

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Е.Д. Герасимова, Н.Н. Смирнов, И.Ф. Полякова

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЁЖНОСТЬ
И РЕЖИМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ЛА И АД.

Москва – 2002

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РФ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кафедра технической эксплуатации
летательных аппаратов и авиационных двигателей
Е.Д. Герасимова, Н.Н. Смирнов, И.Ф. Полякова

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЁЖНОСТЬ
И РЕЖИМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ЛА И АД

Рекомендуется УМО для
межвузовского исполь-
зования в качестве учебного
пособия для студентов
специальности 130300

Москва – 2002

БКБ....

....

Печатается по решению редакционно-издательского совета Московского государственного технического университета ГА.

Рецензенты: проф. А.А. Ицкович, проф. В.С. Шапкин

Герасимова Е.Д., Смирнов Н.Н., Полякова И.Ф.

Эксплуатационная надёжность и режимы технического обслуживания ЛА и АД.
Учебное пособие.

–М.:МГТУ ГА, 2002.-...с. :Ил..., табл..., список лит. ... наим.

ISBN_____

Данное учебное пособие издаётся в соответствии с учебным планом для студентов V курса специальности 160901 дневного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры

и методического совета по специальности 160901

Принятые обозначения:

АТ - авиационная техника

ЛА - летательный аппарат

АД - авиационный двигатель

ТО - техническое обслуживание

ФС - функциональная система

ЭАП - эксплуатационное авиапредприятие

ЭН - эксплуатационная надёжность

ТОиР - техническое обслуживание и ремонт

ИУС - информационно-управляющая система

Содержание

Введение.....	6
1. Физические аспекты эксплуатационной надёжности, рассматриваемые при формировании ТО ЛА и АД.....	7
1.1. Классификация эксплуатационных повреждений и отказов в конструкции ЛА и АД.....	7
1.2. Процессы накопления эксплуатационных повреждений.....	10
1.3. Модели возникновения и развития отказов и неисправностей.....	12
1.3.1. Классификация моделей отказов и неисправностей	12
1.3.2. Модели отказов и неисправностей обслуживаемых изделий.....	14
1.3.3. Обобщённые модели отказов и неисправностей	15
1.3.4. Статистические модели возникновения отказов и неисправностей изделий АТ.....	16
2. Методы анализа эксплуатационной надёжности, используемые при формировании режимов ТО ЛА и АД.....	19
2.1. Характеристика задач и методов анализа эксплуатационной надёжности.....	19
2.2. Статические критерии согласия, используемые при анализе эксплуатационной надёжности.....	22
2.3. Анализ эксплуатационной надёжности невосстанавливаемых изделий	25
2.4. Анализ эксплуатационной надёжности восстанавливаемых изделий.....	26
3. Методы формирования режимов ТО ЛА и АД.....	29
3.1. Методы формирования режимов ТО функциональных систем.....	29
3.1.1 Структура режимов ТО функциональных систем.....	29
3.1.2. Методика формирования режимов ТО изделий ФС, эксплуатируемых до отказа.....	31
3.1.3. Корректировка режимов профилактических работ изделий ФС заменяемых по состоянию.....	35
3.2. Методы формирования режимов ТО планера	38
3.2.1. Влияние эксплуатационно-технических характеристик планера на формирование режимов ТО	38
3.2.2. Методы корректировки режимов ТО планера по результатам эксплуатационных наблюдений.....	40
3.2.3. Определение режимов выборочного контроля опасных зон конструкции планера.....	42
3.3. Методы формирования режимов ТО двигателя.....	44
3.3.1. Влияние эксплуатационно-технических характеристик двигателя на формирование режимов ТО.....	44
3.3.2. Методы формирования режимов ТО двигателей при эксплуатации до предотказового состояния.....	46
4. Управление эксплуатационной надёжностью и режимами ТО ЛА и АД в эксплуатационном предприятии	49
4.1. Определение эффективности режимов ТО.....	49
4.2. Управление режимами ТО при формировании гибкой ТО ЛА и АД.....	54
Литература.....	58

Введение

Эффективность использования самолётов ГА и затраты на техническую эксплуатацию в значительной степени определяются уровнем эксплуатационной надёжности авиационной техники (ЭН АТ) и режимами ТО ЛА и АД. В условиях возрастающей конструктивной сложности ЛА и его функциональных систем (ФС), нарастающей конкуренцией между фирмами-разработчиками АТ и между эксплуатирующими предприятиями (ЭАП) задача повышения эффективности использования ЛА и снижения затрат на ТОиР приобретает особо важное значение. Решение возможно только на основе современных научных методов теории надёжности, на основе вероятностного представления об исследуемых процессах.

В центре внимания должен находиться объект эксплуатации: ЛА и его ФС. Целесообразно рассматривать индивидуально планер, ФС и двигатель ЛА, что оправдано конструктивно-эксплуатационными особенностями объектов. Так, для планера, особое внимание следует уделять прочностным свойствам конструкции, которые при эксплуатации могут изменяться из-за проявления усталостных, коррозионных и износных повреждений. Для ФС следует иметь в виду конструктивное и функциональное резервирование элементов и необходимость диагностирования их технического состояния. Для двигателя- модульность конструкции современных АД, возможность прогнозирования основных параметров, развитие средств и методов диагностирования технического состояния АД.

Сегодняшние условия эксплуатации ЛА и АД- это современный уровень развития системы ТОиР, формирования программы ТО ЛА и АД и использование не только традиционных ТО по наработке (ТОНАР), когда изделие эксплуатируется до выработки ресурса, но и ТО по состоянию с контролем параметров (ТОСКП).

Применение стратегий ТО ЛА и АД обуславливает основные правила формирования ТО. Для ТОНАР- установление ресурса, периодичность профилактического ТО; для ТОСКП- установление допусков на диагностируемые параметры, периодичность их контроля; для ТОСКН- установление допустимых уровней надёжности изделий АТ, периодичность их контроля, работы по определению фактического уровня надёжности, периодичность и объёмы профилактических работ. Под режимами ТО ЛА и АД понимаются условия выполнения ТО, включающие перечень и периодичность выполнения операций с целью поддержания исправности и работоспособности АТ. Другими словами- совокупность объёмов работ по ТО и периодичность их выполнения. Режимы ТО устанавливаются регламентом ТО для каждого типа ЛА. При формировании ТО ЛА и АД решаются вопросы определения перечня работ, периодичность проведения каждой из назначенных работ, группировка работ в оптимальные формы регламента для ЛА в целом. Режимы ТО обуславливаются заданным уровнем безотказности изделий ФС и ЛА, опытом эксплуатации, условиями и интенсивностью использования ЛА.

Таким образом, налицо тесная связь между ЭН и режимами ТО ЛА и АД и ясен круг вопросов, подлежащих решению. Особо важное значение приобретает эта связь с требованиями обеспечения безопасности полётов, когда основным рычагом для её обеспечения служат именно режимы ТО.

Принято считать, что надёжность АТ закладывается при проектировании, обеспечивается при производстве и поддерживается в процессе эксплуатации. В данном учебном пособии рассматривается этап эксплуатации ЛА и АД. Отсюда и введение термина «эксплуатационная надёжность»- свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации. Условия практической эксплуатации АТ отличаются значительным разнообразием и нестабильностью: интенсивность использования, климатические условия, режимы работы ФС и их изделий, уровень подготовки лётного и технического состава, материально- техническая база и организация ТО. Эти факторы

значительно сказываются на показателях надёжности и, соответственно, на режимах ТО и могут быть уточнены только на основе опыта эксплуатации парка ЛА в ЭАП.

Настоящее учебное пособие направлено на получение студентами необходимых знаний по методам формирования и корректировки режимов их ТО.

Пособие состоит из 4 глав. В первой главе рассматриваются физические аспекты эксплуатационной надёжности ЛА и АД, вторая глава посвящена методам анализа эксплуатационной надёжности, используемым при формировании режимов ТО. В третьей главе изложены методы формирования режимов ТО ЛА и АД, в четвёртой- подходы к управлению эксплуатационной надёжностью и режимами ТО ЛА и АД в эксплуатационном предприятии.

1. Физические аспекты эксплуатационной надёжности, рассматриваемые при формировании режимов ТО ЛА и АД.

1.1. Классификация эксплуатационных повреждений и отказов в конструкции ЛА и АД.

Условия практической эксплуатации объектов АТ отличаются значительным разнообразием и нестабильностью.

В процессе эксплуатации изменяются:

- наработка ЛА и изделий ФС с начала эксплуатации или после очередного ремонта (в часах налёта, числе посадок, количестве включений и т.д.), т.е. их «возраст»;
- климатическая среда, в которой используются изделия (температура и давление, влажность, запылённость и засолённость воздуха, воздействие агрессивных или химических веществ и т.д.);
- фактические режимы работы самолёта и его систем в зависимости от дальности и высоты полёта, частоты взлётов-посадок, размеров и высоты аэродромов, продолжительности руления и т.д.;
- уровень подготовки и мастерства лётных экипажей, выражающийся в умении подбирать наиболее выгодные режимы работы самолётных систем и соблюдать установленные правила эксплуатации;
- организация ТО, т.е. режимов ТО, техническое обеспечение процессов ТО, использование методов контроля технического состояния объектов АТ, применяемое оборудование и приспособления;
- качество выполнения работ по ТО, зависящее от своевременного обнаружения и устранения дефектов, выполнение профилактических работ и замены агрегатов, технической оснащённости производственной базы ЭАП, квалификации и достаточной численности технического персонала и рабочих, организации их труда.

Перечисленные факторы определяют уровень эксплуатационной надёжности ЛА и его систем, т.к. в общем случае носят случайный характер и приводят к тому, что в процессе эксплуатации ЛА происходят изменения технического состояния элементов его конструкции: возникновение и развитие отклонений от технических условий и чертежей; появление отказов и неисправностей, обусловленных различными дефектами АТ.

Большинство указанных дефектов являются управляемыми, т.е. могут быть сознательно изменены путём формирования оптимальных режимов ТО и разработки мероприятий, направленных на своевременную ликвидацию возникающих факторов или их предупреждение. С этой целью возможные дефекты АТ должны быть классифицированы по характеру и происхождению [1]. Следует выделить следующие группы: I группа- трещины, деформации и разрушения усталостного характера, вызванные действием многократно повторяющихся эксплуатационных нагрузок; II группа – выработка (люфты) подвижных

сочленений, ослабление резьбовых соединений и заклёпочных швов, потёртости и другие виды механического износа элементов конструкции; III группа – разрушения и деформации, вызванные разовыми действиями нагрузок, превышающих расчётные и связанные с особыми условиями полёта (сильная болтанка, гроза, град и т.д.) или с нарушениями правил пилотирования самолёта (грубая посадка, приземление на повышенной скорости, неправильное руление и пр.); IV группа – потери свойств смазок и специальных жидкостей, используемых в узлах, агрегатах и системах ЛА, а также старение деталей, изготовленных из органических материалов (прокладки, манжеты, стекла и пр.); V группа – разрушение лакокрасочных и других видов защитных покрытий; VI группа – коррозия обшивки, силового набора и других элементов конструкции ЛА; VII группа – механические повреждения (деформации, пробоины, царапины и др.), вызванные небрежностью при ТО или при выполнении погрузочно-разгрузочных работ. К возникновению перечисленных групп дефектов следует отнести такие дефекты: наработка АТ и количество полётов (I и II группы); организация и практическое выполнение полётов (III группа); календарный срок и климатические условия эксплуатации (IV, V, VI группы); недостатки организации труда, квалификация рабочего персонала (VII группа).

Предложенная классификация эксплуатационных повреждений и отказов является базой для прогнозирования технического состояния изделий АТ и для разработки профилактических мероприятий, которые непосредственно должны отражаться в режимах ТО.

Такой подход предполагает использование некоторых терминов и определений [2]. ЭН будет рассматриваться как сложное свойство, включающее безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени (наработки) в заданных условиях эксплуатации.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТОиР. Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение либо восстановление недопустимо или нецелесообразно.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Отказ – состояние, заключающееся в нарушении работоспособности.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации.

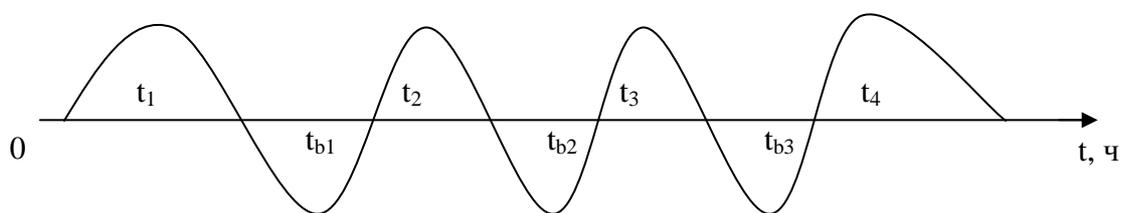
Неисправность – состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта.

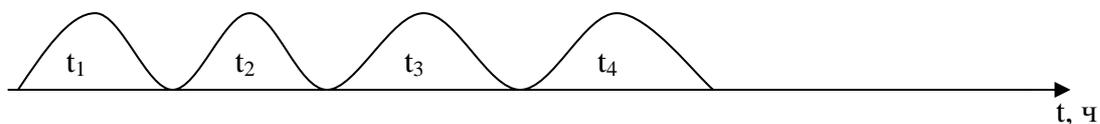
Восстанавливаемыми будут называться изделия, при рассмотрении процесса эксплуатации которых учитываются восстановления. Восстановление может трактоваться как ремонт изделия на борту ЛА или восстановление изделия путём регулировки, смазки и т.д.

Невосстанавливаемыми будут называться изделия, эксплуатация которых рассматривается только до момента отказа. Это определение не означает, что данные изделия вовсе не могут восстанавливаться. Понятие «невосстанавливаемые» изделия целесообразно использовать для исследования процесса возникновения повреждений изделий. Понятие «восстанавливаемое» изделие – для исследования процессов возникновения и развития повреждений АТ с учётом периодичности и объёмов их восстановления. Принято рассматривать несколько схем процесса эксплуатации изделий АТ для точной классификации их отказов и повреждений (рис.1) [1]. Рассматриваются несколько схем для

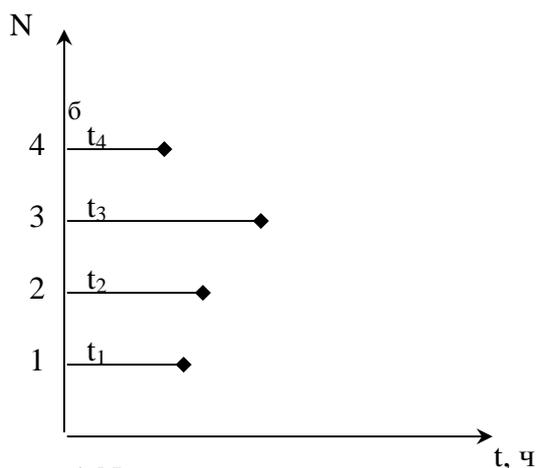
описания реального процесса возникновения отказов и повреждений при эксплуатации парка ЛА: схема реальной эксплуатации парка ЛА (а); схема, рассматривающая восстановление изделий мгновенно, без учёта времени, необходимого на восстановление (б); схема, учитывающая наработки до отказа каждого изделия, когда они рассматриваются невосстанавливаемыми (в); схема, учитывающая продолжительность восстановления каждого изделия, для исследования процесса восстановления изделий АТ и факторов, влияющих на него (оборудование, квалификация исполнителей, организация рабочих мест и т.д.) (г). В случае (в) случайной величиной будут наработки до появления неисправности изделия или его отказа $\{t_i\}$, измеряемые в часах наработки являющиеся непрерывной случайной величиной. Показателем безотказности в таком случае рассматривается: $P(t)$ - вероятность безотказной работы за наработку t ; $\lambda(t)$ - интенсивность отказов; T_{cp} - средняя наработка до отказа. В случае (б) возможно наблюдать две случайные величины: $\{t_i\}$ - наработка до отказов изделий (непрерывная случайная величина) и количество отказов за интервал наработки (t_1, t_2) - $\{n_i\}$, которое является дискретной случайной величиной.



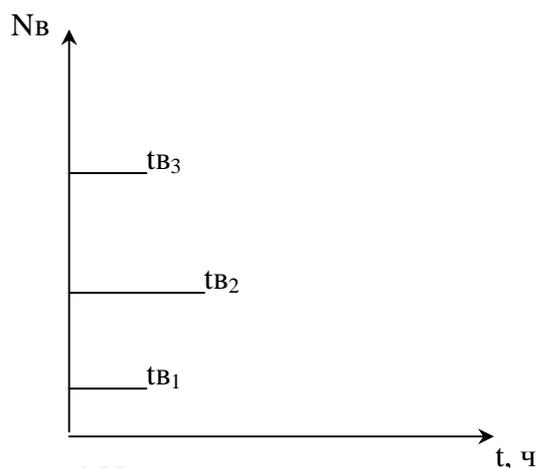
а) t_1, t_2, t_3 – наработки до отказа изделий;
 t_{b1}, t_{b2}, t_{b3} – время восстановления изделий



б)



в) N - количество наблюдаемых изделий



г) $Nв$ - количество восстановления изделия

Рис.1. Схемы процесса эксплуатации изделий АТ:

- а) реальная эксплуатация;
- б) мгновенное восстановление;
- в) невосстанавливаемые изделия;
- г) исследование времени восстановления;

Показателями безотказности в этом случае будут: $P(t_1, t_2)$ - вероятность безотказной работы в интервале (t_1, t_2) ; параметр потока отказов- $\omega(t)$; средняя наработка на отказ- $T_{ср}$. Достаточно часто используют также наработку K_{1000} - количество отказов на 1000ч. наработки. Для оценки долговечности восстанавливаемых изделий приняты показатели ресурсов и сроков службы, в часах наработки и в календарных сроках, соответственно: средний, гамма-процентный, до 1^{го} ремонта, межремонтный, назначенный, гарантийный [2]. Рассмотренные примеры возникновения отказов или повреждений дают возможность корректно исследовать процесс их возникновения, классифицировать их и принимать решения о процессе их развития, рассчитывая указанные показатели ЭМ.

1.2. Процессы накопления эксплуатационных повреждений.

Для осуществления научно-обоснованных прогнозов технического состояния объектов АТ и количественной оценки уровня ЭМ ЛА и его ФС необходимо разделить процессы накопления эксплуатационных повреждений.

По характеру изменения основных параметров объектов АТ и накоплению повреждений от наработки различают процессы с внезапным отказом (скачкообразный выход значения основного параметра за пределы допусков) и с постепенными отказами (постепенный выход значения основного параметра за пределы допусков) [1]. Внезапный характер связан обычно с механическими повреждениями (поломки, трещины, обрывы и т.д.). Постепенный характер связан с процессами износа, коррозии, усталости, старения и ползучести материалов. Рассмотренные по такому признаку процессы накопления повреждений позволяют использовать для прогноза и оценки ЭН известные вероятностные модели (законы распределения наработки до появления повреждений).

Более детальное исследование процессов накопления повреждений должно учитывать механизмы развития повреждений. Различают [3]:

1. Повреждения от длительно приложенных нагрузок: в упругонапряжённых элементах авиаконструкции непрерывно протекают процессы пластического деформирования (накопления остаточной деформации); повреждения относятся к категории структурно-чувствительных процессов; интегральной характеристикой является величина накопленной остаточной деформации; для описания используют линейное суммирование повреждений, но в подавляющем большинстве случаев присутствует закон нелинейного суммирования повреждений;
2. Повреждения при повторно-переменном нагружении (усталостные процессы): повреждение происходит вследствие совместного воздействия двух независимо протекающих процессов (кратковременных резонансных нагрузок – обусловлено типом материала и нестационарностью нагружения; циклического старения); процесс описывается кривыми усталости и имеет следующую последовательность – накопление первичных повреждений, формирование микротрещин и их слияние, распространение магистральных трещин, статический долом;
3. Повреждения конструкции при термоусталости: при увеличении ресурсов газотурбинных двигателей (ГТД) возрастает доля отказов, связанных с термоусталостными повреждениями; возникают повреждения из-за напряжений внутри материала, причина- неравномерность его прогрева; законы накопления напряжений нелинейны;
4. Повреждения при изнашивании: различают изнашивание при трении скольжения, трении качения, абразивное изнашивание, газообразное изнашивание; обобщённая модель процесса – функция, строящаяся по накопленным статическим данным об износе на различных этапах наработки; процесс связан с условиями нагружения, с наличием и качеством смазки;

5. Повреждения от окружающей среды (коррозия): обусловлены электрохимическими процессами, основанными на протекании коррозионного тока в присутствии кислорода; виды многообразны и зависят от условий работы и типа материала, существенно влияют на характеристики выносливости материалов, требуют периодического контроля степени повреждения.

Даже такой краткий анализ процессов накопления повреждений демонстрирует необходимость детального их изучения и применения различных моделей накопления повреждений для прогнозирования показателей ЭН, технического состояния объектов и формирования режимов ТО ЛА и АД.

В табл.1. представлены типовые отказы и повреждения ЛА и АД и указаны факторы, вызывающие их.

Анализ физической сущности и причин отказов и повреждений объектов АТ, процессов накопления повреждений рекомендуется проводить в следующей последовательности: определение отказов, угрожающих безопасности полётов; выявление изделий, узлов, деталей, повреждение которых снижает ЭН ЛА; систематизация отказов и повреждений по причинности; выявление основных конструктивно-производственных недостатков (КПН) и недостатков эксплуатации и ТО; определение отказов и повреждений, связанных с различными условиями эксплуатации; определение средне-статических значений показателей ЭН.

