплектующих изделий по стратегиям ТО и Р. При этом используются качественная и количественная методики.

Качественная методика (метод экспертных оценок) наиболее широкое распространение получила в зарубежных авиакомпаниях. Она базируется на субъективной оценке специфических свойств изделий и условий их эксплуатации. При проведении работ среди ведущих специалистов (экспертов), связанных с разработкой, производством, эксплуатацией и ремонтом АТ, распространяется анкета, содержащая краткие сведения о комплектую-

ших изделиях и условиях их эксплуатации, а также ряд вопросов, на которые предлагается ответить в форме "да" - "нет" (1 - 0). Анкета содержит несколько типовых и специальных вопросов.

К типовым вопросам, например, относятся:

1. Велико ли влияние отказа изделия на работоспособность системы и безопасность полетов ?

2. Скрыты ли от экипажа функции, выполняемые изделием?

3. Существует ли зависимость между вероятностью отказа изделия и наработкой ?

4. Можно ли обнаружить ранние признаки отказа изделия при ТО ?

5. Можно ли устранить типовые неисправности изделия за 30...40 минут стоянки ЛА ?

Специальные вопросы охватывают важнейшие эксплуатационные свойства изделий, особенности их эксплуатации и диагностирования, готовность предприятий к переводу изделий на ЭТС и т.д.

В зависимости от комбинации положительных (1) и отрицательных (0) ответов на поставленные вопросы для изделий подбирается наиболее эффективная стратегия ТО и Р. Так, например, при комбинации ответов 0-0-0-0-1 предпочтение обычно отдается стратегии ТОСКН, при комбинации 1-1-1-1-0 - стратегии ТОСКП, а при комбинации 1-1-1-0-0 - стратегии ТОНАР. При других комбинациях учитываются ответы и на специальные вопросы.

Количественная методика распределения изделий по стратегиям ТО и Р в настоящее время еще достаточно не отработана, в связи с чем широкого распространения не получила. Например, широкое распространение получила методика, основанная на использовании показателя работоспособности K_p :

$$K_p = (1 - K_{фз}) \cdot (1 - K_{оп}) \cdot (1 - K_{нв}) \cdot (1 - K_{зр}),$$

где $K_{фз}$, $K_{оп}$, $K_{нв}$, $K_{зр}$ - показатели функциональной значимости, опасности последствий отказов, невыявлений отказов в полете, задержки рейсов.

Значения показателей вычисляются на основе результатов специальных исследований, выполняемых по схеме, рассмотренной выше.

Так, при $1 > K_p > 0,7$ предпочтение отдается стратегии ТОСКН, при $0,7 > K_p > 0,5$ - стратегии ТОСКП, а при $0,5 > K_p > 0$ - стратегии ТОНАР. Кроме этого, учитываются и другие технико-экономические характеристики изделий.

Следует отметить, что рассмотренные методики распределения изделий по стратегиям ТО и Р, как правило, не позволяют однозначно решить поставленную задачу. Поэтому они используются только на начальных этапах формирования программы ТО и Р. Окончательное распределение изделий по стратегиям обычно проводится по результатам серийной эксплуатации ЛА.

24. ПЕРЕВОД ИЗДЕЛИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ (ЭТС)

До недавнего времени при создании АТ руководствовались в основном такими критериями, как новизна решений, надежность и долговечность. В последние годы в силу изменившейся экономической ситуации при создании АТ большое внимание уделяется вопросам обеспечения высокой эффективности процесса ТЭ. В связи с этим наблюдается повышенный интерес к переводу изделий на ЭТС, обеспечению их технологичности и контролепригодности, созданию эффективных средств ТД и т.д.

Сегодня заводы-изготовители АТ принимают активное участие в проведении исследований, связанных с переводом изделий на ЭТС, разработке эксплуатационной документации, выпуске технологического оборудования, в проведении доработок и проверок изделий, восстановлении отказавших изделий и других эксплуатационных мероприятиях. Для этого на заводах-изготовителях существенно расширяются функции отделов эксплуатации и ремонта (ЭРО), которые по уровню технической оснащенности и численности работников сегодня не уступают цехам основного производства.

Перевод АТ на ЭТС обычно проводится по многошаговому принципу, начиная с отдельных комплектующих изделий, в порядке, оговоренном соответствующими отраслевыми стандартами (рис. 24). Так, например, в соответствии с "Положением о по-

рядке перевода и эксплуатации ГТД, их агрегатов и комплектующих изделий по техническому состоянию" сегодня на ЭТС переведена большая часть ГТД для транспортных самолетов ГА.

Программа перевода изделий на ЭТС разрабатывается ведущими КБ на основе результатов специальных исследований, данных эксплуатации, стендовых и летных испытаний. Необходимыми и достаточными условиями для перевода изделия на ЭТС считаются: достижение заданного уровня надежности (безотказности); наличие достаточного опыта эксплуатации; достаточный уровень технологичности и контролепригодности; наличие отработанной системы ТД; установление величин гарантийного и назначенного ресурсов, а также величин ступеней продления ресурса при переводе изделия на ЭТС; наличие программы ТО и Р и эксплуатационной документации; наличие положительного экономического эффекта от перевода изделия на ЭТС.