При проведении анализа следует использовать информацию КУНАТ, рекламационные и технологические акты, отчёты и акты по результатам исследования деталей, агрегатов, изделий, досрочно снятых с эксплуатации и др. Материалы анализа систематизируются: по количеству неисправностей (по типам ЛА и видам оборудования, по ФС); по причинности и последствиям; по отказам, выявленным в полёте и при различных формах ТО; по отказам, являющимся причинами инцидентов; по характеру и количеству повторяющихся отказов и повреждений. Результаты анализа служат основой для формирования перечня объектов работы по ТО и периодичности их выполнения.

Типовые отказы и повреждения ФС ЛА

Таблица 1.

№	Наименование ФС	Типовые отказы и повреждения	Факторы влияющие на ФС
1	2	3	4
1	Шасси	Изменение технического состояния пневматиков, тормозных устройств.	Вибрации, упругие деформации, нагрев элементов конструкции при эксплуатации; климатические условия
2	Система управления	Замерзание скопившейся влаги, отказы электроприводов, изменение натяжения тросовой проводки, выработка деталей шарнирных соединений, износ.	Внешние климатические воздействия, нарушения правил погрузочно-разгрузочных работ, аэродинамические нагрузки
3	Гидрогазовые системы и системы жизнеобеспечения	Внешние и внутренние утечки, повреждение механических элементов гидроприводов, выход из строя уплотнений, коррозия, попадание воздуха в систему	Стационарные случайные нагрузки, вызывающие вибронапряжение в трубопроводах; изменение давления в магистралях; нестационарное изменение температурных режимов в полёте, изменение температуры рабочей жидкости; внешние аэродинамические нагрузки
4	Топливная	Засорение топливных фильтров, наличие воды в топливе, нарушение регулировки топливного насоса, негерметичность баков	Вибрационные нагрузки, температурные нагрузки, коррозия, загрязнения

1.3. Модели возникновения и развития отказов и неисправностей АТ.

1.3.1. Классификация моделей отказов и неисправностей.

Классификация отказов и повреждений АТ, рассмотренная в предыдущем разделе, позволяет построить модели возникновения и развития отказов и неисправностей изделий АТ при эксплуатации ЛА и, в дальнейшем, рассчитывать характеристики (параметры) таких моделей, перейти к оценке и анализу ЭМ и формированию режимов ТО для её поддержания. Предложена следующая классификация моделей [4] (рис.2).

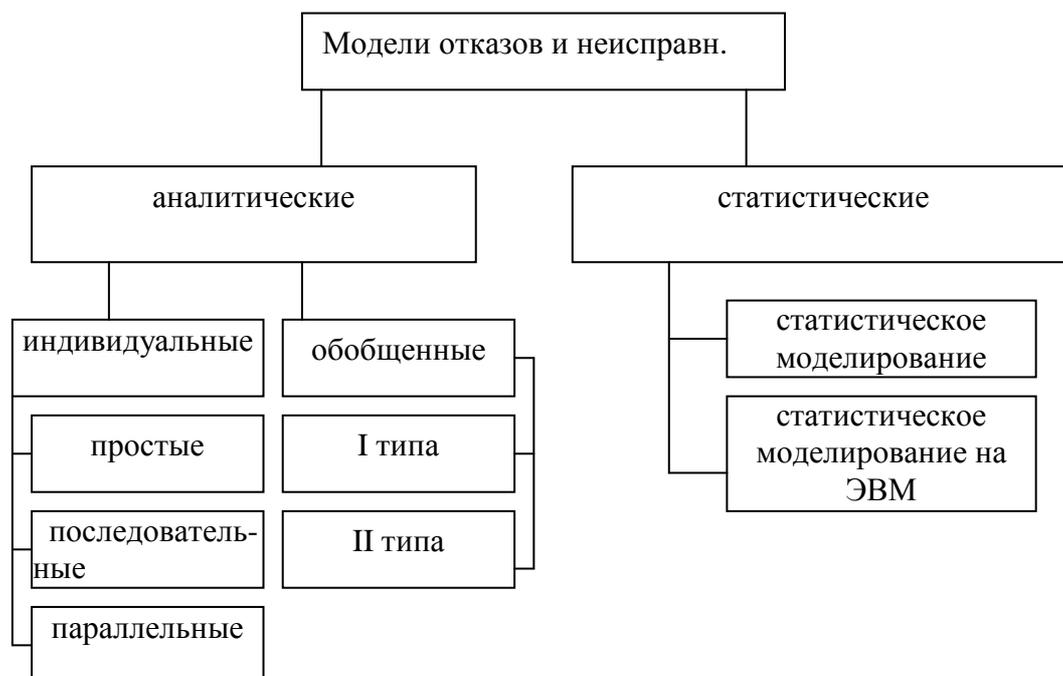


Рис.2. Классификация моделей отказов и неисправностей АТ

Аналитические модели позволяют исследовать процесс возникновения и развития отказов и неисправностей оптимальными методами. Статистические модели предполагают использование статистического моделирования, известного под названием «метод Монте-Карло». Индивидуальные модели используют индивидуальный подход к каждому отказу и целесообразны для исследования «опасных» отказов, влияющих на безопасность полётов, и для установления ресурсов изделий. Обобщённые модели предполагают групповой анализ, при котором прогнозируется возникновение нескольких отказов и неисправностей. Примером группового анализа можно рассматривать внешний осмотр силовой установки, когда выполняется осмотр сразу всех комплектующих изделий (силовых элементов, насосов, регуляторов, фильтров, датчиков и т.д.). На всех изделиях возможно возникновение различных повреждений и практически невозможно прогнозирование каждого индивидуально, тогда целесообразно описать отказы и неисправности всех изделий в комплексе. Принцип моделирования для всех рассматриваемых групп следующий: выявляются состояния исправности, неисправности, отказов и описываются переходы из состояния в состояние. Т.е. процесс изменения технического состояния изделия при эксплуатации ЛА описывается рядом состояний $\{E\}=E_0, E_1, E_2, \dots, E_k=E^*$, где E_0 - исправное состояние изделия, E_1, E_2 - состояния изделия с одной или несколькими неисправностями, $E_k=E^*$ - состояние отказа изделия. При таком описании процесса простые модели будут иметь всего два состояния: $E_0 \rightarrow E_1=E^*$; последовательные модели будут отражать процесс

накопления повреждения: $E_0 \rightarrow E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow \dots \rightarrow E_k = E^*$; параллельные модели предполагают параллельное, независимое развитие нескольких отказов, например для фильтра:

$$\begin{cases} E_0 \rightarrow E_1 = E^* & \text{(а) } \text{н} \\ E_0 \rightarrow E_1 \rightarrow E_2 = E^* & \text{(б)} \\ E_0 \rightarrow E_1 = E^* & \text{(в)} \end{cases} \quad (1)$$

где (а)- засорение фильтра, (б)- отказ электропроводки, (в)- разрушение уплотнения.

Основная характеристика таких моделей- распределение времени перехода из одного состояния в другое, иначе распределение наработки до появления неисправности и наработки до появления отказа. Пусть имеется $k+1$ состояние $\{E_0, E_1, E_2 \dots E_k\}$, при этом t_i ; $i=1, \overline{k-1}$ - время, необходимое для перехода из состояния E_{i-1} в E_i , $t_{1,k}=t_1+t_2+\dots+t_k$ - время, необходимое для перехода из E_0 в E_k . Функция распределения непрерывной случайной величины t_i запишется:

$$F_i(t) = P\{t_i \leq T\} = \int_0^t f_i(t) dt, \quad (2)$$

где f_i - плотность распределения величины t .

Для параллельной модели $t = \min\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, где n - число возможных отказов, а

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)].$$

Плотность распределения $f_i(t)$ определяется законами распределения случайной величины. Наиболее часто используют следующие распределения:

- экспоненциальное, когда интенсивность отказов $\lambda(t) = \text{const}$, не зависит от времени, т.е. наработка изделия не сказывается на его техническом состоянии; например техническое состояние изделия характеризуется прочностью на разрыв r , отказ наступает, когда $r > r_{\text{доп}}$, при этом наработка изделия до этого момента значения не имеет, т.к. отказ возникает при превышении действующей нагрузки допустимого значения; или другой пример- изделие состоит из большого количества элементов, неисправность любого приводит к отказу изделия, тогда в случае, если каждый элемент высоконадёжен, $P_i(t)$ каждого элемента стремится к 1, а элементов более 50 (радиооборудование), то наработка изделия значения не имеет;
- нормальное, хорошо описывает процесс износа, когда до момента разрушения (отказа) проходит износ отдельных слоёв материала или элементов изделия, тогда интенсивность отказов зависит от наработки;
- логарифмически нормальное, когда изделие подвержено внешним нагрузениям и каждое воздействие приводит к повреждению; величина повреждения зависит от уже накопленных повреждений (усталость);
- распределение Вейбулла, хорошо описывает процесс, когда изделие состоит из большого количества элементов, подверженных повреждениям; развитие повреждений взаимно независимо; отказ наступает при первом повреждении.
- Обобщённые модели различают двух типов: неисправности накапливаются и превращаются в отказ (I тип- пуассоновская модель) и каждая неисправность со временем превращается в отказ (II тип). При этом поток появления отказов характеризуется $\omega(t)$ - параметром потока отказов.

1.3.2. Модели отказов и неисправностей обслуживаемых изделий.

Реальный процесс технической эксплуатации изделий АТ предполагает проведение профилактических работ или диагностирование их технического состояния. Тогда практический интерес представляет формирование модели возникновения и развития повреждений и отказов изделия с учётом проведения его ТО в соответствии с формами периодического обслуживания (Φ_1, Φ_2, Φ_3). Для описания такого процесса целесообразно использовать последовательную модель $E_0 \rightarrow E_1 \rightarrow E_2 = E^*$ [6]. Нарботка t_i , при которой изделие будет переходить из состояния в состояние, является величиной случайной и характеризуется функциями распределения: $F_1(t)$ - функция распределения наработки, необходимой для перехода из E_0 в E_2 . В общем случае законы распределения, определяющие $F_1(t)$ и $F_2(t)$ могут быть разные, их выбор зависит от процессов накопления повреждений в изделии.

Пусть ТО проходит в моменты времени по наработке $\tau, 2\tau, \dots, k\tau$, что соответствует периодичности выполнения регламентных работ; при этом выполняется диагностирование технического состояния изделия, и, если в момент $j\tau$ изделие исправно (состояние E_0), то обслуживание не проводится. Схема изменения технического состояния изделия с учётом процессов ТО представлена на рис.3.

Рис.3.

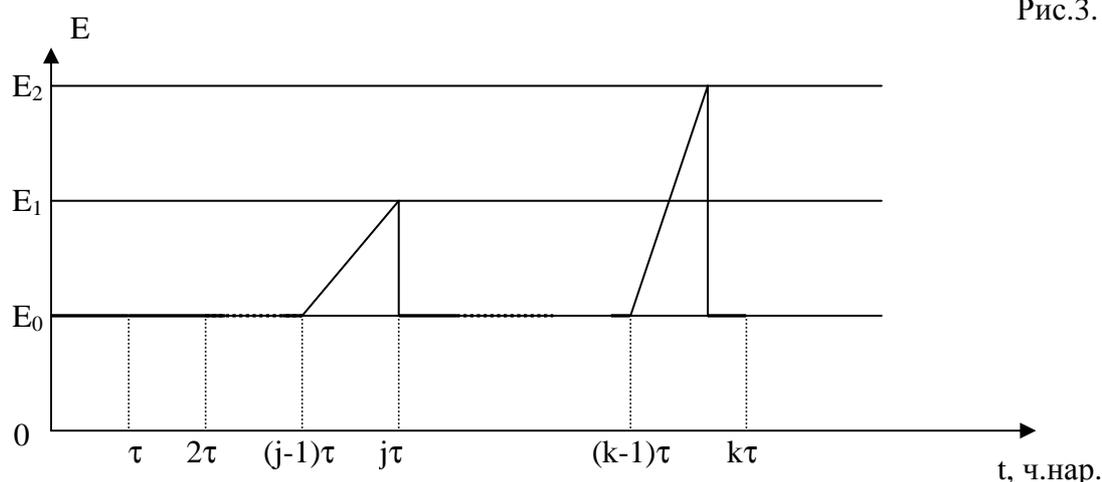


Рис.3. Схема изменения технического состояния изделия с учётом периодичности ТО.

Рассмотренная модель позволяет вычислить вероятность безотказной работы для любой, наперёд заданной наработки $t_{зад}$, т.е. прогнозировать техническое состояние изделия на момент проведения $k^{ой}$ формы ТО.

Для определения вероятности безотказной работы изделия рассматриваются все случаи, когда изделие будет находиться в состоянии E_0 . Такая ситуация возможна в одном из трёх случаев: при $\tau, 2\tau, \dots, (j-1)\tau$ изделие находится в состоянии E_0 , а в момент $j\tau$ диагностировано повреждение, т.е. изделие находится в состоянии E_1 (1 случай); изделие находится в состоянии E_0 в интервале $[0, j\tau]$, т.к. в момент $j\tau$ проведено ТО и изделие восстановлено (2 случай); в любой момент $i\tau (i=1, \overline{j-1})$ изделие могло находиться в состоянии E_1 и после этого момента (после восстановления) попало в состояние E_0 (3 случай). Случай, когда изделие попадает в состояние E_2 не должен рассматриваться, т.к. оценивается безотказность изделия. Вероятность возникновения каждого случая определяется уравнениями:

$$1 \text{ случай} \rightarrow \int_{(j-1)\tau}^{j\tau} [1 - F_2(j\tau - u)] dF_1(u) = q_j; \quad (3)$$

и – наработка в интервале $j\tau, (j-1)\tau$

$$2 \text{ случай} \rightarrow 1 - F_1(j\tau); \quad (4)$$

$$3 \text{ случай} \rightarrow \sum_{i=1}^{j-1} q_i P_{j-i}. \quad (5)$$

Рассмотренные случаи являются несовместимыми состояниями и тогда вероятность безотказной работы изделия в момент наработки $j\tau$ определяется из формулы:

$$P_j = q_j + 1 - F_1(j\tau) + \sum_{i=1}^{j-1} q_i P_{j-i} \quad (6)$$

Полученное выражение (6) называется дискретным уравнением восстановления и позволяет оценить вероятность безотказной работы изделия для наперед заданной периодичности проведения диагностирования его технического состояния.

В частном случае, когда, $F_1(t)$ и $F_2(t)$ подчинены экспоненциальному закону распределения с параметрами λ_1 и λ_2 , соответственно, можно получить:

$$\begin{aligned} F_1(t) &= 1 - e^{-\lambda_1 t}, \quad F_2(t) = 1 - e^{-\lambda_2 t} \quad \text{при } t \geq 0; \\ q_j &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-j\tau\lambda_1} (e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)\tau} - 1); \\ 1 - F_1(j\tau) &= e^{-j\tau\lambda_1}; \\ P_j &= \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} (\lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1\tau} - \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_1\tau}) \right]^j; \end{aligned} \quad (7)$$

1.3.3. Обобщённые модели отказов и неисправностей.

Как представлено в классификации (рис.2.) обобщённые модели отказов и неисправностей изделий АТ относятся к классу аналитических моделей и бывают двух типов. I тип обобщённой модели используется в случае, когда неисправность накапливается и превращается в отказ. Такой процесс описывается потоком Пуассона с параметром потока неисправностей $\omega_H(t)$, который увеличивается с наработкой. Вероятность возникновения равна r неисправностей за наработку (t_0, t) и рассчитывается в соответствии с законом Пуассона [5]:

$$P_r(t_0, t) = \frac{\left[\int_{t_0}^t \omega_H(u) du \right]^r}{r!} \cdot e^{-\int_{t_0}^t \omega_H(u) du} \quad (8)$$

где u - текущее значение наработки на интервале (t_0, t) .

Если допустить, что возникновение $r^{\text{ой}}$ неисправности соответствует критическому значению параметра, приводящему к отказу изделия, то рассмотренная модель позволяет рассчитать следующие характеристики процесса: плотность распределения времени наработки t до возникновения отказа $f(t)$; вероятность того, что за наработку (t_0, t) не возникнет отказ- $P(t)$. Расчётные формулы:

$$f(t) = \frac{\omega_n(t) \cdot \left[\int_{t_0}^t \omega_n(u) du \right]^{r-1}}{(r-1)!} \cdot e^{-\int_{t_0}^t \omega_n(u) du},$$

$$P(t) = \sum_{i=0}^{r-1} \frac{\left[\int_{t_0}^t \omega_n(u) du \right]^i}{i!} \cdot e^{-\int_{t_0}^t \omega_n(u) du} \quad (9)$$

где i - индекс текущего отказа.

II тип обобщенной модели используется в случае, когда наблюдаются неисправности различных типов и со временем каждая неисправность превращается в отказ, при этом их развитие независимо. Так же, как и ранее рассматривается пуассоновский поток неисправностей с параметром $\omega_n(t)$. Если при наработке t_0 неисправностей не было, то вероятность безотказной работы изделия в интервале наработки (t_0, t) определяется выражением:

$$P(t_0, t) = e^{-\int_{t_0}^{t-t_0} \omega_n(t-x) \cdot G(x) dx}, \quad (10)$$

где $G(x)$ - функция распределения времени, необходимого для развития отдельной неисправности в отказ;

x - время развития неисправности в отказ;

$\omega_n(t)$ и $G(x)$ определяются по результатам предварительных исследований развития неисправностей, повреждений и диагностируемых параметров.

Использование данной модели позволит определить следующие характеристики наблюдаемого процесса: среднее число отказов изделия, возникающих в интервале наработок (t_0, t) - $n_{cp}(t_0, t)$; среднее число неисправностей, которое повлияет на изделие при наработке t - n_{cp} .

Расчётные формулы:

$$n_{cp}(t_0, t) = \int_{t_0}^{t-t_0} \omega_n(t-x) \cdot G(x) dx, \quad (11)$$

$$n_{ncp} = \int_{t_0}^{t-t_0} \omega(t-x)(1-G(x)) dx. \quad (12)$$

Практическое значение рассмотренных моделей становится очевидно, если за интервал наработки (t_0, t) принимать интервалы наработки изделий между проведением форм периодического ТО или периодичность контроля технического состояния изделий АТ.

1.3.4. Статистические модели возникновения отказов и неисправностей изделий АТ.

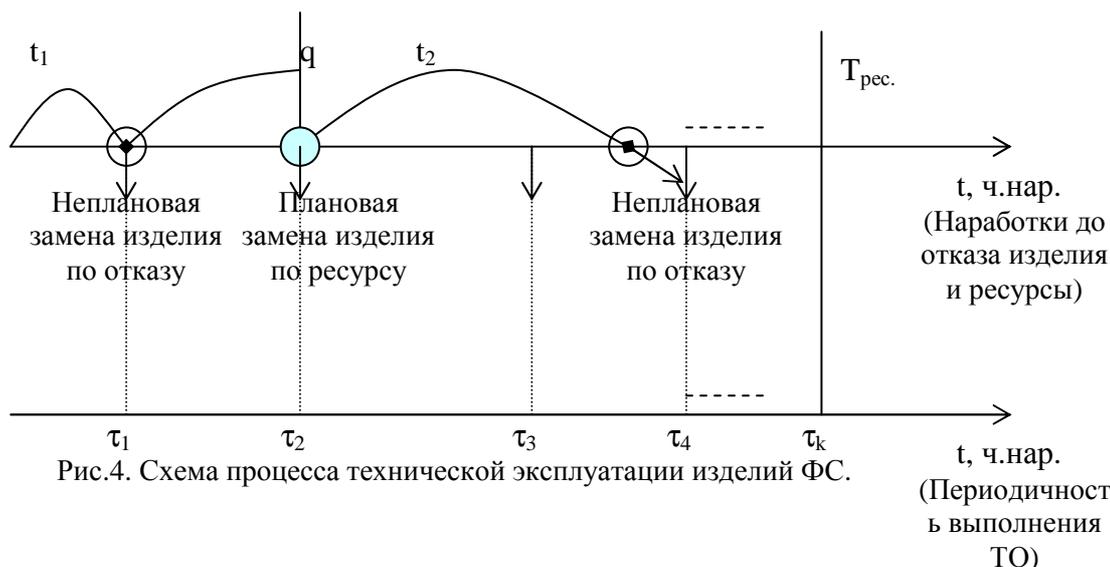
Реальные условия эксплуатации бывают так сложны, что применение аналитических моделей невозможно. В таких случаях целесообразно использовать статистические модели, которые являются более универсальными. [6]. В основе статистического моделирования-искусственное формирование статистической базы по отказам и неисправностям ФС ЛА и АД и их изделий, учитывающие особенности их эксплуатационно-технологических характеристик. Рассматривается следующий процесс технической эксплуатации ФС ЛА:

- а) имеется ФС и её изделия, подверженные отказам и неисправностям;
- б) проводится ТО с периодичностью τ (ч.нар.), включающее профилактические работы постоянного объёма и устранение неисправностей (переменный объём работ);

в) каждое изделие ФС имеет свой ресурс q , по истечению которого изделие заменяется на новое, независимо от его технического состояния.

Статистическая модель должна представлять имитацию процесса эксплуатации ФС в течение межремонтного ресурса ЛА- $T_{\text{рес}}$. Схема рассматриваемого процесса представлена на рис.4.

Представленная схема является одной реализацией процесса. Нарботка до восстановления отказов изделий t_1, t_2 - величины случайные, и при моделировании необходимо рассмотреть несколько реализаций процесса, тогда по их совокупности можно определить показатели ЭН: вероятность безотказной работы ФС за заданную наработку t ; среднее количество отказов ФС за $T_{\text{рес}}$ ЛА и др.



Одно из преимуществ статистического моделирования – это возможность наблюдать динамику изменения показателей ЭН от наработки с учётом проведения ТО (замены изделий) для сложных ФС ЛА. В результате моделирования получают графики вида (рис.5.):



Как видно из графика (рис.5.) искусственно сформирована статистическая база данных по отказам ФС, которая позволяет установить значение прогнозируемых показателей ЭН (например гамма-процентного ресурса $T_{P\gamma=70\%}$). Формирование статистической модели представляет математическое описание процесса эксплуатации ФС ЛА, которое выполняется в следующей последовательности:

- 1) составляется структурная схема надёжности ФС по описанию её работы в соответствии с принципиальной схемой, состоящая из последовательных и параллельных соединений элементов (изделий);
- 2) вводится индексация элементов ijk (i - номер изделия, j - номер цепочки, k - номер блока); например (рис.6)

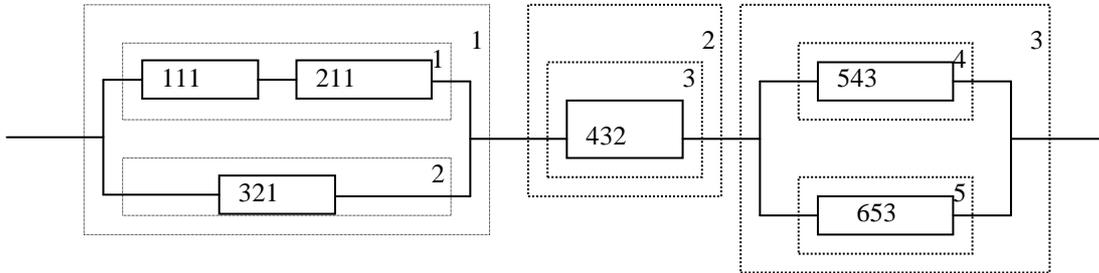


Рис.6. Структурная схема надёжности ФС.

- 3) каждому элементу ставится в соответствие функция $q_{ijk}(t) = \begin{cases} 0 & \text{(нет отказа, 0-отказ),} \\ 1 & \text{аналогично для цепочки } q_{jk}(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ и для блоков $q_k(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$, результирующей

является функция $q(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ для ФС;

- 4) определяются моменты проведения ТО: $\tau_1, \tau_2=2\tau_1, \tau_3=3\tau_1$ и т.д. $\tau_\theta, \theta=1,2,\dots,S$;
- 5) определяются моменты замены изделий на новые:

$Z_{ijk}(t)$ - плановые замены по ресурсу;

$Y_{ijk}(t)$ - неплановые замены по отказу;

$$Z_{ijk}(t) = \min \left\{ \sum_{\theta=1}^s \tau_\theta \right\} : q_{ijk} \leq \sum_{\theta=1}^s \tau_\theta ; t \leq \sum_{\theta=1}^s \tau_\theta , \quad (13)$$

момент $1^{ой}$ замены изделия по ресурсу;

Если изделие заменили при наработке $t=1$, то следующая замена по ресурсу будет в момент:

$$Z_{ijk}(t) = \min \left\{ \sum_{\theta=0}^s \tau_\theta \right\} : T + q_{ijk} \leq \sum_{\theta=1}^s \tau_\theta ; T < t \leq \sum_{\theta=1}^s \tau_\theta ; \quad (14)$$

момент замены изделий по отказу будет зависеть от продолжительности безотказной работы изделий X_{ijk} ; совокупность значений $\{X_{ijk}\}$ формируется в соответствии с законом распределения наработки до отказа каждого типа изделия и соответствует значениям t_1, t_2, \dots (по схеме рис.3.); в соответствии с этим момент первой замены изделия по отказу:

$$Y_{ijk}(t) = X_{ijk} ; \quad (15)$$

момент следующей замены изделия по отказу:

$$Y_{ijk}(t) = T + X_{ijk} , \text{ при } T < t \leq T + X_{ijk} ;$$

- б) вычисляется функция $g_{ijk}(t)$ в точках проведения ТО: $\tau, 2\tau, 3\tau, \dots$

$$g_{ijk}(t+\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } Y_{ijk}(t) > t + Y_i \\ 0 & \text{при } Y_{ijk}(t) \geq t + Y_i \end{cases} \quad (16)$$

- 7) с учётом периодичности ТО момент замены изделий определяется в соответствии с выражениями:

$$Z_{ijk}(t + \tau) = \begin{cases} Z_{ijk}(t) & \text{при } Z_{ijk}(t) > t + \tau; g_{ijk}(t + \tau) = 1 \\ t + \tau + g_{ijk} & \text{при } Z_{ijk}(t) \leq t + \tau; g_{ijk}(t + \tau) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$Y_{ijk}(t + \tau) = \begin{cases} Y_{ijk}(t) & \text{при } Z_{ijk}(t) > t + \tau; g_{ijk}(t + \tau) = 1 \\ t + \tau + g_{ijk} & \text{при } Z_{ijk}(t) \leq t + \tau; g_{ijk}(t + \tau) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Рассмотренная процедура формирования статистической модели будет представлять одну реализацию процесса. Её длительность ограничивается $T_{\text{pec. ЛА}}$ и определяется как:

$$\tau^* = \min \left\{ \sum_{\theta=1}^s \tau_{\theta} \right\} : T_{\text{pec}} \leq \sum_{\theta=1}^s \tau_{\theta} \quad (19)$$

Большой объём вычислений, сложность структурных схем надёжности ФС ЛА, необходимость получения достаточного количества реализаций процесса для формирования полноценной статистической базы по отказам и неисправностям ФС и её изделий предполагает широкое использование ЭВМ при решении задач статистического моделирования. Для этого рассмотрения последовательность действий при формировании модели превращается в операторы.

2. Методы анализа эксплуатационной надёжности, используемые при формировании режимов ТО ЛА и АД.

2.1. Характеристика задач и методов анализа эксплуатационной надёжности.

В настоящее время применяется следующая классификация задач надёжности: математические; организационные; технические; качественные [6].

Математические задачи надёжности заключаются в использовании математических моделей для прогнозирования показателей надёжности и эффективности эксплуатации ЛА и АД, широким применением методов статистического анализа для оценки параметров моделей, формирования зависимостей, как аналитических, так и статистических, для оптимальных режимов ТО изделий АТ.

Организационные задачи надёжности состоят в разработке и назначении режимов ТО ЛА и АД, составлении рекомендаций по организации выполнения работ по ТО в ЭАП.

Информационный аспект надёжности включает разработку схем организации сбора информации об отказах и неисправностях АТ в ЭАП и разработку систем учёта и обработки такой информации с использованием вычислительной техники.

Технические задачи состоят в разработке комплекса технических средств для обеспечения надёжности ЛА и АД в ЭАП. В этот комплекс входят средства контроля технического состояния изделий АТ, средства дефектации и т.д.

Качественные задачи обеспечения надёжности заключаются в качественном анализе отказов и неисправностей АТ, их классификации и разработке рекомендаций по их устранению.

Методы анализа эксплуатационной надёжности ЛА и АД представляют количественную оценку характеристик и параметров моделей возникновения и развития отказов и неисправностей, рассматриваемых ранее. Они позволяют решать задачи анализа ЭН, стоящие перед эксплуатационными предприятиями и направленные на организацию эксплуатационного процесса технической эксплуатации парка ЛА. В качестве основных можно выделить следующие задачи:

1. Определение фактического уровня ЭН ФС ЛА и их изделий;
2. Разработка и оценка эффективности мероприятий, направленных на повышение ЭН;
3. Обоснование ресурсов АТ;

4. Формирование и совершенствование режимов ТО ЛА и АД;
5. Разработка и совершенствование технических требований по повышению ЭН АТ.

Для решения данных задач установим порядок сбора, учёта, обработки и анализа информации о неисправностях АТ, который регламентирован отраслевыми документами и предусматривает: классификацию информации; накопление и хранение; выявление неисправностей, угрожающих безопасности полётов; выявление наименее надёжных изделий, узлов, агрегатов; систематизацию отказов по причинам, характеру, проявлению и внешним признакам; выявление недостатков эксплуатации АТ, её ТО и Р и конструктивно-производственных; определение влияния режимов ТО и Р на ЭН.

Источником информации установлена карточка учёта неисправностей АТ (КУНАТ), которая является первичным документом статистической информации. Современные автоматизированные гидросмазочные системы, используемые в ЭАП, ориентированы на использование ЭВМ, ПЭВМ и сетевого управления процессами сбора, учёта и потребления жидкости.

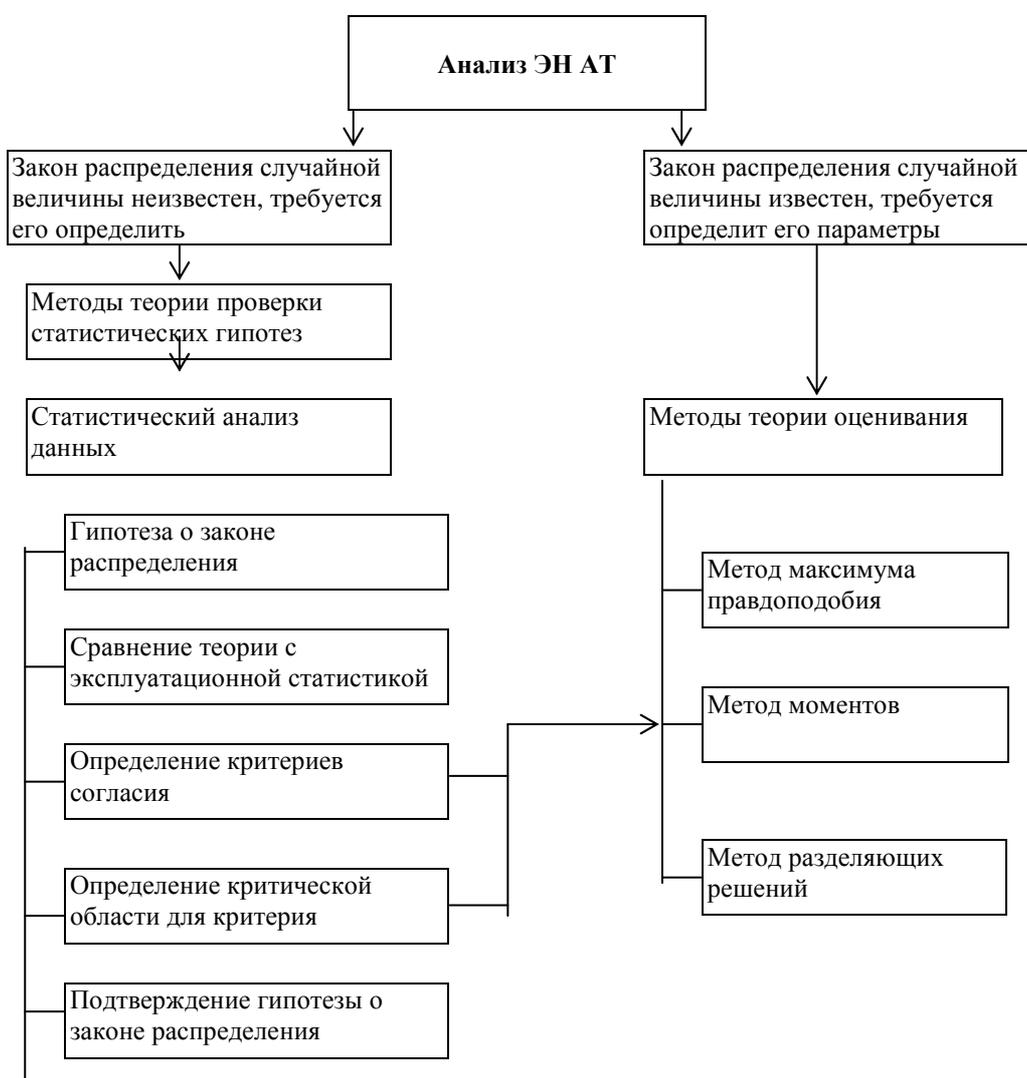


Рис.7. Схема использования методов математической статистики для анализа ЭН АТ.

Для решения обозначенных задач анализа ЭН и для последующего формирования режимов ТО ЛА и АД рассматривается два информационных статистических потока:

наработка до отказа (до неисправности) и количество отказов (неисправностей) на интервале наблюдений. Методы анализа ЭН базируются на рассмотрении качественной и количественной оценке процессов, возникающих при эксплуатации АТ. Используется большой объём статистического материала, получаемого в результате наблюдений за практической эксплуатацией парка ЛА в ЭАП. Основа методов анализа ЭН- математическая статистика. При анализе, в первую очередь, рассматриваются модели отказов и неисправностей АТ, а затем для решения конкретной задачи привлекается соответствующий математический аппарат. Схема использования методов математической статистики для анализа ЭН АТ представлена на рис.7.

Достаточно большой объём вычислений связан с количественной оценкой ЭН, которая в обязательном порядке должна сопровождаться качественной инженерной оценкой отказов и неисправностей АТ. При количественной оценке имеют дело со случайными величинами, при этом объёмы наблюдений и состав (выборка) тоже случаен. На основании выборочных наблюдений нельзя точно определить значения интересующих параметров процесса и показателей ЭН (характеристики моделей), а можно вычислить только оценки параметров. Для данных целей необходимо использовать основные положения теории оценки [7].

Оценкой называется некоторая функция выборочных данных, т.е. величина, определяемая выборкой. Эта величина сама является случайной со своим средним значением и дисперсией. Правомерен вопрос- какая оценка будет наилучшей? В математической статистике наименьшей считается оценка, обладающая тремя свойствами: несмещённостью, состоятельностью, эффективностью.

Несмещённой считается оценка, у которой среднее значение равно истинному значению оцениваемого параметра. Пусть θ - параметр, θ^* - его оценка. При многократных оцениваниях будем в среднем правильно определять истинное значение параметра, если $M[\theta^*]=\theta$, здесь $M[\theta^*]$ - математическое ожидание оценки параметра θ .

Эффективной считается несмещённая оценка, имеющая наименьшую дисперсию. В каждом конкретном случае будет отличие оценки от параметра, которое при многократных наблюдениях характеризуется дисперсией. Тогда чем меньше дисперсия, тем меньше ошибка при оценке. Из 2^x несмещённых оценок эффективнее та, у которой имеется дисперсия.

Состоятельной считается та оценка, которая с увеличением количества наблюдений по вероятности стремится к истинному значению. Несмещённая оценка будет состоятельной, если при увеличении объёма выборки её дисперсия будет стремиться к 0.

Наиболее распространены следующие методы нахождения оценки: максимального правдоподобия; метод моментов; метод разделяющих разбиений.

Далее представлена краткая характеристика перечисленных методов.

Метод максимальных правдоподобий: наблюдаемые значения случайной величины $t_1, t_2, t_3... t_k$ имеют распределение с плотностью $f(t)$; параметр распределения θ ; требуется оценить этот параметр. Вероятность того, что в процессе наблюдений будут зафиксированы значения $t_1, t_2, t_3... t_k \rightarrow L(\theta)$.

$$L(\theta) = f_{\theta}(t_1) \cdot f_{\theta}(t_2) \dots f_{\theta}(t_n) \quad , \quad (20)$$

такая функция называется функцией правдоподобия и обычно используется $\ln L(\theta)$. В качестве оценки θ^* принимают его величину, при которой $L(\theta^*)=\max$ или $\ln L(\theta^*)=\max$. Максимум функции определяется из условий $\frac{\partial}{\partial \theta} \ln(\theta) = 0$; если параметров несколько, то составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \theta_1} \ln L(\theta_1, \theta_2) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \theta_2} \ln L(\theta_1, \theta_2) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Оценка, полученная методом максимума правдоподобия, будет наилучшей, т.к. имеет эффективные оценки. При больших объёмах выборки оценка будет наиболее эффективной. Недостаток метода в том, что иногда сложно сформировать функцию правдоподобия.

Метод моментов: производят приравнивание статистических параметров распределения случайной величины (моментов) теоретическим значениям этих параметров; записываются уравнения моментов, в случае нескольких параметров записывается система уравнений моментов. Например для экспоненциального распределения $\lambda^* = \lambda$ (интенсивность отказов), для нормального распределения:

$$\begin{cases} T_{cp}^* = T_{cp} \text{ (математическое ожидание)} \\ \delta^* = \delta \text{ (средне квадратное отклонение)} \end{cases}$$

Для подтверждения условия, выраженного уравнениями моментов, используют критерии согласия. Метод применяется только для полной выборки, когда она составлена из наблюдений, завершающихся отказами изделий.

Метод разделяющих разбиений: рассматривают наблюдения случайной величины t_1, t_2, \dots, t_k ; задаются некоторыми значением случайной величины $t_{зад}$ и подсчитывают количество наблюдений, для которых $t_i < t_{зад}$; пусть их будет N , тогда представляется возможным рассчитать функцию $F^*(t_{зад}) = \frac{N}{n}$; искомое значение параметра распределения θ

определяют из уравнения: $F^*(t_{зад}) = F_\theta(t_{зад})$; при нескольких неизвестных параметрах задаются значениями $t_{зад1}$ и $t_{зад2}$. Метод удобен при сгруппированных данных наблюдений, что имеет место в моделях обслуживания с определённой периодичностью ТО.

2.2. Статистические критерии согласия, используемые при анализе эксплуатационной надёжности.

Статистический анализ наработок до отказа изделий ФС ЛА, наблюдаемых при эксплуатации парка ЛА, предполагает использование статистических критериев согласия, которые определяют количественную меру расхождения между теорией и статистикой. Процедура состоит в расчёте критерия и определения «критической области» для его значений. Если значение рассчитанного критерия попадает в «критическую область», выдвинутая гипотеза о законе распределения отвергается, в противном случае- принимается. Критериями согласия пользуются, если законы распределения наработки до отказа изделий АТ неизвестны или возникает сомнение в правильности выбранной модели. Для построения «критической области» следует задаться уравнением значимости (максимально допустимой вероятности неправильного отвержения гипотезы). Если обобщать уровень значимости $\gamma = 1 - \alpha$, то α представляет риск принятия неверного решения. В практике эксплуатации АТ назначают риски в диапазоне 1%÷10%, или в долях 0,01%÷0,1%, в зависимости от значимости решаемой задачи. Необходимо учитывать, что при сильном занижении рисков теряется чувствительность критерия [7]. Разным уровням значимости будут соответствовать разные «критические области». Для проверки одной и той же гипотезы можно применять несколько критериев. Наиболее распространены следующие критерии согласия: критерия Пирсона (χ^2); критерий серий (R); критерий меток (критерий Кокса- M).

Критерий Пирсона: расчётное значение критерия определяется по следующему выражению

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(a_i - n \cdot q_i)^2}{n \cdot q_i}, \quad (22)$$

где k - число интервалов группирования наблюдаемых статистических данных;

a_i - число статистических данных, попавших в $i_{\text{ый}}$ интервал (число отказов);

n - объём выборки;

q_i - количество отказов в середине $i_{\text{го}}$ интервала при выдвигании гипотезы о законе распределения случайной величины;

$n \cdot q_i$ - среднее число данных, попадавших в $i_{\text{ый}}$ интервал при условии, что гипотеза верна;

например при гипотезе об экспоненциальном законе распределения наработок до отказа:

$$q_i = 1 - P_i = 1 - e^{-\lambda \cdot t_{cp}}, \quad (23)$$

где λ - параметр распределения; t_{cp} - середина $i_{\text{го}}$ интервала наработки;

при гипотезе о нормальном законе распределения наработки до отказа:

$$q_i = 1 - P_i = 1 - \Phi\left(\frac{t_{icp} - T_{cp}}{\sigma}\right), \quad (25)$$

где T_{cp} , σ -параметры закона распределения;

«критическая область» для χ^2 представляет отрезок $\{\chi^2_{1-\alpha, z}; +\infty\}$. Значение $\chi^2_{1-\alpha, z}$ зависит от принятого уровня значимости $(1-\alpha)$ и числа степеней свободы $(z=k-S-1; k$ - число интервалов, S - число параметров закона распределения); гипотеза о законе распределения подтверждается, если значение χ^2 , рассчитанное по (22) не попало в «критическую область». Для определения $\chi^2_{1-\alpha, z}$ пользуются таблицами [8], критерий Пирсона пригоден для $n \geq 30 \div 50$ случайной величины, при этом рекомендуется интервалы ограничивать таким образом, чтобы они включали не менее $5 \div 10$ данных наблюдений случайной величины.

Критерий серии R: применяется для уточнения характера изменения безотказности изделий ФС ЛА, когда необходимо убедиться в наличии устойчивых изменений безотказности от наработки (тренде), или в их отсутствии. Такие задачи возникают при анализе эксплуатационной надёжности изделий ФС с учётом их восстановления или замены при ТО в случае повреждения или отказа. Безотказность оценивается параметром потока отказов $\omega(t)$ и задача заключается в проверке гипотез: зависит $\omega(t)$ от наработки (наличие тренда) или $\omega(t) = \omega_{cp} = \text{const}$ (тренд отсутствует). Порядок расчёта критерия R следующий [6]:

а) записываются параметры наработки до отказа изделия ФС по мере наблюдения (т.е. по датам появления отказа) $T_1, T_2 \dots T_n$;

б) строится вариационный ряд из этих наработок (ранжированный) $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots t^{(n)}$;

в) определяется медиана вариационного ряда, т.е. число, относительно которого количество членов ряда с большими или с меньшими значениями будет одинаковым; если n - чётное, то медианой будет любое число, находящееся между членами $n/2$ и $(n/2+1)$; если n - нечётное, то медианой будет член ряда с номером $(n+1)/2$;

г) возвращаются к исходной последовательности $\{T_n\}$ и записывают её в виде знаков (+) и (-): знак (+), если значение члена последовательности $\{T_n\}$ больше медианы; знак (-), если меньше, при n - нечётном члене последовательности $\{T_n\}$, равный медиане вычёркивается и в рассмотрении не участвует.