Решение о переводе изделия на ЭТС основывается на заключении головного НИИ (ЦИАМ, ЦАГИ и др.) и утверждается генеральным конструктором. Сотрудники заводов и КБ, участвующие в работах по переводу изделия на ЭТС, несут персональную ответственность за его безотказность и получают денежное вознаграждение в размере до 30 % от получаемой прибыли за каждую ступень продления ресурса.

Эксплуатационные и ремонтные предприятия ГА в работах по переводу изделий на ЭТС практически не участвуют. Это объясняется их слабой материально-технической базой, а также отсутствием материальной заинтересованности.

В ходе эксплуатации изделий по состоянию выделяются 2 этапа: эксплуатация в пределах гарантийного ресурса с проведением комплекса планово-предупредительных мероприятий в рамках стратегии ТОНАР; эксплуатация по состоянию в пределах назначенного ресурса (разрешенной наработки) с проведением комплекса планово-предупредительных мероприятий в рамках стратегий ТОСКН или ТОСКП.

Продление ресурса изделий после отработки гарантийного ресурса обычно проводится ступенями по 75...300 часов, на основе результатов проверки ТС изделий и проведения комплекса восстановительных мероприятий (регулировка агрегатов, замена отказавших элементов и т.д.), проводимых силами ЭРО завода-изготовителя.

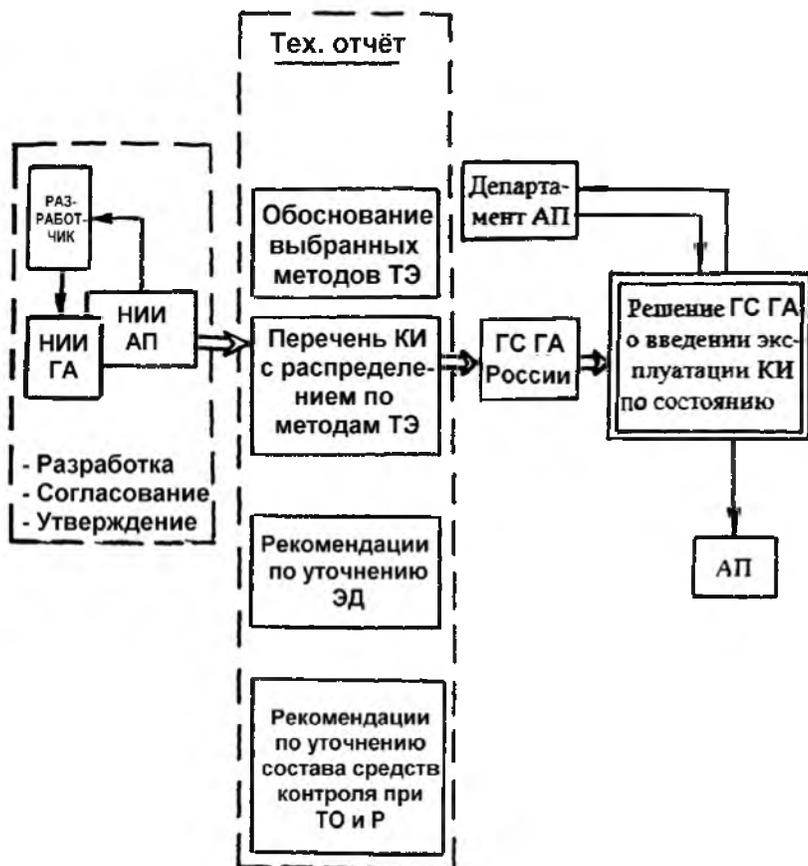


Рис. 24. Структура работ по переводу комплектующих изделий на ТЭС

В ходе ЭТС допускается замена отработавших индивидуальный ресурс элементов (дисков турбин, подшипников, форсунок и т.д.), а также снятие изделий с эксплуатации для проведения углубленного диагностирования и доработки конструкции в условиях завода-изготовителя.

Разрешенная наработка изделий по мере накопления информации о надежности и опыта ЭТС обычно увеличивается. Для этого через определенные интервалы наработки (500...1000

часов) проводятся комплексные исследования по оценке запасов работоспособности изделий, которые включают длительные стендовые испытания на подтверждение ресурса, полную разборку и дефектацию нескольких изделий, снятых с эксплуатации, и т.д. Так, например, разрешенная наработка (до первого капитального ремонта) двигателей НК-8-2У и НК-86 сегодня составляет 12...16 тыс. часов при гарантийном ресурсе 2000 часов.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учебник для вузов / Под ред. Н.Н. Смирнова. - М.: Транспорт, 1990. - 423 с.
2. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. - М.: Транспорт, 1987. - 272 с.
3. Смирнов Н.Н., Андронов Н.Н. и др. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. - М.: Транспорт, 1974. - 304 с.
4. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов. - М.: Транспорт, 1994. – 256 с.

Учебное издание

*Макаровский Игорь Мстиславович,
Матейко Олег Николаевич*

**ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кретинина
Корректор Т.К. Кретинина

Лицензия ЛР № 020301 от 30 декабря 1996 г.

Подписано в печать 19.09.2001 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 4.41. Усл. кр.-отт. 4.53. Уч.-изд. л. 4.75.

Тираж 150 экз. Заказ . Арт. С-22 (Д1) /2001.

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического
университета
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.