В результате получается чередование последовательностей либо знаков (+), либо знаков (-). Серией называется отрезок из последовательности одинаковых знаков. Значение критерия R равно числу серий. Если последовательность серий однородна, т.е. число (+) серий равно числу (-) серий или знаки (+) и (-) располагаются хаотически, то тренда нет; если

знаки (+) группируются с одной стороны, а знаки (-) - с другой, то имеется наличие тренда. Для более точного принятия решения о наличии тренда безотказности изделий ФС ЛА проверяют попадание значения R в «критическую область», которой для риска принятия решения α будет интервал:

$$\left\{0 : 1/2 \left[n + 1 + \sqrt{n-1} \cdot \Phi^{-1}(0.01 \cdot \alpha) \right] \right\}, \quad (24)$$

где n- объём выборки наблюдений случайной величины,

α - риск принятия решения, выраженный в %;

$\Phi^{-1}(0,01 \cdot \alpha)$ - квантиль нормального нормированного закона распределения; определяется по таблицам [8].

Если критерий R попадает в «критическую область», то применяется решение о наличии тренда.

Использование критерия R наиболее рационально при анализе действующей периодичности ТО и объёма работ по восстановлению повреждённых изделий. Отсутствие устойчивого ухудшения безотказности изделий (отсутствие тренда) свидетельствует об эффективности режимов ТО данных изделий, т.е. возникающие повреждения вовремя устраняются и не приводят к изменению их технического состояния. Наличие тренда выявляет процессы старения изделий и необходимость корректировки их режимов ТО в части профилактических работ. Накопленный опыт эксплуатации ЛА и АД и анализ статистических данных по критерию R может быть рекомендован и для уточнения стратегии ТО изделий: при отсутствии тренда – ТО с контролем уровня надёжности, при наличии тренда – ТО с контролем параметров или по наработке.

Критерий меток M: позволяет решить задачу проверки гипотезы о пуассоновском потоке отказов, когда наблюдение наработки до отказа ФС или её изделий независимы и распределены равномерно; порядок расчёта критерия M следующий:

а) составляется вариационный ряд наблюдаемых случайных величин (ранжированный)

$\{t_i\}, i=1,2...n;$

б) каждому члену ряда $\{t_i\}$ ставится в соответствие метка S_i , которая определяется как

$$S_1 = \frac{1}{n}, S_2 = \frac{1}{n-1} \dots S_n = 1$$

в) рассчитывается для каждого члена ряда $\{t_i\}$, величина $Z_i = 2 \cdot i - n - 1$;

г) рассчитывается критерий $M = \sum_{i=1}^n S_i \cdot Z_i$;

Предполагается, что выдвинутая гипотеза верна, если критерий M подчиняется нормальному закону распределения с параметрами: математическое ожидание $M[M]=0$;

дисперсия $D[M] = \left[1 - \frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \dots + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^n Z_i^2$; по результатам оценки критерия M

делаются следующие выводы: если $M=0$ – подтверждается гипотеза о пуассоновском потоке отказов, для которого $\omega(t) = \omega_{cp} = \text{const}$;

если $M \neq 0$ – гипотеза отвергается и применяется решение о наличии изменения безотказности от наработки ($\omega(t)$ зависит от наработки); для более точного принятия решения задаются риском α , выраженным в % и рассматривают попадания критерия M в «критическую область», представляющую интервал:

$$\left\{ \sqrt{D[M]} \cdot \Phi^{-1} \left(\frac{\alpha}{200} \right); -\sqrt{D[M]} \cdot \Phi^{-1} \left(\frac{\alpha}{200} \right) \right\}, \quad (25)$$

где $\Phi^{-1} \left(\frac{\alpha}{200} \right)$ - квантиль нормального нормированного закона распределения, определяется по таблице [8].

При попадании критерия М в «критическую область» гипотеза о пуассоновском потоке отказов отвергается. Область применения критерия М аналогична задачам, рассмотренным при использовании критерия R.

2.3. Анализ эксплуатационной надёжности невосстанавливаемых изделий.

В данном разделе рассматриваются особенности анализа ЭН невосстанавливаемых изделий, связанные с эксплуатационными наблюдениями и имеющие значение для последующего формирования режимов ЛА и АД. Анализ ЭН таких изделий АТ заключается в определении известных показателей ($P(t)$, $\lambda(t)$, T_{cp}) на основе накопленных статистических эксплуатационных данных. Необходимо различать условия наблюдения: полная выборка (все наблюдения завершились отказом изделий); усечённая выборка (помимо отказавших изделий присутствуют наблюдения, не завершившиеся отказом изделий).

Определению подлежат оценочные значения показателей ЭН, рассчитываемые по выборочным наблюдениям, которые являются результатами случайной величины (статистические оценки) и действительные значения показателей (теоретические), которые используются для последующего прогноза ЭН изделий и формирования для них оптимальных режимов ТО.

Статистические оценки показателей ЭН рассчитываются для полной выборки (для усечённой выборки такие оценки затруднительны) методом максимума правдоподобия, который позволяет получить наилучшие оценки. Расчётные формулы следующие:

$$T_{cp}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad P^*(t) = \frac{n - n(t)}{n}; \quad \lambda^*(t) = \frac{f^*(t)}{P^*(t)}; \quad (26)$$

$$f_i^* = \frac{\Delta n_i}{N \cdot \Delta t_i}; \quad f^*(t) = f_i^*(\Delta t); \quad t_i' \leq t \leq t_i''.$$

Здесь: t_i - наработка до отказа изделия, ч.нар;
 n - количество наблюдений (объём выборки);
 $n(t)$ - количество отказавших изделий на момент наработки t ;
 Δn_i - количество отказавших изделий в интервале Δt ;
 $f^*(t)$ - плотность распределения наработки до отказа;
 $f_i^*(t)$ - плотность распределения наработки до отказа на интервале времени $f^*(t)$;
 t_i', t_i'' - начало и конец интервала Δt_i .

Расчётные формулы для определения теоретических значений показателей ЭН выбираются в соответствии с подтверждённой гипотезой о законе распределения наработки до отказа изделия. Закон распределения является моделью безотказности и правомерность его использования гарантируется методами теории проверки статистических гипотез.

При анализе ЭН особый интерес представляет задача определения вероятности безотказной работы за случайную наработку, например для времени беспосадочного полёта, которое для конкретного бортового номера ЛА является величиной случайной, или за межремонтную наработку, которая с учётом допусков на сроки проведения ТО также является величиной случайной [9].

Математическая постановка задачи в следующем: определить $P(T)$, где T - случайная величина с плотностью распределения $g(t)$. Решение сводится к определению функции распределения наработки до отказа $F(t)$., затем определяется вероятность того, что значение случайной наработки будет лежать в интервале $(t, t+dt)$ по формуле $g(t)[1-F(t)]dt$ и для расчёта $P(t)$ используют выражение:

$$P(t) = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] \cdot g(t) \cdot dt \quad (27)$$

2.4. Анализ эксплуатационной надёжности восстанавливаемых изделий.

Общие методы анализа ЭН восстанавливаемых изделий ЛА и АД заключается в определении известных показателей $P(t_1, t_2)$, $\omega(t)$, T_0 с учётом процедуры восстановления (проведения ремонта) (рис.8). При полном и частичном восстановлении изделий рассматриваются мгновенное восстановление (т.е. не учитывается время, потраченное на восстановление) и наблюдается поток отказов (неисправностей) изделий, как поток случайных событий [6]. На рис.9 представлены временные диаграммы наблюдаемого потока событий. В случае а) рассматривается один бортовой номер ЛА и имеем дело с одной реализацией потока событий численностью n ; в случае б) рассматривается парка ЛА и наблюдается несколько реализацией потока событий, общей численностью N .

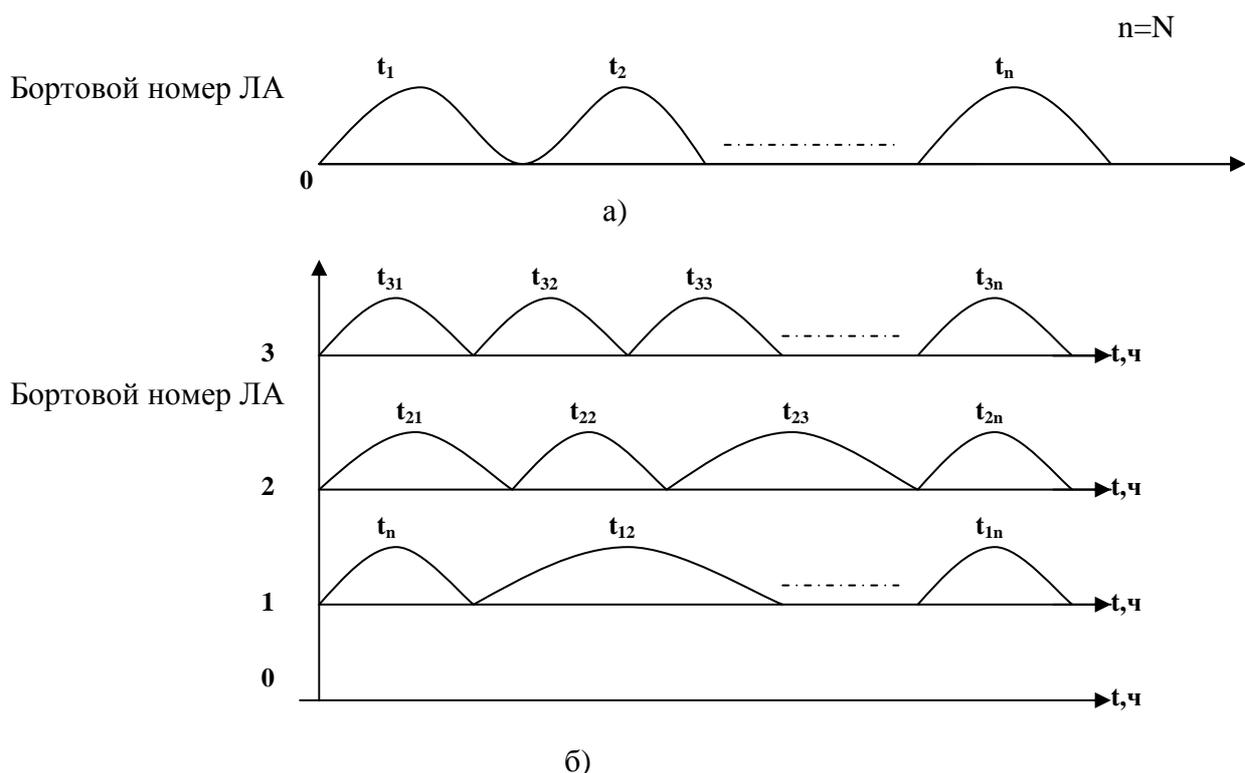


Рис.9. Временные диаграммы эксплуатационных наблюдений: а) одна реализация процесса, б) несколько реализаций процесса; N - количество наблюдений случайной величин; n - количество наблюдаемых случайных величин на одном бортовом номере ЛА.

И в этом и другом случае сначала следует доказать к какому процессу относятся наблюдаемые события. По критериям согласия R и M определяют характер потока событий (стационарный и нестационарный пуассоновский поток).

Расчётные формулы показателей безотказности восстанавливаемых изделий представлены в табл.2.

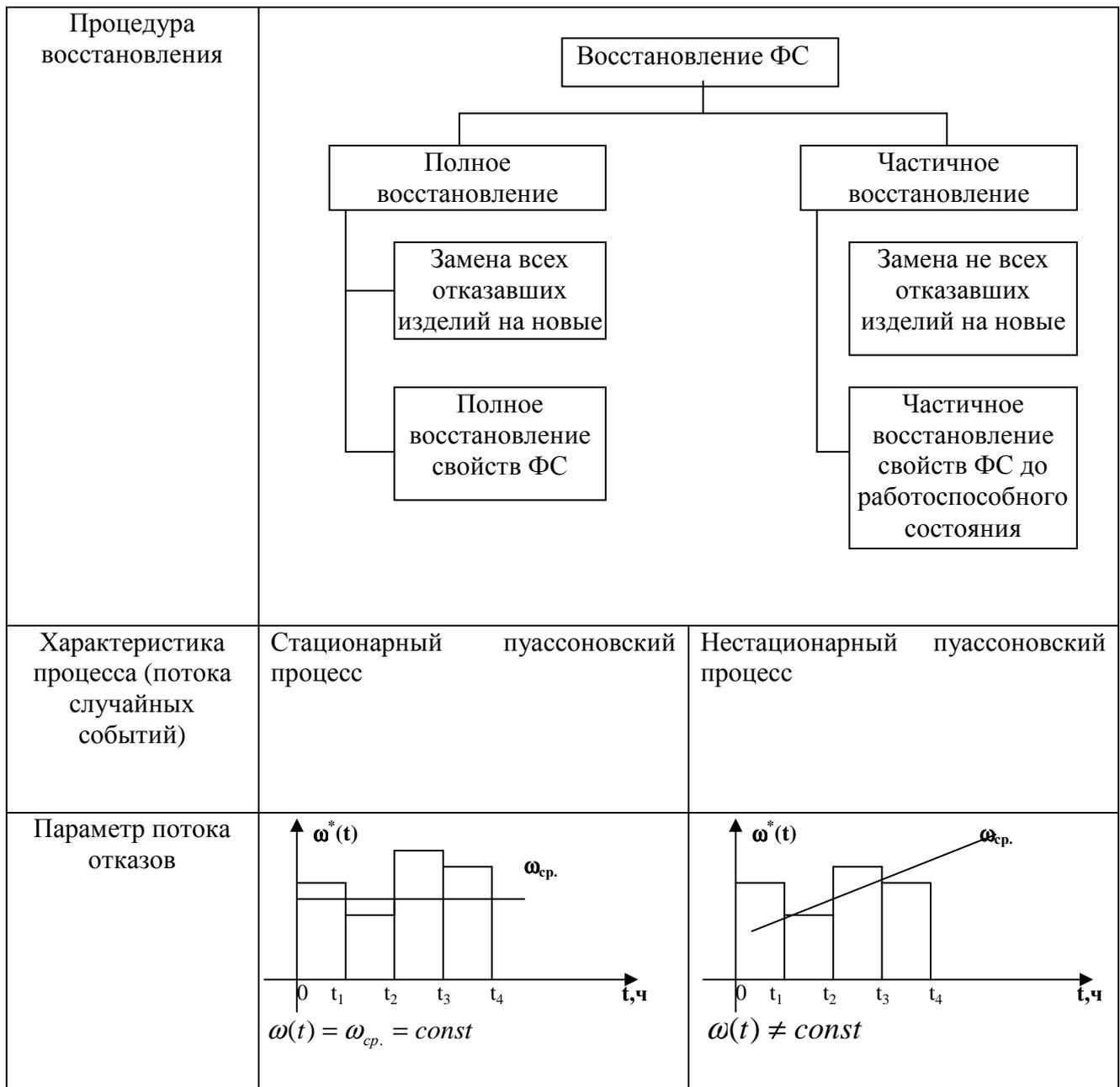


Рис.8. Схема процедур восстановления изделий ФС ЛА.

Таблица 2.

Показатели ЭМ восстанавливаемых изделий ФС ЛА.

Показатели безотказности	Стационарный процесс	Нестационарный процесс
Параметр потока отказов	$\omega(t) = \frac{1}{M[t]} = \frac{1}{\int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt}$	$\omega_i^* = \frac{\Delta n}{N_i \cdot \Delta t_i}$ $\omega(t)$ - определяется аналитическая зависимость
Средняя наработка до 1 ^{ого} отказа	$t_{cp} = \frac{1}{M[t]} \cdot \int_0^{\infty} t \cdot [1 - F(t)] dt$	$t_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \omega(U) dU} \cdot dt$
Средняя наработка между отказами	$t_{cp} = M[t] = \int_0^{\infty} t f(t) dt$	---
Вероятность безотказной работы в интервале (t ₁ , t ₂)	$P(t_1, t_2) = \frac{1}{M[t]} \int_0^{\infty} [1 - F(t_2 - t_1 + t)] dt$	$P(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}$

В случае нестационарного процесса аналитическая зависимость $\omega(t)$ может быть определена как линейная функция $\omega(t) = \alpha + \beta t$, где коэффициенты α и β определяется методом наименьших квадратов в следующем порядке:

а) определяются середины интервалов наблюдения случайной величины $t_i = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}$;

б) для каждого итогового интервала определяются «веса» наблюдений γ_i при условии $\sum_{i=1}^k \gamma_i = 1$, где k - количество интервалов.

$$\gamma_i = \frac{N_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^k N_i \cdot \Delta t_i}; \quad (28)$$

в) определяются координаты α и β :

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot t_{icp.} \cdot \omega_i^* - (\sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot \omega_i^*) (\sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot t_{icp.})}{\sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot (t_{icp.})^2 - (\sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot t_{icp.})^2}; \quad (29)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot \omega_i^* - \beta^* \sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot t_{icp.}$$

4. Методы формирования режимов ТО ЛА и АД.

3.1. Методы формирования режимов ТО функциональных систем ЛА.

3.1.1 Структура режимов ТО функциональных систем.

Как отмечалось ранее под режимами ТО понимается перечень и периодичность выполнения операций с целью поддержания исправности и работоспособности объекта. Под объектом понимается ФС ЛА: шасси, система управления, гидрогазовые системы, системы жизнеобеспечения, топливная. На работоспособность ФС ЛА оказывает влияние значительное число факторов, но несмотря на разнообразие процессов, протекающих в изделиях ФС и приводящих к различным типам и видам отказов и повреждений, для них можно выделить общие конструктивные особенности:

- использование в конструкциях большой степени резервирования. Это позволяет 70-80% всех изделий эксплуатировать до безопасного отказа, который не вызывает отказа ФС;
- модульность конструкции, позволяющая производить восстановление ФС путём замены изделий;
- индикация отказов изделий (бортовая и наземными средствами в виде стендов проверки технического состояния изделий).

Общие черты для рассматриваемых ФС имеет и состав работы по ТО:

контроль технического состояния (смотровые, проверка параметров состояния изделий, проверка функционирования и работы параметров ФС);

заправочно-смазочные (контроль наличия и пополнения запасов ГСМ и спецжидкостей);

очистительные работы (удаление загрязнений, скопившихся жидкостей);

восстановительные работы (крепёжные, регулировочные, ремонтные, демонтно-монтажные для замены изделий, как профилактической, так и после отказов).

На базе такого анализа можно перейти к классификации режимов ТО, в основу которой положены: работы (типовые; по результатам информации о техническом состоянии объектов диагностирования; после наступления отказа для устранения его последствий); объёмы работ (постоянные, переменные); периодичность выполнения работ (с постоянными или случайными интервалами; измеряемыми лётными часами, посадками или календарными сроками); режимы диагностирования при ТО по состоянию (состав диагностических параметров, их упреждающих допусков, периодичность проверок).

Организация выполнения перечисленных работ в ЭАП (реализация режимов ТО) предусматривает выполнение оперативных и профилактических форм ТО. Основное назначение оперативных форм – работы по встрече самолёта, осмотру и обслуживанию, обеспечению стоянки и вылета. Необходимость проведения работ, частота и последовательность выполнения оперативных форм ТО обуславливается характерами и условиями использования самолёта по назначению. Основное назначение периодических форм – выявление и устранение отказов и неисправностей, профилактических мероприятий по предотвращению их возникновения; работы, необходимость которых определяется налётом часов или количеством посадок, или индивидуальной наработкой комплектующих изделий.

Современный уровень развития АТ позволяет использовать при её ТО различные стратегии: ТОНАР- ТО по наработке, ТОСКН- ТО с контролем уровня надёжности, ТОСКП- ТО с контролем параметров [9].

Просматривается чёткая последовательность при формировании режимов ТО объектов АТ: программа ТОиР ЛА → стратегии ТО (для ФС и их изделий) → режимы ТО (объёмы и периодичность выполнения работ).

В табл. 3 представлена структура режимов ТО ФС при реализации стратегий их ТО.

Таблица 3.

Структура режимов ТО изделий ФС ЛА.

Стратегия ТО	Стратегия эксплуатации	Эксплуатационно-технические характеристики	Состав режимов ТО
1	2	3	4
ТОНАР	Изделия эксплуатируются до выработки ресурса (срока службы).	Отказы изделий влияют на безотказность полётов; процессы старения, износа, коррозии.	<ul style="list-style-type: none"> •установка ресурса (срока службы) •определение периодичности профилактических работ •определение объёмов периодических форм ТО
ТОСКН	Изделия эксплуатируются до безопасного отказа	Отказы изделий не влияют на безопасность полётов; Экспоненциальное распределение наработки до отказа; Восстановление отказов не нарушает требования регулярности вылетов ЛА; Легкосъёмность, доступность, взаимозаменяемость изделий; индикация отказа	<ul style="list-style-type: none"> •ресурс до ремонта не устанавливается •устанавливается допустимый уровень безотказности однотипных изделий •определяется календарная периодичность контроля уровня безопасности •определяются объёмы и периодичность выполнения профилактических работ •разрабатываются формы сбора и учёта информации по отказам изделий
ТОСКП	Изделия эксплуатируются до предотказового состояния	Дорогостоящие системы и изделия с высокой степенью значимости Отказы могут влиять на безотказность полётов Недостаточная степень резервирования Высокий уровень контролепригодности	<ul style="list-style-type: none"> •ресурс до ремонта не устанавливается •устанавливаются упреждающие допуски на контролируемые параметры •прогнозируется работоспособность на заданный интервал наработки •устанавливается периодичность контроля •выполняется подбор диагностирующей аппаратуры •определяются объёмы и периодичность профилактических работ

В качестве критериев для определения режимов ТО ФС и их изделий рассматриваются различные показатели, в зависимости от функционального назначения систем и изделий, влияние их работоспособности на безотказность полётов и на эффективность используемого парка ЛА.

Различают две группы критериев: технические и экономические. Технические критерии: вероятность безотказной работы за заданную наработку $P(t)$; коэффициент готовности K_r ; коэффициент технического использования $K_{ти}$. Экономические критерии: суммарная стоимость ТО и ремонта $C_{ТОиР}$; удельная суммарная стоимость ТО и ремонта $C_{уд\ ТОиР}$; трудоёмкость ТО и ремонта $T_{ТОиР}$; удельная суммарная трудоёмкость ТО и ремонта K_r . Выбор критерия осуществляется в зависимости от вида выполняемых работ и условий

целевой задачи (максимальная безопасность полётов, регулярность вылетов, исправность и использование парка ЛА, экономическая эффективность).

4.1.2. Методика формирования режимов ТО изделий ФС, эксплуатируемых до отказа.

На современных типах зарубежных ЛА достаточно большое количество изделий ФС эксплуатируется до безопасного отказа. Эксплуатационно-технические характеристики таких изделий (табл.4) позволяют использовать стратегию ТОКН. Техническое обслуживание каждого конкретного изделия заключается в выполнении необходимых работ по регулировке, калибровке, обнаружению возникающих отказов и неисправностей и их устранению. Перечисленные работы можно разделить на работы постоянного объёма (регулировка, калибровка) и переменного объёма (обнаружение и устранение отказов). Периодичность выполнения работы постоянного объёма (профилактических работ) определяется с учётом трудоёмкости выполнения этих работ на основании конструктивных особенностей изделий $t_{кр\text{ орт}}$. Работы переменного объёма выполняются по факту отказа, их периодичность является величиной случайной и может быть прогнозирована с использованием моделей надёжности. Трудозатраты включают труд, потраченный на поиск отказавшего изделия и на его замену (восстановление).

Кроме перечисленных работ предполагается контроль уровня безотказности однотипных изделий парка ЛА, сравнение его с дополнительным уровнем и, при необходимости, разработка мероприятий для повышения надёжности, разработка мероприятий для повышения надёжности изделий. Для выполнения контроля уровня безотказности типа изделий ФС формируются следующие режимы: устанавливается экономически целесообразный уровень безотказности (плановый); задаются риски принятия решений; рассматривается верхняя граница регулирования (ВГР) безотказности изделий с учётом планового условия, фактической наработки изделий за контрольный период и случайного характера возникновения отказов; устанавливается периодичность контроля; разрабатывается схема принятия решений по результатам контроля; разрабатываются формы оперативного сбора и учёта информации по отказам и неисправностям изделий для проведения контроля [10].

Критерием при формировании режимов контроля безотказности изделий ФС является экономическая эффективность процесса технической эксплуатации ЛА (ПТЭ ЛА) при выполнении требований безотказности и регулярности полётов.

Периодичность контроля уровня безотказности однотипных изделий ФС устанавливается в календарных сроках (месяцах). Решение принимается при одновременном рассмотрении информации за последний месяц, для которого производится контроль (текущий месяц); за предыдущий месяц; за три предшествующих месяца, включая текущий (текущий квартал) и за 12 предшествующих месяцев, включая текущий (текущий год). Т.о. в каждый момент контроля рассматривается четыре информационных потока, что позволяет точнее принимать решение и учитывать большие, умеренные и малые сдвиги безотказности, а также выделять фактор, приведший к этим сдвигам. Пример организации контроля представлен на схеме рис.10. За каждый контрольный период сравнивается фактический уровень безотказности с ВГР.

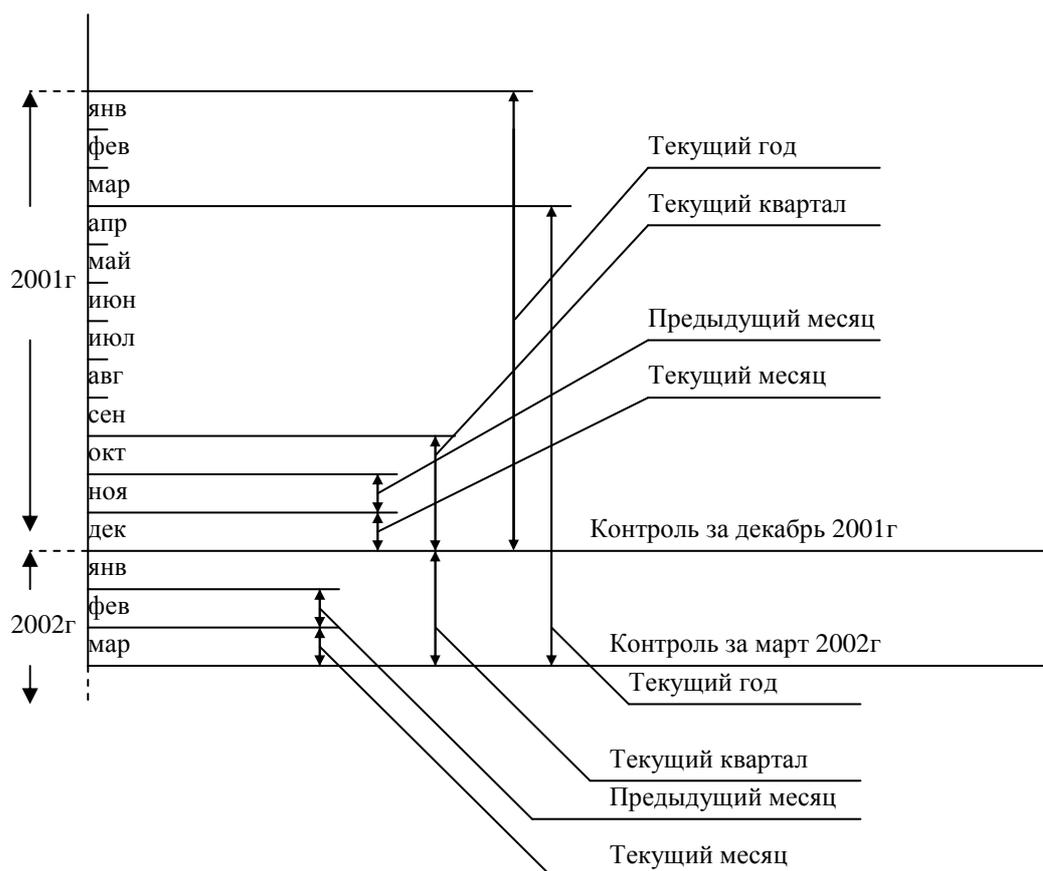


Рис.10. Схема контрольных период безотказности однотипных изделий ФС.

Структура режимов ТО изделий, эксплуатируемых до отказа, представлена в таблице 4.

Таблица 4.

Структура режимов ТО изделий, эксплуатируемых до отказа.

№ п/п	Режимы ТО			Техническая документация
	Характер ТО	Объёмы работ (содержание)	Периодичность	
1	2	3	4	5
1	Постоянный объём (профилактические работы)	Регулировка, калибровка, смазка и т.д.	$T_{кр\ opt}$, определяется с учётом трудоёмкости ТО	Регламент ТО (периодические формы)
2	Переменный объём	Поиск и устранение отказов	По факту отказа	Методика поиска и устранения отказов (алгоритмы)
3	Постоянный объём (ежемесячный контроль безотказности)	Контроль уровня безотказности однотипных изделий	Календарные периоды контроля (по схеме рис.9)	Методика статистического регулирования надёжности изделий АТ в ЭАП

Количественное определение режимов ТО изделий ФС, эксплуатируемых до отказа предполагает:

1) определение $t_{кр\text{ опт}}$ из условия $\Pi = \left[\frac{P(t_{кр})}{T_{кр}(t_{кр})} \right]_{\max}$;

здесь $P(t_{кр})$ - вероятность безотказной работы изделия за наработку между профилактиками;

$T_{пр}(t_{пр})$ - трудоёмкость технического обслуживания и текущего ремонта

2) прогнозирование вероятности безотказной работы изделия $P(t)$ методами статического анализа и определение ожидаемой наработки на отказ T_0 для обеспечения готовности восстановления изделий (обеспечение запасными частями, планирование объёма работ);

3) определение $K_{1000\text{ пл}}$ (количества отказов на 1000ч налёта- планового уровня безотказности изделий), как функции от удельных затрат на ТО (K_T) для обеспечения экономической эффективности ПТЭ ЛА;

4) расчёт ВГР для каждого контрольного периода (по схеме рис.9) в соответствии с уравнением:

$$P_{за} = \sum_{n=0}^{ВГР} \frac{(K_{1000\text{пл}} \cdot \frac{T \cdot a}{1000})^n}{n!} \cdot e^{-K_{1000\text{пл}} \cdot \frac{T \cdot a}{1000}} ; \quad (30)$$

где $P_{зад}=1-\alpha$, α - риск принятия решения о понижении уровня безотказности однотипных изделий;

T - налёт парка за контрольный период;

a - количество одинаковых изделий на ЛА;

n - количество отказов, переменная случайная величина.

5) разработку схемы принятия решения по результатам контроля безотказности изделий и определения фактора, приведшего к понижению уровня безопасности; пример представлен в табл.5. ($n_{ф}$ - фактическое количество отказов изделия за контрольный период, наблюдаемое ЭАП).

Таблица 5

Схема принятия решений по результатам контроля безотказности однотипных изделий ФС.

$n_{ф} > ВГР$				Действующий фактор	Решение
Текущий месяц	Предыдущий месяц	Текущий квартал	Текущий год		
+	+	+	+	КПН	Понижение уровня безотказности, анализировать причину отказа, доработка изделия
+	+	+	-	Влияние сезонности	Анализировать причину отказа, ограничение использования
+	+	-	-		
+	-	-	-	-	Нет понижения безотказности
-	-	-	-		
-	+	-	-		

Примечание: знак (+) – $n_{ф} > ВГР$; знак (-) - $n_{ф} < ВГР$

- б) разработку форм сбора и учёта информации для контроля безотказности изделий; наиболее удобными представляются формы табл.6 и 7 и использование ЭВМ для оперативного учёта.

Таблица 6

Сигнальная информация

№ ФС по ГОСТ 18675-79	Наименование изделия	тип изделия	Кол. Изделий на ЛА	K _{1000пл}	Статистические данные за контрольный период							
					текущий м-ц.		предыд. м-ц.		текущ. квартал		текущий год	
					n _ф	T	n _ф	T	n _ф	T	n _ф	T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Таблица 7

Контроль уровня безотказности изделий ФС

№ ФС по ГОСТ 18675-79	Наимен изделия	тип изделия	Безотказность за контрольный период							
			текущий м-ц.		предыд. м-ц.		Текущ. квартал		текущий год	
			n _ф	T	n _ф	T	n _ф	T	n _ф	T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Примечание: превышение n_ф>ВГР отмечается в графе 4 табл. 7 звёздочкой.

Информационное обеспечение формирования режимов контроля безотказности изделий ФС представлено в табл.8

Таблица 8

Информационное обеспечение

Место получения информации	Источник информации	Содержание информации
ТКБ	Руководство по эксплуатации ЛА (ФС)	T _{тип} ЛА, № ФС и наименов., наименование и тип изделия, колич-во. Одинаковых изделий на ЛА
ПЭО	Отчёт о технико-экономических показателях (форма 23) План повышения эффективности ПТЭ ЛА	K _T K _{1000 пл}
ПДО	Табель почасового учёта (форма 20)	T (налёт парка)
ОТК, ЛД	Бортовые журналы КУНАТ Ведомости дефектации	n _ф качественная информация об отказах

Реализация рассмотренных режимов в ЭАП предполагает широкое использование ЭВМ, оперативный учёт информации, её регулярную оценку и анализ. На основании таких оценок принимается решение о пригодности ФС к безопасной и экономичной эксплуатации и осуществляется управление надёжностью путём реализации мероприятий, оказывающих воздействие на весь парк эксплуатационных изделий данного типа. Такими мероприятиями

могут являться: назначение дополнительных профилактических работ, изменение периодичности работ, изменение условий и режимов эксплуатации, выполнение конструктивных доработок, переход на стратегию ТО по наработке и установление ресурсов изделий.

4.1.3. Корректировка режимов профилактических работ изделий ФС заменяемых по состоянию.

В условиях применения стратегий ТОСКН для изделий ФС особую актуальность приобретает задача оперативной оценки надёжности серийных изделий в эксплуатации. Потребность в решении такой задачи возникает при необходимости уточнения режимов профилактических работ ($t_{пр\ opt}$), а также при управлении качеством изготовления и ремонта изделий АТ. Стратегия ТОСКН предполагает замену изделия в случае его отказа на новое или отремонтированное, поэтому качество изделий, эксплуатируемых на самолётах парка, крайне важно для ЭАП. С этой точки зрения процесс использования таких изделий следует рассматривать, начиная с этапа изготовления (ремонта) изделий на заводах авиационной промышленности (ремонтных заводах ГА) [6,11].

- 1) новые (ремонтируемые) изделия выпускаются заводом-изготовителем (ремонтным заводом) серийными партиями;
- 2) под серийной партией изделий понимают группу изделий в количестве N_j штук, выпускаемых заводом за определённый календарный период (месяц, квартал, год и т.д.);
- 3) по мере изготовления изделия поступают на склады потребителей, где каждое i^{oe} изделие хранится случайный календарный период τ_{xi} до момента установки на ЛА;
- 4) на ЛА изделия эксплуатируются с разной интенсивностью. Эксплуатация i^{ro} изделия продолжается случайный календарный период времени τ_i . За этот период i^{oe} изделие наработает T_i часов к моменту замены в случае отказа;
- 5) в произвольной календарный момент времени (календарную дату θ_1) партию изготовленных заводом изделий в количестве N_j штук следует рассматривать, как состоящую из трёх частей: часть изделий эксплуатируемых на ЛА, часть изделий уже отказала и заменена на новые, часть изделий хранится на складах. Возникают переменные парк изделий АТ, т.к. в следующую календарную дату θ_2 соотношение между частями парка изделий изменяется.

Оценку качества (безотказности) j^{oi} партии изделий целесообразно делать для произвольного календарного момента времени θ_4 когда в начале эксплуатации j^{oi} партии часть изделий уже получила максимально возможную наработку (отказала). Если θ_4 взят в конце периода эксплуатации партии изделий, то задача решается известными статистическими методами для постоянного исходного количества наблюдаемых изделий (постоянный парк), но тогда упускается возможность вовремя корректировать периодичность работ по ТО и управлять качеством изготавливаемых (ремонтируемых) изделий. Для оценки безотказности изделий используется показатели ЭМ (табл.9), где также приведены расчётные формулы их статистических оценок.

Определение показателей надёжности серийных изделий

№ п/п	Показатель надёжности		Расчётные формулы	
	Наименование	Обозначение	Постоянный объём наблюдений (пост. парк)	Переменный объём наблюдений (перемен. парк)
1	Вероятность безотказной работы	$P(t)$	$P(t) = 1 - \frac{n}{N}$	$P(t) = 1 - \frac{n(\tau_q)}{N(\tau_q)}$
2	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$	$\lambda_{(\Delta t)} = \frac{\Delta n}{[N - n(t)]_{\Delta t}}$	$\lambda(t_q) = \frac{n_j(\tau_q)}{[N_j(\tau_q) - n_j(\tau_q)]T_q}$
3	Средняя наработка на отказ	T_{cp0}	$T_{\text{ндо}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$	$T_{cp0} = \frac{\sum_{i=1}^{n(\tau_q)} t_{ij}}{n(\tau_q)}$
4	Интенсивность замены	$\mu_3(t)$	$\mu_3(\Delta t) = \frac{\Delta m}{[N - n(t)]_{\Delta t}}$	$\mu_3(t_q) = \frac{m_j(\tau_q)}{[N_j(\tau_q) - m_j(\tau_q)]T_q}$
5	Средняя наработка до 1 ^{ой} замены	T_{cp3}	$T_{cp3} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{3i}}{m}$	$T_{cp3} = \frac{\sum_{i=1}^{m_j(\tau_q)} t_{3ij}}{m_j(\tau_q)}$

Примечание: $n_j(\tau_q)$ - количество отказавших изделий за календарный период; $N_j(\tau_q)$ - количество изделий j -ой партии, эксплуатируемых за календарный период; n - число отказов; N - число наблюдений; Δt - интервал наработки; Δn - количество отказов в интервале; $n(t)$ - количество отказов на начало интервала; Δm - количество замен на Δt ; $m(t)$ - количество замен на начало интервала; t_{3i} - наработка i -ого изделия до замены; $m_j(\tau_q)$ - количество замен за календарный период; t_{3ij} - наработка i -ого изделия j -ой партии до замены.

Вводятся следующие условные обозначения: N_j - количество изделий j -ой партии; j - номер партии изделий; θ - календарные даты ($\theta_{\text{НИП}}$ - начало изготовления партии; $\theta_{\text{КИП}}$ - конец изготовления партии; θ_q - дата оценки надёжности партии; θ_i - дата выпуска i -ого изделия; θ_{yi} - установки i -ого изделия на ЛА; θ_{ci} - снятия i -ого изделия с ЛА); τ - календарные периоды (τ_{xi} - хранения i -ого изделия; τ_q - период, за который проводят оценку надёжности; τ_{3i} - эксплуатации i -ого изделия); T, t - часы наработки (t_i - наработка до отказа i -ого изделия; t_{iq} - наработка i -ого изделия, не отказавшего за календарный период τ_q ; T_2 - наработка i -ого изделия, прогнозируемая на календарную дату θ_q).

Для определения показателей надёжности (табл.9) необходимо рассчитать объём парка j -ой партии серийных изделий:

$$N_j(\tau_q) = N_j \cdot P_{\tau_q}(t \geq T_q). \quad (31)$$

Задача сводится к определению $P_{\tau_q}(t \geq T_q)$ - вероятности того, что за календарный период τ_q изделия j -ой партии будут иметь наработку $t \geq T_q$. Для этого необходимо описать случайный процесс изменения наработки изделия t при изменении календарного времени τ . Случайная функция $t(\tau)$ зависит от интенсивности исследования ЛА и является результатом сложения трёх независимых случайных величин: θ_{bi} , θ_{yi} , θ_{ci} , (дат выпуска, установки на ЛА и снятия с ЛА i -ого изделия), при этом:

$$\begin{cases} \theta_{yi} - \theta_{bi} = \tau_{xi} \\ \frac{t}{\theta_{ci} - \theta_{yi}} = w_i, \theta_{ci} - \theta_{yi} = \tau_i \end{cases} \quad (32)$$

$$\theta_{yi} - \theta_{bi} = \tau_{xi}$$

Упрощённо рассматривают на календарный период хранения изделия на складе τ_{xi} , а календарный период начала эксплуатации изделия: $\tau_{нэi} = \theta_{yi} - \theta_{нип}$. Тогда две случайные величины $\tau_{нэi}$ и W_i полностью определяют случайные процесс $t(\tau)$ для каждого изделия j -ой партии. Для представления такого процесса используют аппроксимацию (рис.11) и условно считают, что процесс начинается при $\tau=0$ и $t=-\beta$. Появляется возможность случайный линейный процесс $t(\tau)$ задавать уравнением:

$$t(\tau) = w \cdot \tau - \beta \quad (33)$$

а начальные условия для нелинейной аппроксимации задать фиктивным распределением с плотностью $\varphi_{\tau=0}(t)$.

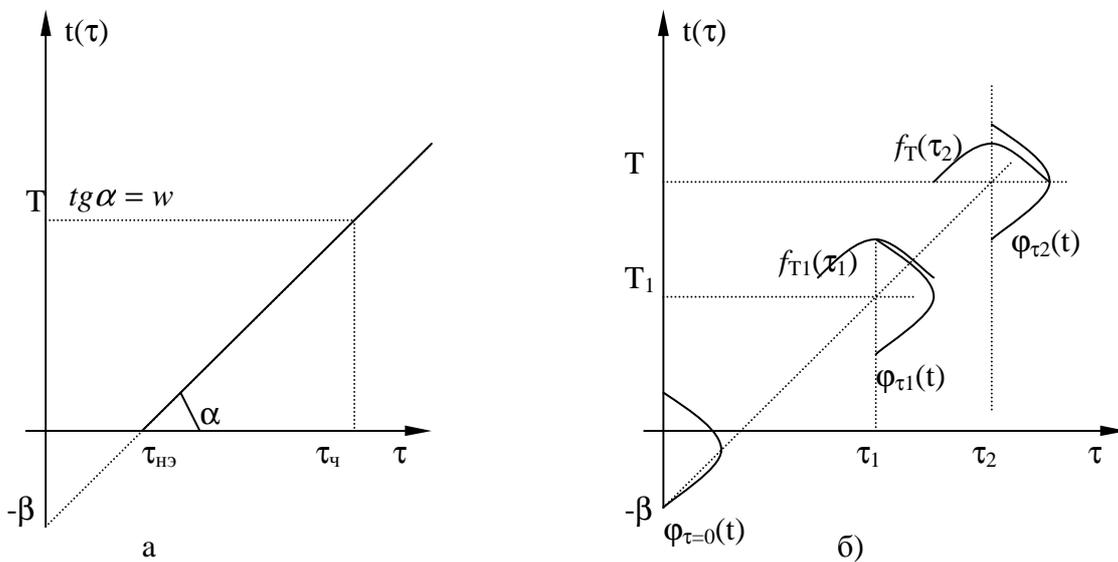


Рис.11 . Аппроксимация случайного процесса $t(\tau)$: а) линейная, б) нелинейная (распределение двух случайных величин: $\varphi_{\tau}(t)$ - плотность распределения наработки t , $f_t(\tau)$ - плотность распределения календарного времени τ).

Аппроксимация проводится для каждого изделия j -ой партии в соответствии с его условиями эксплуатации.

Вероятность $P_{\tau_q}(t \geq T_q)$ определяется в соответствии с выбранным представлением случайного процесса $t(\tau)$ и законом распределения наработки до отказа изделия АТ, исследованным предварительно.

Для корректировки режимов профилактических работ ($t_{пр\ opt}$) j -ой партии изделий определяют вероятность безотказной работы для рассчитанного переменного парка (табл.9):

$$P(t) = 1 - \frac{n(\tau_2)}{N_j(\tau_4)}$$

принимая $t=t_{пр}$ и с учётом трудоёмкости проведения работ для определения $t_{пр\ opt}$ используют условие $\prod = \left[\frac{P(t_{пр})}{T_{TO}(t_{пр})} \right]_{\max}$, где $P(t_{пр})$ - вероятность безотказной работы изделия

за наработку между профилактиками, $T_{ТО}(t_{пр})$ - трудоёмкость выполнения профилактических работ.

4.2. Методы формирования режимов ТО планера.

3.2.1. Влияние эксплуатационно-технических характеристик планера на формирование режимов ТО.

В условиях эксплуатации на конструкцию планера действует комплекс факторов, связанных с условиями лётной и технической эксплуатации. В полёте - уровень и частота повторяемости действующих нагрузок, характер вибраций; на земле – воздействие внешней среды (влажность, запылённость, осадки, солнечная радиация, агрессивные аэрозоли и т.д.). Повреждения, возникающие в элементах конструкции планера, носят случайный характер. Нарботки до возникновения повреждений можно описать известными законами распределения случайной величины с учётом физических процессов возникновения и развития повреждений (табл.10).

Таблица 10.

Виды повреждений элементов конструкций и планера.

Повреждения	Причины	Распределение наработки до возникновения повреждения	Частота повторяемости повреждений, %
Трещины	Усталостные напряжения	Лог.-нормальное	40
Вмятины, забоины	Удары посторонними предметами	Экспоненциальные	20
Коррозия	Воздействия окружающей среды	Вейбулла	10
Люфты, зазоры	Износ	Нормальное	30

Особенности конструкции планера и возникающие повреждения нас будут интересовать с точки зрения формирования режимов ТО. Для предотвращения рассмотренных повреждений и снижения частоты их проявления, а, следовательно и для сокращения объёмов ТО, при разработке конструкции планера применяются следующие принципы: принцип безопасности повреждения и принцип равнопрочности (равнонапряжённости).

Принцип безопасности повреждений позволяет обеспечить эксплуатационную живучесть планера (особенно это касается усталостных повреждений). Требования по эксплуатационной живучести включаются в технические требования к новому поколению пассажирских ЛА. Для обеспечения эксплуатационной живучести необходимо выделить следующее:

- а) должны быть известны «опасные зоны» конструкции планера (зоны силовых элементов, где могут образовываться усталостные повреждения);
- б) «опасные зоны» должны быть доступны для контроля их технического состояния;
- в) остаточная прочность конструкции с трещинами должна обеспечивать целостность конструкции до момента их обнаружения;
- г) скорость развития усталостных трещин не должна превышать заданных ограничений;
- д) должны широко исследоваться неразрушающие методы контроля; периодичность контроля и разрешающая способность средств контроля должны обеспечивать заданную вероятность обнаружения допустимых повреждений.

Принцип равнопрочности используется для современных тонкостенных конструкций с подкреплением (крылья, фюзеляж, оперение). Создаются «регулярные» зоны – равнонапряжённые. Современные методы расчёта напряжённого состояния конструкции планера позволяют с достаточной точностью прогнозировать техническое состояние таких зон. Зоны с неоднородностью упругих полей (нерегулярные зоны) сводятся до 10÷15 точек. Это позволяет сократить объёмы работ по ТО в «регулярных зонах» и 60% общего объёма работ выделить на «нерегулярные зоны».

Явления износа и коррозии требует визуального осмотра, при этом существенным является частота осмотров. На борьбу с коррозией ЛА прошлых поколений приходилось 30% всей трудоёмкости ТО.

Совокупность объёмов и периодичности работ по ТО планера определяются принципами конструктивных решений ЛА, наличием средств диагностирования, характером и развитием основных повреждений. Значительная часть работ выполняется по результатам диагностирования в соответствии со стратегией ТОСКП. Для особо важных элементов конструкции с целью обеспечения безопасности полётов необходимо применять стратегию ТОНАР. В табл.11 представлена структура ТО планера.

Таблица 11

Структура ТО планера

Характеристика объёма работ	Содержание работ
Постоянный- не зависят от наработки и технического состояния конструкции	<ul style="list-style-type: none"> • визуальный внешний осмотр целостности конструкции • очистка и промывка внешней поверхности • удаление влаги в подпольном пространстве фюзеляжа • смазка подвижных элементов закрылков и предкрылков, дверей и люков • контроль затяжки болтовых соединений • контроль люфтов и зазоров • контроль «опасных зон»
Переменный – зависит от результатов контроля и диагностирования	<ul style="list-style-type: none"> • удаление коррозии • восстановление покрытий • регулировка зазоров • восстановление герметизации фюзеляжа и крыла • доработка конструкции

Режимы ТО планера должны определять рассмотренные объёмы работ постоянного и переменного характера и периодичность их выполнения.

При реализации стратегии ТОНАР особое место отводится обоснованию межремонтного ресурса ЛА, при реализации стратегии ТОСКП – прогнозированию технического состояния узлов и зон конструкции планера, развитию повреждений в этих зонах и периодичности контроля (диагностирования). Рассмотрение основных повреждений конструкции планера указывает на то, что особое внимание следует уделять таким свойствам ЭН, как безотказность и долговечность. Эти вопросы решаются при проектировании ЛА и при его эксплуатации.

Показателями долговечности установлены ресурсы и сроки службы. Требования интенсивной эксплуатации ЛА в течение длительного периода времени и обеспечение безопасности полётов вызывает необходимость значительного увеличения расчётного ресурса и срока службы. В процессе разработки ЛА вопросы ресурса и срока службы

решаются также тщательно, как прочность, жёсткость и масса конструкции планера. Высокие значения ресурса (назначенные ресурсы с выше 60000 лет.ч.) для ЛА В727, В737, В747, В757, В767 были подтверждены в два этапа: 50% к началу перевозок, 100% после одного года эксплуатации. Это достигалось выполнением двух условий: 1) ЛА спроектирован так, что за время длительной эксплуатации не возникают катастрофических ситуаций по вине усталостных повреждений; 2) ЛА является объектом постоянного и хорошо организованного обслуживания, что позволяет обнаруживать повреждения, возникающие в процессе эксплуатации, и вовремя их устранять.

Рекомендации по обоснованию и увеличению ресурса ЛА могут быть сделаны при изучении технического состояния ЛА основного парка, результатов дефектации при ремонте и при проведении лётной эксплуатации самолётов – лидеров с опережением налёта основного парка. Продление ресурса проводится в индивидуальном порядке для каждого ЛА. К способам увеличения межремонтного ресурса можно отнести: конструктивные доработки на всё парке по результатам анализа повреждений и дефектации при ремонте ЛА, выработавших ресурс и самолётов - лидеров; введение ограничений для облегчения режимов эксплуатации; изменение режимов ТО; совершенствование технологий ТО. При установлении ресурсов ЛА рекомендуется пользоваться всей номенклатурой показателей, установленных теорией ЭН: ресурс до 1^{го} ремонта- наработка от начала эксплуатации до поступления ЛА в первый ремонт; межремонтный ресурс- наработка между двумя смежными ресурсами; гамма-процентный ресурс- наработка, в течение которой ЛА не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в %; назначенный ресурс- суммарная наработка, при достижении которой, применение ЛА должно быть прекращено: гарантийный ресурс-наработка, в течение которой изготовитель несёт ответственность за техническое состояние ЛА при условии выполнения инструкций по эксплуатации.

3.2.2. Методы корректировки режимов ТО планера по результатам эксплуатационных наблюдений.

Режимы ТО планера формируются для поддержания необходимого уровня ЭН и для предупреждения появления повреждений в течение установленного ресурса (срока службы) ЛА. Периодичность работ постоянного характера $t_{пр\ opt}$ определяется из условий обеспечения безопасности полётов:

$$P_{зад} = 1 - F(t_{пр}), \quad (34)$$

где $P_{зад}$ - вероятность безотказной работы из условий обеспечения безопасности полётов;

$F(t_{пр})$ - функция распределения отказов (повреждений) за наработку между профилактическими работами, определяется законом распределения (моделью возникновения и развития повреждений).

Перечень работ и периодичность их выполнения отражаются в регламенте, который разрабатывается фирмами-разработчиками АТ. Проект регламента представляется вместе с макетом ЛА макетной комиссии, затем проводится его проверка и уточнение в процессе заводских, государственных и эксплуатационных испытаний. В процессе испытаний ЛА его регулярной эксплуатации возникает потребность в корректировке регламента, т.е. в корректировке режимов ТО планера. Причиной являются конструктивные доработки и модификация узлов, накопление опыта эксплуатации, совершенствование методов ТО [12].

Различают три этапа корректировки:

а) 1-ый этап - период государственных и эксплуатационных испытаний; проводится практическая проверка первоначального регламента; выполняют сбор и анализ информации по надёжности, разрабатывают документацию, уточняют объёмы и

периодичность выполнения типовых работ, определяют целесообразность нетиповых работ;

б) 2-ой этап- 1÷1,5 года регулярной эксплуатации; проводят проверку и уточнение первоначального регламента на группе самолётов-лидеров;

в) 3-ий этап- систематическое уточнение регламента в процессе эксплуатации.

Основой любого этапа является накопленный опыт эксплуатации ЛА и данные об отказах и повреждениях конструкции планера, по этому каждая корректировка включает: сбор данных об отказах и неисправностях; качественный анализ отказов и неисправностей, их влияние на безопасность полётов; оценку показателей ЭН. Результаты корректировки формируются в виде перечня изменений к действующему регламенту, далее осуществляют проверку нового регламента на ограниченном числе ЛА (подконтрольная эксплуатация по специальным программам), окончательную доработку регламента и его внедрение на всём действующем парке ЛА данного типа. Перечисленные общие положения разработки и корректировки регламента в полной мере соответствуют уточнению и корректировке режимов ТО планера. Особое значение имеет определение объёма наблюдений. Задача ставится следующим образом- как определить количество подконтрольных самолётов, чтобы с минимальной ошибкой оценить показатели ЭН и определить закон распределения наработки до отказа (повреждения) [6].

Пусть N- число подконтрольных самолётов; T- продолжительность подконтрольной эксплуатации каждого из них, в час. наработки; d- общее количество отказов (повреждений) в течение суммарной доработки N•T. Вероятность безотказной работы ЛА может быть рассчитана по формуле $P(t) = e^{-\omega t}$. По результатам наблюдений проводят статистическую

оценку параметра потока отказов $\omega^* = \frac{d}{N \cdot T}$. Чем больше наработка N•T, тем ближе оценка

ω^* к его истинному (теоретическому) значению ω . Относительная погрешность ошибки $\delta = \frac{\omega - \omega^*}{\omega}$.

Для решения задачи задаются доверительной вероятностью γ и определяют минимальное значение N•T, при котором вероятность того, что относительная погрешность при оценке превысит заданную δ не будет больше γ :

$$\gamma = P\left(\frac{\omega - \omega^*}{\omega} \leq \delta_{зад}\right) = 1 - P\left(\frac{\omega - \omega^*}{\omega} > \delta_{зад}\right). \quad (35)$$

Если считать, что появление числа отказов d за наработку N•T является пуассоновским потоком событий, можно определить характеристики этого потока (математическое ожидание m_d и дисперсию D_d), и по определению $m_d = D_d = \omega \cdot N \cdot T$, $\delta_d = \sqrt{\omega \cdot N \cdot T}$. В случае, когда значение $\omega \cdot N \cdot T$ велико, можно считать, что количество возникающих отказов d распределено нормально с теми же характеристиками m_d и D_d .

С учётом выражения $\omega^* = \frac{d}{NT}$, получаем, что оценка ω^* также распределена

нормально с параметрами: $m_{\omega^*} = \omega$; $D_{\omega^*} = \frac{\omega}{N \cdot T}$, $\delta_{\omega^*} = \sqrt{\frac{\omega}{N \cdot T}}$. Выражение (35) примет вид:

$$\gamma = 1 - P\left(\frac{m_{\omega^*} - \omega^*}{\delta_{\omega^*}} > \delta \cdot \sigma_d\right) = 1 - P\left(\frac{\omega - \omega^*}{\sqrt{\frac{\omega}{N \cdot T}}} > \delta \cdot \sqrt{\omega \cdot N \cdot T}\right) = \quad (36)$$

$$= 1 - P\left(\frac{\omega^* - \omega}{\sqrt{\frac{\omega}{N \cdot T}}} < -\delta \cdot \sqrt{\omega \cdot N \cdot T}\right).$$

В результате, используя нормированную функцию нормального регулирования $\Phi(z)$, получим выражение:

$$\gamma = 1 - \Phi(-\delta \sqrt{\omega \cdot N \cdot T}), \quad (37)$$

используя квантиль нормального регулирования

$$U_{1-\gamma} = -\delta \cdot \sqrt{\omega \cdot N \cdot T} :$$

$$N \cdot T \geq \frac{1}{\omega} \left(\frac{U_{1-\gamma}}{\delta}\right)^2. \quad (38)$$

Полученное выражение (38) служит для определения суммарной наработки подконтрольной группы самолётов $N \cdot T$ с наперёд заданными значениями γ и δ . Для расчёта принимают следующие диапазоны значений исходных данных: $\delta=0,1 \div 0,2$; $\gamma=0,8 \div 0,95$; $\omega=10^{-3} \div 10^{-4}$. В случае, когда планируется средний годовой налёт на самолёт $T_{гсс}$ уравнение (38) может быть решено относительно количества самолётов N :

$$N \geq \left(\frac{U_{1-\gamma}}{\delta}\right)^2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot T_{гсс}}. \quad (39)$$

3.2.3. Определение режимов выборочного контроля опасных зон конструкции планера.

Выборочный метод контроля самолётных конструкций достаточно широко применяется зарубежными авиакомпаниями. Программа контроля планера ДС-8 и В-727 выборочным методом является частью их ТОиР и включает: осмотры при регламентных работах (предполётные, маршрутные осмотры в промежуточном порту, осмотры при обслуживаньях малой трудоёмкости); разовые специальные проверки (в случае неисправности после грубой посадки, после особых климатических условий); выборочный контроль при тяжёлых формах ТО. Реализовать такие программы ТО позволяет принцип безопасного повреждения, заложенный в конструкцию [13,14,15].

Выборочный метод контроля представляет отбор некоторого количества наблюдений и принятие решений о всей совокупности по результатам контроля выборки. Он более целесообразен и экономичен, но требует тщательного математического обоснования режимов контроля и предварительного определения перечня опасных зон конструкции планера.

Критерием оценки технического состояния при выборочном контроле опасных зон конструкции планера рассматривается минимальная вероятность появления дефекта $R_c^* = \min R_c$

$$\{t_i, n_i, i = 1, \overline{m}\}, \quad (40)$$

где n_i - объём выборки, t_i -периодичность контроля (осмотров), $i=1, \overline{m}$ - количество осмотров.

R_c определяется с учётом вероятностей образования и обнаружения дефектов. Для определения режимов выборочного контроля опасных зон конструкции планера рассматривают три этапа: 1 этап- определение n_i на период до появления дефекта, когда осмотры проводятся с периодичностью проведения форм ТО- $t_{ТО}$; 2 этап- определение n_i и t_i для разового осмотра; 3 этап- определение $n_i, t_i, i=1, \overline{m}$ для многоразового выборочного

Наибольшая экономия трудозатрат при выборочном методе контроля опасных зон конструкции планера достигается на 1^{ом} этапе, при контроле до появления дефекта, в результате запасов прочности конструкции.

Для определения характеристик контроля используют выражения:

$$P(q_i = 1) = [1 - F(t_i, \theta)]^{N-n}, \quad (41)$$

где $P(q_i=1)$ - вероятность не появления дефекта задаётся исходя из назначенных рисков принятия решений, $P(q_i=1) \geq 0,95$

$F(t, \theta)$ - функция распределения наработки до появления дефекта, определяется предварительными исследованиями с учётом физической модели возникновения дефекта, θ - параметр распределения.

N - количество самолётов парка.

Из уравнения (41) определяется n - объём выборки (количество самолётов, подлежащих осмотру в опасных зонах).

Результаты расчётов обычно оформляются в виде таблиц и рассматриваются альтернативные режимы контроля. В табл.12 представлены результаты формирования режимов выборочного контроля скоса ребра нижней панели (бак №15) самолёта Ил-62.

Таблица 12

Режимы выборочных осмотров скоса ребра нижней панели (бак №15) Ил-62.

Тип самолёта	Шифр зоны	Объём парка	Периодичность осмотров,	Объём выборки	
			ч.нар.		
Ил-62	365	30	1800	3	10
			2500	10	30
			4000	20	66

3.3 Методы формирования режимов ТО двигателя.

3.3.1. Влияние эксплуатационно-технических характеристик двигателя на формирование режимов ТО.

На долю двигателя приходится 50% прямых расходов на ТО самолётов, потому очевидна целесообразность принятия новых технических усовершенствований для повышения ЭН и эксплуатационной технологичности двигателей. Рассматривают два направления: конструктивное совершенство и совершенствование стратегий, программ и режимов ТО. Например, применение программы ТОиР, основанных на стратегии по техническому состоянию, оказало значительное влияние на снижение расходов по ТО, а ввод в эксплуатацию комплексных бортовых систем сбора и обработки полётной информации о состоянии двигателя обеспечил дальнейшее снижение этих расходов. Так для самолёта А-300 прямые расходы на ТОиР силовой установки составили на самолёте- трудоёмкость 2%, материальные затраты- 8%, вне самолёта- трудоёмкость 22%, материальные затраты 33% от прямых расходов на ТОиР самолёта в целом.

Формирование режимов ТОиР, обеспечивающих снижение расходов, обусловлено особенностями конструкции двигателей. При создании современных двигателей стремятся закладывать модульность конструкции, а также обеспечивать контролируемость и возможность быстрого снятия (установки) двигателей. Целый ряд операций по текущему ремонту двигателей, включая замену отдельных модулей, возможно выполнять

непосредственно «на крыле». Модульность обеспечивается исходя из функциональных и технологических свойств узлов силовой установки: входной направляющий аппарат, вентилятор, компрессор низкого и высокого давления, коробки приводов агрегатов, камера сгорания, турбина низкого и высокого давления, реактивное сопло. На отдельных двигателях часть узлов (модулей) делится на более мелкие блоки. При модульной конструкции двигателя сокращается число случаев их досрочного снятия с последующей оправкой на завод для ремонта. трудоёмкость устранения отказов или неисправностей на модульном двигателе значительно ниже, чем на двигателе обычной конструкции [16].

Взаимозаменяемость и лёгкость как модулей в целом, так и их отдельных деталей обеспечиваются рядом конструктивно-технологических мероприятий: повышение точности изготовления; фланцевые соединения с призонными болтами; быстросъёмные соединения; раздельная динамическая балансировка роторов компрессора и турбины и др. Модульность конструкции позволяет также повышать и контролепригодность, появляется возможность контроля основных частей изделия.

Например, для облегчения ТОиР двигатель CF-6 самолёта B-747 имеет возможность модульной разборки всех основных частей. Без съёма двигателя с самолёта могут быть сняты и заменены следующие модули: ротор вентилятора в сборе, передний ротор компрессора, корпус турбины, жаровые трубы камер сгорания, турбины высокого и низкого давления, узлы подшипников, лопатки направляющего аппарата, лопатки вентилятора, двигатель B-211 для самолёта B-767-300 имеет следующие характеристики ТОиР: для модуля «лопатки вентилятора»- трудоёмкость замены модуля 2 чел.ч., время замены 1ч, контролируется уровень вибрации (время проверки 20 мин); для модуля «вентилятор»- трудоёмкость замены модуля 15 чел.ч., время замены 6ч, контролируется уровень вибрации (время проверки 20 мин.)

Контроль технического состояния современных двигателей проводится с широким использованием средств неразрушающего контроля, позволяющих в полной мере реализовать ТО с контролем параметров.

Таким образом для снижения расходов на ТО двигателя предпочтительной является стратегия ТОСКП. Возможность применения контроля параметров обеспечивается модульностью конструкции и развитием средств контроля (диагностирования) [12]. В настоящее время основными видами диагностирования авиадвигателей являются: анализ продуктов износа в масле; вибродиагностирование; диагностирование по термогазодинамическим параметрам; параметрическое диагностирование.

Анализ продуктов износа в масле выполняют различными методами. Наиболее распространены эмиссионный спектральный анализ и рентгеноспектральный анализ наличия металлических примесей. Оперативную оценку технического состояния двигателя по концентрации металлических (ферромагнитных) частиц в масле можно дать магнитным методом, применяется так же феррографический анализ.

Вибродиагностирование авиадвигателей осуществляется как в полёте, так и на земле. Существующее оборудование позволяет выявить источники повышенных вибраций и прогнозировать отказы на основании тенденций нарастания вибраций в полёте.

Диагностирование по термогазодинамическим параметрам осуществляется на базе составления и решении комплекса диагностических уравнений, связывающих параметры двигателя и основные показатели его работоспособности.

Раннее распознавание состояний газотурбинных двигателей в эксплуатации можно осуществлять используя динамику изменения показателей штатных приборов (параметрическое диагностирование).

Современные зарубежные системы контроля состояния авиадвигателей также используют перечисленные методы, но в большей степени построены с применением

сложных автоматических бортовых систем сбора данных, обеспечивающих информацию для последующей обработки наземными ЭВМ.

Основные отказы и неисправности авиадвигателей можно объединить в четыре группы [1]:

- 1) отказы, приводящие к возникновению опасных ситуаций в полёте, которые обуславливают специальные действия экипажа по парированию возможных последствий;
- 2) отказы, приводящие к усложнению условий полёта; с такой категорией отказов продолжение полёта из промежуточного аэропорта не допускается, они должны устраняться при подготовке к полёту;
- 3) отказы, которые выявляются в процессе диагностирования на базовом предприятии; подлежат устранению при ТО, вылет с такими отказами не разрешается;
- 4) отказы, которые допускают выполнение полётов, подлежат устранению при очередной форме ТО.

Среди отказов различают постепенные (обусловленные выходом параметра за установленные допуски) и внезапные (обусловлены разрушением отдельных деталей и узлов двигателей). Наиболее характерны отказы из-за газодинамической неустойчивости двигателя в следствие неисправности механизма регулирования подачи топлива, разрушения лопаток компрессора, заклинивание вала двигателя.

Можно выделить следующие основные положения для формирования режимов ТО двигателя:

- а) режимы ТО двигателя являются составной частью программы ТОиР ЛА;
- б) основное внимание уделяется диагностированию (стратегия ТОСКП) с определением режимов контроля: упреждающих допусков, периодичности контроля, прогноза изменения параметров;
- в) режимы контроля параметров определяются с учётом процессов развития типовых отказов и методов диагностирования;
- г) работы по ТО выполняются в рамках принятых форм ТО (оперативных, периодических) и включают работы на самолёте и вне его;
- д) оптимизация режимов проводится по критериям обеспечения безопасности полётов и обусловлена модульностью конструкции, легкосъёмностью, взаимозаменяемостью и контролепригодностью конструкции.

Современные авиадвигатели являются весьма напряжёнными по нагрузкам и требуют повышенного внимания к обеспечению их надёжности. По этому, как в полёте, так и после каждого полёта, должен осуществляться анализ работы двигателя и прогнозироваться его техническое состояние. В настоящее время оценка ЭН двигателей проводится в основном по трём среднестатистическим показателям: наработке, приходящейся на один отказ двигателя в полёте $T_{оп}$; наработке, приходящейся на одну неисправность, выявленную и устранённую при ТО- $T_{оуэ}$; наработке, приходящейся на один досрочный съём двигателя- $T_{дс.д.}$. В ЭАП осуществляется оперативный учёт этих показателей и сравнение фактических показателей с нормативными.

3.3.2. Методы формирования режимов ТО двигателей при эксплуатации до предотказового состояния.

Эксплуатация двигателей до предотказового состояния происходит в соответствии со стратегией ТОСКП, которая представляет совокупность правил по определению режимов и регламента диагностирования объектов эксплуатации и принятию решений о необходимости их замены или необходимого объёма технического обслуживания на основе информации о фактическом техническом состоянии объектов.

Под режимом диагностирования понимается совокупность, определяющая состав диагностических параметров, периодичность проверок и упреждающие допуски на параметры. Режим диагностирования предполагает установление количественных связей между значениями упреждающих допусков и предпочтительностью контроля. Регламент диагностирования является единым документом, директивно утверждающим режимы технического диагностирования.

Получение исходной информации о техническом состоянии двигателей производится путём измерения его функциональных и динамических параметров. Измерения производятся с определённой периодичностью: в полёте и при выполнении форм ТО; на борту и со снятием с самолёта; по приборам самолёта; средствами автоматического контроля; средствами технического диагностирования неразрушающего контроля; с помощью контрольно-поверочной аппаратуры; с регистрацией в бортовых журналах и на ленту бортовых или наземных дешифраторов.

Характерной особенностью стратегии ТОСКП являются отсутствие межремонтного ресурса. Устанавливается только назначенный и гарантийный ресурсы. Ресурсы отдельных модулей и блоков могут временно ограничиваться из-за необходимости дополнительной проверки их надёжности, разработки новых методов и средств контроля.

Информационной основой метода технической эксплуатации до предотказового состояния является текущие и накопленные данные о техническом состоянии объектов, о надёжности, о продолжительности, трудоёмкости и стоимости ТО.

Для выявления предотказового состояния объектов используется принцип назначения упреждающих допусков на диагностируемые параметры, которые находятся между предельным и предотказовым уровнями параметра. Выход параметра за предельный уровень означает отказ. Достижение предотказового уровня означает необходимость выполнения предплановых работ (рис.13.) [9].

Назначить режим ТО это значит установить количественную связь между упреждающим допуском $\Delta\eta = \eta^{**} - \eta^*$ и периодичностью контроля $\Delta t = t_1 - t_2$.

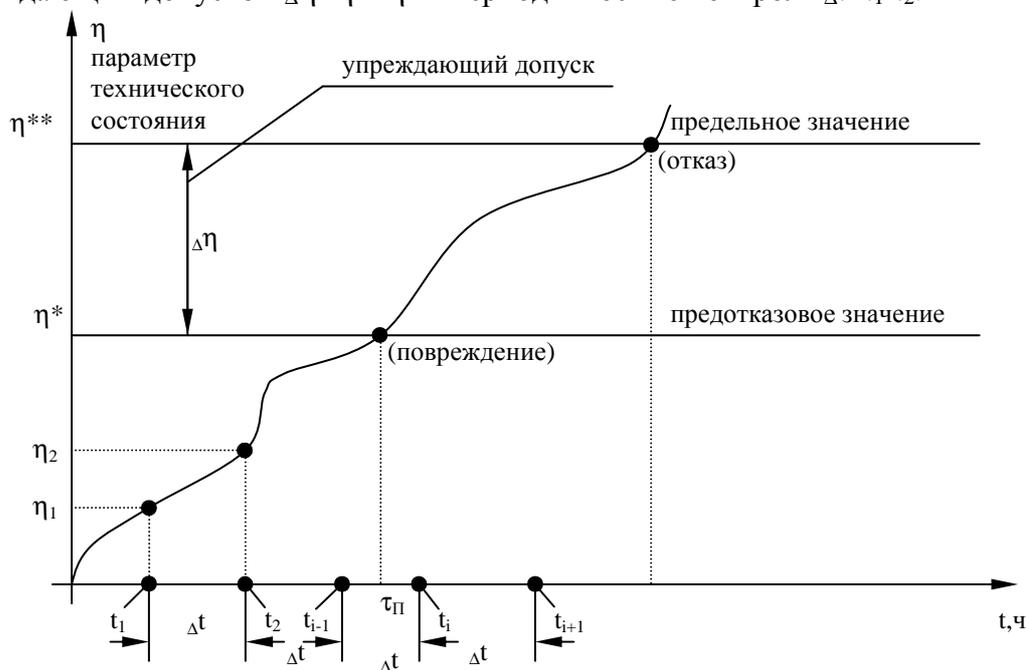


Рис. 13. Связь параметра технического состояния объекта η с периодичностью контроля Δt .

Упреждающий допуск $\Delta\eta$ связан с периодичностью контроля неким образом, чтобы при наработке τ , находящейся $t_{i-1} \leq \tau \leq t_i$, параметр после пересечения η^* до момента контроля t_{i+1}

не пересёк η^{**} с вероятностью $P(\tau) \geq P_{\text{зад.}}$, где $P_{\text{зад.}}$ представляет уровень безотказной работы объекта за наработку Δt . Замена объекта или восстановление производится в момент контроля t_i .

Опыт развития двигателей семейства МК-8 показал, что исследования по контролепригодности двигателей и разработка средств диагностирования должны проводиться как на этапе проектирования, так и на этапах серийного производства и эксплуатации. Система диагностирования этих двигателей позволяет обнаруживать возникающие при эксплуатации неисправности на ранних стадиях, своевременно оценивать техническое состояние и прогнозировать его изменение на межпроверочный период. Оценка работоспособности двигателя реализуется по схеме (рис.14,15)

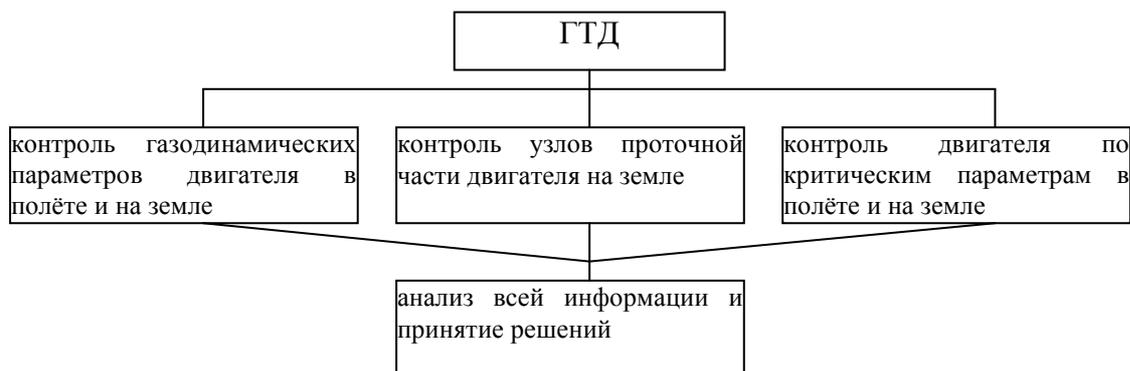


Рис.14. Укрупнённая схема оценки работоспособности двигателя.

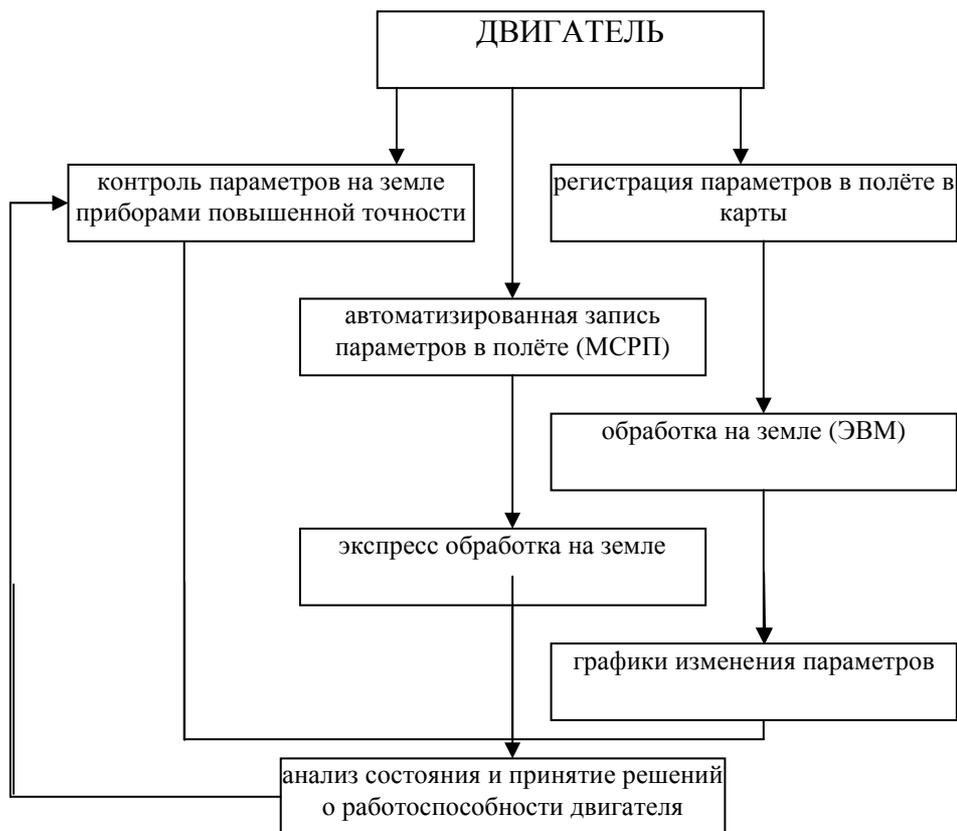


Рис. 15. Схема контроля газодинамических параметров двигателя.

Для реализации представленных схем (рис. 14,15) должны быть предварительно сформулированы режимы ТО: управляющие допуски, эталонные значения параметров, прогноз значений параметров на следующий момент проверок (следующий полёт), периодичность контроля в полёте (непрерывной, дискретный). Измеряемым параметрами являются: количество отбираемого воздуха G_B ; давление в патрубке отбора воздуха; частота вращения роторов компрессоров низкого и высокого давления $n_{КНД}, n_{КВД}$; температуры газов t_5, t_6 ; давление топлива P_T и масла P_M , температура масла $t_{M\text{ вх}}, t_{M\text{ вых}}$; часовой расход топлива G_T ; уровень вибрации. По отклонениям параметров по сравнению с допусками определяют возникшие повреждения и принимают решение о работоспособности на следующей полёт или несколько полётов. Для оценки и прогнозирования работоспособности строят модели (зависимости изменения параметров от наработки) о определяются тенденции выхода за предельные уровни.

Практика использования контроля параметров двигателей ЛА в ЭАП демонстрирует разновидности рассматриваемого метода (табл. 13), режимы ТО формируются с учётом разрешающей способности средств контроля.

Таблица 13.

Разновидность режимов ТО двигателей в рамках стратегии ТОСКП

Методы ТО	Контролируемые параметры	Структура режимов ТО
1	2	3
с контролем параметров в полёте и обработкой на земле	газодинамические, вибрации	$\eta^*, \Delta\eta$ контроль непрерывный
с индикацией предельных состояний в полёте	предельные значения уровня вибраций, перегрева подшипников и лопаток турбины, наличие стружки в масле	η^{**} , контроль непрерывный
с периодическим отбором проб масла и контролем их в лаборатории	содержание продуктов изнашивания в масле	$\eta^*, \Delta t$ контроль дискретный
с периодическим осмотром деталей и узлов при ТО без снятия с самолёта	трещины, забоины, вмятины, погнутость деталей проточной части двигателя	$T_{пр\text{ opt}}$
с периодическим контролем параметров вибрации при ТО	параметры вибрации и пульсации давления	$\eta^*, \Delta t, \Delta\eta$ контроль дискретный

4. Управление эксплуатационной надёжностью и режимами ТО ЛА и АД в эксплуатационном авиапредприятии.

4.1. Определение эффективности режимов ТО.

Управление ЭН и режимами ТО ЛА и АД в эксплуатационном авиапредприятии должно проводиться с целью поддержания и повышения эффективности процесса технической эксплуатации парка ЛА, т.е. для выполнения требований безопасности полетов, регулярности вылетов, обеспечения максимального использования ЛА с поддержанием необходимой исправности АТ и минимальными затратами времени, труда и средств на выполнения ТО. При таком подходе появляется возможность совершенствования режимов ТО планера, ФС, двигателя в конкретном предприятии для конкретного парка ЛА. Любой

процесс управления предполагает проверку соответствия действующих режимов ТО, указанных в регламенте, предъявляемым требованиям.

Первым звеном в процессе управления должно быть принятие решений об эффективности действующих режимов ТО ЛА и АД [17]. Предлагается рассматривать эффективность режимов ТО как эффективность работ, выполняемых при ТО и зафиксированных в программе ТОиР ЛА и АД (объемы и периодичность их выполнения). Для решения поставленной задачи введено понятие эффективности работы. Эффективной считается работа, которая привела к обнаружению и устранению неисправностей и, соответственно, неэффективной считается работа, которая не привела к обнаружению и устранению неисправностей и отказов АТ. Такой подход целесообразен при пересмотре действующих режимов профилактических работ (периодические формы ТО).

Оценка эффективности режимов ТО осуществляется методами выборочного контроля на основании статистического контроля по альтернативному признаку (да – нет). Обозначим

уровень неэффективности работ $q = \frac{N - n}{N}$, где N – количество проведенных работ за

контрольный календарный период, n – количество эффективных работ за этот период. Объем выборки N формируется при наблюдении за результатами эксплуатации приписного парка ЛА в ЭАП. Решение, принимаемое при оценки эффективности режимов ТО, представляет проверку статистических гипотез: основной H_0 (режимы ТО эффективны) и конкурирующей H_1 (режимы ТО неэффективны). На этом основании определен порядок оценки эффективности режимов ТО:

- 1) формулируется основная и конкурирующая гипотезы: H_0 (положительное решение) и H_1 (отрицательное решение);
- 2) назначаются уровни значимости, исходя из оценок ущерба от неверно принятых решений: “ошибка I рода” α' - ошибочное отклонение H_0 и “ошибка II рода” β'' - ошибочное принятие H_1 ;
- 3) выбирается критическая область для оцениваемого уровня эффективности режимов ТО так, чтобы вероятность отклонения H_0 в случае ее справедливости была равна “ α ”, а вероятность принятия H_1 была равна “ β ”;
- 4) принимается решение: гипотеза H_0 отвергается, если выборочное оценочное значение эффективности режимов ТО лежит в критической области; в противном случае гипотеза H_0 принимается.

Для организации такого контроля должен быть определен предварительно план контроля – совокупность значений N (объем наблюдений выборки), число эффективных работ n_0 , при котором принимается положительное решение; число эффективных работ n_m , при котором принимается отрицательное решение. Задача определения плана контроля – установить такие n_0 и n_m при фиксированном N , чтобы минимизировать ошибки α и β и заранее знать их величины. Основная характеристика плана контроля – оперативная характеристика $L(q)$ – вероятность принятия положительного решения об эффективности режимов работ ТО в случае, если уровень неэффективных работ составит q . Оперативная характеристика определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} L(q_0) \geq 1 - \alpha \\ L(q_m) \leq \beta, \end{cases} \quad (42)$$

где $q_0 = \frac{N - n_0}{N}$ - уровень неэффективных работ по ТО, при котором с вероятностью

($1 - \alpha$) принимается гипотеза H_0 (положительное решение);

$q_m = \frac{N - n_m}{N}$ - уровень неэффективных работ по ТО, при котором с вероятностью β

принимается гипотеза H_1 (отрицательное решение).

Такой план контроля носит название двустороннего; вид его оперативной характеристики представлен на рис.16. Из графика видно, что чем меньше уровень неэффективности работ q , тем больше вероятность принятия положительного решения (режимы ТО эффективны) при выборочном контроле.

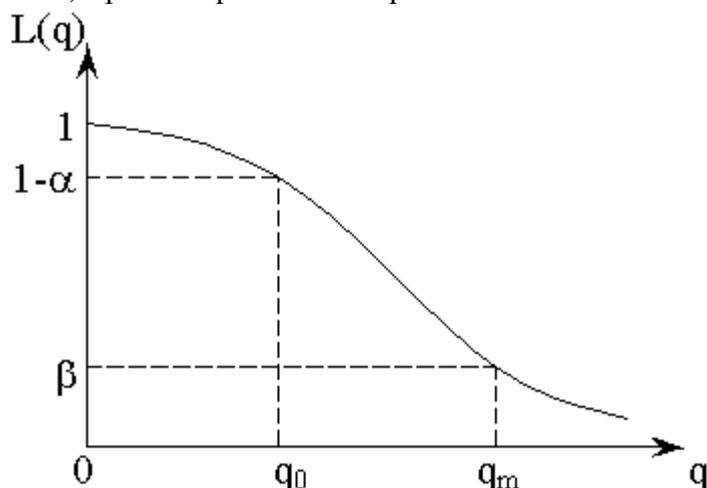


Рис.16. Оперативная характеристика плана контроля эффективности режимов ТО ЛА и АД

Для описания оперативной характеристики необходимо рассчитать вероятность появления неэффективных работ P_{N-n} , как вероятность возникновения дискретных событий.

$$L(q) = \sum_{N-n=0}^{N-n_0} P_{N-n}$$

Практические исследования показали, что наиболее целесообразно для расчета P_{N-n} использовать биномиальный закон или закон Пуассона (табл.14).

Таблица 14

Закон распределения $\{n\}$

Условия применения	Вид закона распределения	Расчетная формула
$N \geq 30$ $q \leq 0,9$	Биномиальный	$P_{N-n} = \frac{N!}{(N-n)!n!} q^{N-n} \cdot (1-q)^n$
$N \geq 100$ $q > 0,9$ $N \cdot q = \text{const}$	Пуассона	$P_{N-n} = \frac{(N \cdot q)^{N-n}}{(N-n)!} e^{-N \cdot q}$

Выборочный контроль эффективности режимов ТО в зависимости от возможности наблюдения за проведением профилактических работ ФС и их изделий в ЭАП может быть организован несколькими способами.

1) Разовая оценка эффективности режимов ТО.

Используют одноступенчатый контроль по альтернативному признаку; решение принимается по результатам контроля одной выборки за некоторый календарный период времени:

$$L(q) = \sum_{N-n=0}^{N-n_0} P_{N-n} \quad (44)$$

2) Периодический контроль эффективности режимов ТО.

Проводится в случае накопления наблюдений за “к” контрольных календарных периодов (“к” выборок); используют многоступенчатый контроль по альтернативному признаку, когда решение принимается по результатам контроля нескольких выборок. В случае $k=2$,

$$\begin{cases} L(q) = P(N_1 - n_1 \leq N_1 - n_{01}) \cdot P[N_1 - n_{01} < N_1 - n_1 < N_2 - n_{02}; (N_1 - n_1) + (N_2 - n_2) \leq N_3 - n_3] \\ P(N_1 - n_1 \leq N_1 - n_{01}) = \sum_{N_1 - n_1 = 0}^{N_1 - n_{01}} P_{N_1 - n_1}, \end{cases} \quad (45)$$

где N_1, N_2, N_3 – количество работ, наблюдаемых за 1, 2, 3 контрольные периоды;
 n_1, n_2, n_3 – количество эффективных работ за 1, 2, 3 контрольные периоды;
 n_{01}, n_{02} – число эффективных работ, при которых принимается положительное решение об эффективности режимов ТО для 1 и для 2 контрольного периода.

3) Последовательный контроль эффективности режимов ТО.

Целесообразен при оперативном управлении эффективностью ПТЭ ЛА в ЭАП; используется схема последовательного контроля, когда решение принимается после каждого контрольного периода (рис.17).

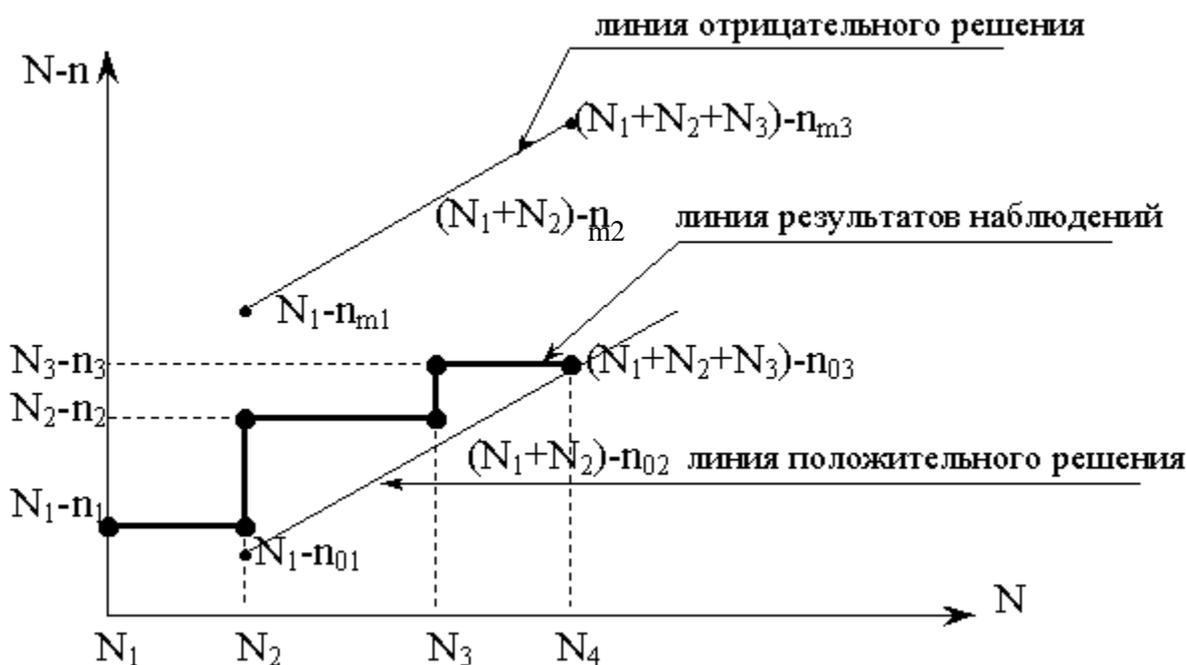


Рис.17. Схема процедуры последовательного контроля эффективности режимов ТО.

При использовании любого из трех способов решения об эффективности режимов ТО принимается по следующей схеме; $q \leq q_0$ – режимы эффективны; $q \geq q_m$ – режимы неэффективны; $q_0 < q < q_m$ – режимы эффективны с вероятностью $(1-\alpha)$ и неэффективны с вероятностью β (зона неопределенности). Принятие решения о неэффективности режимов ТО предполагает изменение периодичности и объема работ, которые определяются

известными методами расчета $t_{пр\text{ опт}}$ по накопленным значениям наработки до отказа или до появления неисправностей изделий ФС.

Реализация рассмотренных методов оценки эффективности режимов ТО предполагает выборочный контроль профилактических работ для изделий АТ, ФС и ЛА в целом, что представлено в алгоритме рис.18.

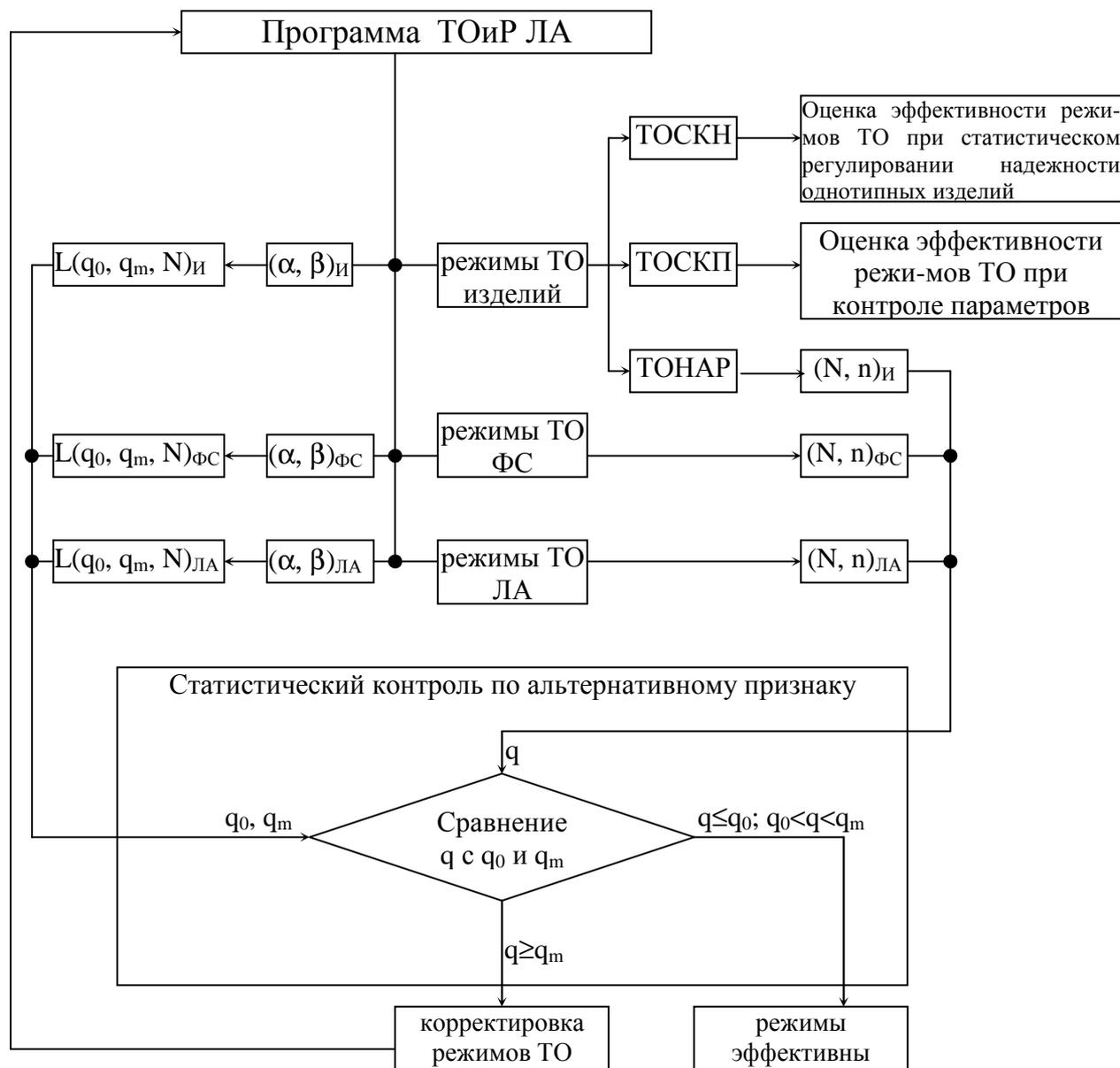


Рис. 18. Алгоритм оценки эффективности режимов ТО изделий, ФС, ЛА.

Предполагается, что режимы ТО изделий, ФС и в целом ЛА отражены в регламенте ТО и представлены в программе ТОиР ЛА, разработанной авиационной промышленностью для типа ЛА. В эксплуатационном авиапредприятии с учетом условий эксплуатации парка ЛА данного типа решается задача оценки эффективности режимов ТО. В алгоритме предусмотрено использование различных стратегий ТО для изделий ФС (ТОСКН, ТОСКП, ТОНАР). Оценка эффективности режимов ТО изделий, эксплуатируемых до отказа (стратегия ТОСКН) проводится ежемесячно при статистическом регулировании надежности

однотипных изделий парка ЛА и не требует оценки эффективности режимов по альтернативному признаку.

Для изделий, эксплуатируемых до предотказового состояния (стратегия ТОСКП) проводится оперативное управление режимами ТО при контроле диагностируемых параметров изделия, т.е. выполняется контроль по количественному признаку. Для изделий, эксплуатируемых по наработке (стратегия ТОНАР), для ФС и ЛА в целом формируется план контроля эффективности режимов ТО: фиксируется количество выполненных работ по ТО-Н, количество эффективных работ по ТО-н, назначаются риски принятия решения α и β для изделия, ФС и ЛА, соответственно, исходя из ущерба от неверно принятых решений; строится оперативная характеристика плана контроля $L(q_0, q_m, N)$ (рис.16). Для полученных значений уровней неэффективных работ в блоке статистического контроля по альтернативному признаку проводится сравнение q с q_0 и q_m и принимается соответствующее решение.

4.2. Управление режимами ТО при формировании гибкой программы ТОиР ЛА и АД

Режимы ТО ЛА и АД является составной частью программы ТОиР, как традиционных, так и программ, включающих стратегии ТО по состоянию. Программа ТОиР представляет собой документ, устанавливающий выбранные стратегии, количественные и качественные характеристики режимов ТОиР, допустимые при эксплуатации уровни повреждений, средства диагностирования и контроля, а также порядок их корректировки в процессе эксплуатации. Программа ТОиР разрабатывается в соответствии с общими требованиями (ГОСТ 28056-89) для конкретного типа ЛА.

Целесообразно рассматривать гибкую программу ТОиР ЛА, подразумевающую совокупность типовой программы ТОиР ЛА и индивидуальной, предназначенной для бортового номера ЛА. Такой подход позволяет рассматривать техническую эксплуатацию ЛА в динамике, когда управляя режимами ТО ФС и изделий каждого ЛА приписного парка ЭАП можно поддерживать заданный уровень безопасности и регулярности полетов, достигая максимального налета с минимальными затратами на ТО.

Управление режимами ТО ФС и их изделий производится на основе оценки влияния факторов, действующих в конкретном предприятии. В числе факторов рассматриваются: интенсивность эксплуатации (средняя продолжительность полетов, количество полетов в рейс); производственные ресурсы ЭАП (материально-техническое обеспечение, производительность, полнота комплектов запасных частей); парк однотипных ЛА; климатические условия эксплуатации. В качестве управляющих воздействий служат: корректировка методов ТО изделий; корректировка перечня допустимых (безопасных) отказов изделий ФС; изменение процедур ТО (технологий, алгоритмов поиска и устранение отказов и неисправностей).

Блок – схема формирования гибкой программы ТОиР ЛА в ЭАП [18] представлена на рис.19.

Центральным звеном блок-схемы рассматривается блок разработки управляющих воздействий, которые формируются и реализуются ЭАП самостоятельно при согласовании с разработчиком ЛА на основании анализа количественных характеристик ЭМ ЛА, ФС, изделий. Источниками информации при формировании гибкой программы являются: результаты оценки надежности АТ, полученные на этапах проектирования и предъявляемые при сертификации ЛА; характеристики базовой программы ТОиР ЛА; результаты оценки ЭМ ФС и изделий, а также затрат на их ТО при накопленном опыте эксплуатации парка ЛА в ЭАП.

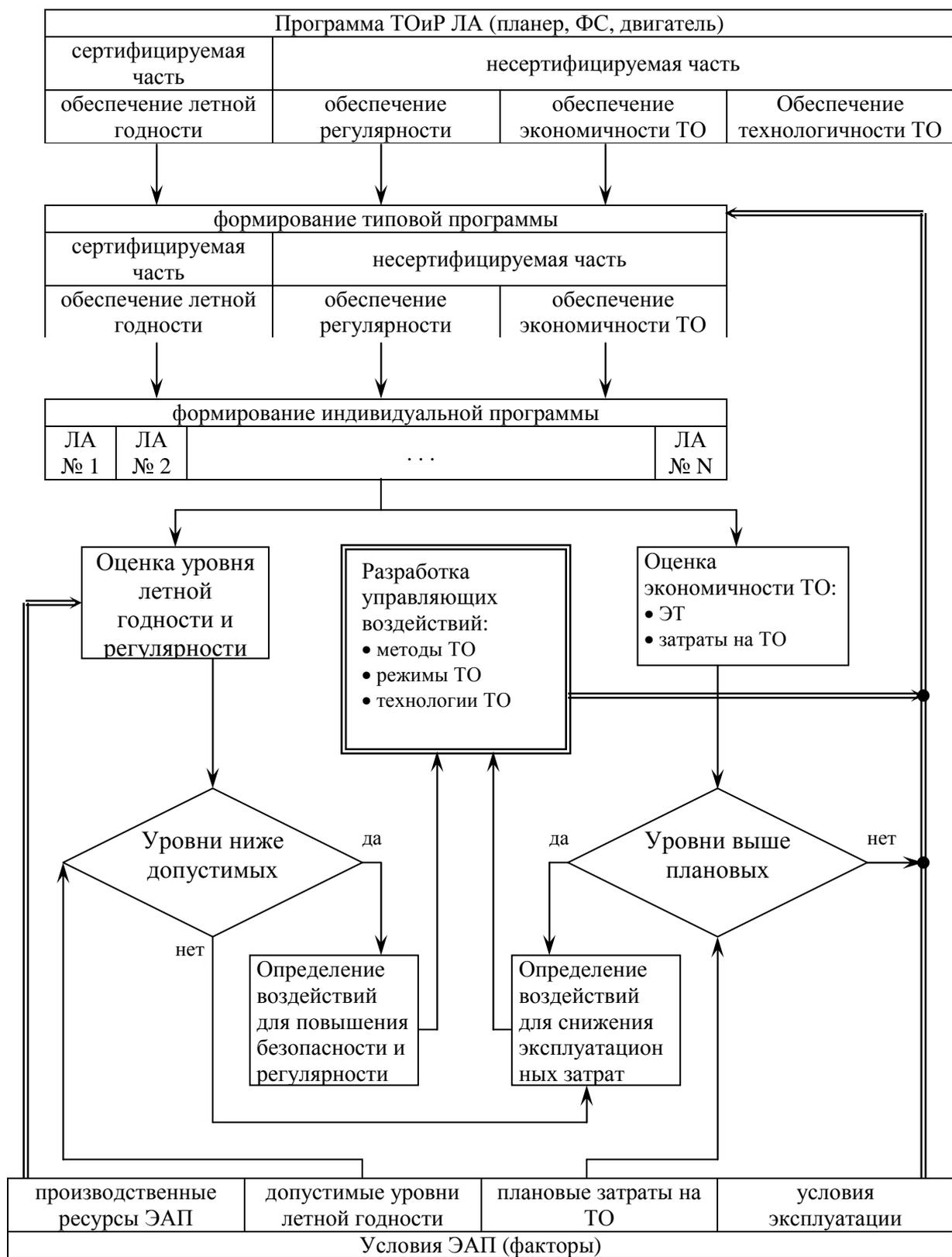


Рис. 19. Блок схема формирования гибкой программы ТОиР.

Результатом формирования гибкой программы ТОиР ЛА является совокупность типовой и индивидуальной программ ТОиР, реализуемых в ЭАП. Типовая программа устанавливает методы ТО и количественные характеристики режимов ТО для парка ЛА ЭАП. Индивидуальная программа определяет общий объем работ по устранению отказов и неисправностей изделий ФС ЛА на конкретном экземпляре ЛА в ходе его эксплуатации. Решение о проведении работ по устранению отказов и неисправностей до истечения допустимой наработки обуславливается экономической целесообразностью (равномерность использования производственных ресурсов предприятия).

При формировании гибкой программы ТОиР ЛА рассматриваются две составляющие базовой программы:

1. стратегии ТО и режимы, направленные на поддержание технического состояния и работоспособности изделий, отказ которых влияют на снижение безопасности и регулярности полетов.
2. стратегии ТО и режимы, направленные на поддержание технического состояния и работоспособности изделий, отказы которых влияют только на эксплуатационные затраты.

При этом изделия в равной мере относятся к планеру, двигателю и ФС ЛА. Постоянные объемы работ по ТО и их периодичности, обусловленные конструктивными особенностями объектов (зарядно-заправочные, регулировочные и т.д.) не подлежат корректировке. В качестве норм летной годности рассматриваются показатели, установленные в НЛГС (допустимые вероятности возникновения особых ситуаций). В качестве нормативов регулярности полетов используют показатели P_{100} по задержкам вылетов по техническим причинам.

Оценка контролируемых уровней летной годности и регулярности полетов производится сравнением допустимых значений показателей (нормативов и норм) с оценками этих показателей за контролируемый период, полученными с использованием методов статистического анализа ЭН.

Т.о. типовая программа ТОиР ЛА уточняет базовую и , обеспечивая основные требования по безопасности и регулярности полетов, позволяет приспособить режимы ТО ЛА к условиям ЭАП, при этом корректировка режимов ТО происходит при постоянной проверке выполнения норм летной годности.

Индивидуальная программа ТОиР ЛА позволяет еще больше уточнить режимы ТО и приспособить их к индивидуальным характеристикам конкретного экземпляра ЛА в части использования производственных ресурсов ЭАП сохраняя режимы ТО, регламентируемые типовой программой.

Центральным рычагом управления являются научно обоснованные режимы ТО планера, двигателя, ФС. Обоснование должно выполняться посредством анализа количественных характеристик ЭН, полученных при наблюдениях за эксплуатацией парка ЛА в ЭАП с широким использованием моделей развития отказов и неисправностей АТ.

Режимы ТО, определяемые стратегиями ТО, требуют при реализации вполне определенных технологий. Для ТОНАР – корректировка ресурсов и планирование объемов работ профилактических и по замене изделий, выработавших ресурс; ТОСКП – корректировка упреждающих допусков на диагностические параметры и периодичность контроля этих параметров, а также планирование объема профилактических работ; ТОСКН – определение допустимых, экономически обоснованных уровней ЭН изделий, оперативное принятие решений о понижении уровня надежности однотипных изделий ФС парка ЛА, планирование объема профилактических работ и работ по замене отказавших изделий.

Положительной особенностью рассмотренного метода управления режимами ТО ЛА и АД является: комплексность принятия решений об изменении режимов ТО; оперативная их корректировка в процессе эксплуатации парка ЛА; учет возможностей ЭАП, включая

производственные ресурсы, оснащенность предприятия и условия эксплуатации парка ЛА; учет индивидуальных характеристик каждого экземпляра ЛА парка (накопление повреждений, условия полетов).

Экономический эффект при использовании таких методов достигается за счет уменьшения объемов работ и увеличение периодичности их проведения. Немаловажным элементом экономии является возможность уточнения перечня допустимых (безопасных) отказов изделий ФС.

Оперативное использование рассмотренного метода дает возможность предприятию контролировать свои ресурсы, оптимально распределять их и стимулировать развитие ЭАП в части оснащения средствами диагностики, системами сбора и учета информации, квалифицированными кадрами.

Условием применения является развитая информационная база, использование ЭВМ и современных средств диагностики. Попытки реализовать рассмотренные методы были предприняты при разработке информационно-управляющих систем "ИУС".

Литература

1. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и двигателей. Части 1 и 2. Учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 1995.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10т. – М.: Машиностроение, 1987.
3. Пивоваров В.А. Повреждаемость и диагностирование авиационных конструкций. – М.: Транспорт, 1994.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978.
5. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения. – М.: Машиностроение, 1995.
6. Смирнов Н.Н., Андронов А.М., Владимиров Н.И., Лемин Ю.И. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. – М.: Транспорт, 1974.
7. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности; пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1969.
8. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. – М.: Сов. радио, 1968.
9. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1987.
10. Методика статистического регулирования надежности изделий авиационной техники при управлении эффективностью процесса технической эксплуатации самолетов в эксплуатационном авиапредприятии. – М.: РИО МИИГА, 1987.
11. Герасимова Е.Д., Полякова И.Ф. Оперативная оценка надежности серийных изделий АТ в ЭАП. Пособие по выполнению практических занятий. – М.: МГТУ ГА, 2001.
12. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. Учебник для вузов/ Под ред. М.М. Смирнова. М.: Транспорт, 1990.
13. Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С. Введение в теорию эксплуатационной живучести авиаконструкций. – М.: МГТУ ГА, 2000.
14. Петров А.М., Шевякова Л.В. Анализ зарубежных норм и правил в части эксплуатационно-технических характеристик авиатехники и опыта их применения. НТО № 445-92-IV, ЛИИ им. М.М. Громова, 1992.
15. Герасимова Е.Д., Полякова И.Ф. Пособие по выполнению практических занятий по дисциплине “Эксплуатационная надежность и режимы ТО ЛА и АД”, - М.: МГТУ ГА, 1999.
16. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Техническая эксплуатация самолетов за рубежом. Учебное пособие. – М.: РИО МИИГА, 1992.
17. Полякова И.Ф., Герасимова Е.Д. Определение эффективности режимов ТО ЛА и АД. Пособие по выполнению практических занятий. – М.: МГТУ ГА, 2000.
18. Ицкович А.А., Смирнов Н.Н. Управление эффективностью ПТЭ самолетов ГА. – М.: МИИГА, 1993.
19. Смирнов Н.Н. Научные основы построения системы технического обслуживания и ремонта самолетов гражданской авиации. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 1994.