



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ  
АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**ФАКУЛЬТЕТ** Механический

**КАФЕДРА** Технической эксплуатации летательных аппаратов и  
авиационных двигателей (ТЭЛА и АД)

**Направление подготовки** 25.06.01 Аэронавигация и эксплуатация  
(код и наименование направления подготовки)  
авиационной и ракетно-космической техники

**Направленность** 05.22.14 Эксплуатация воздушного транспорта  
(наименование направленности)

**НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**Тема** Методы расчёта периодичности планового ТО планера ВС  
с учётом использования возможностей мониторинга технического  
состояния конструкции

**Обучающийся:** Бородавкин А.С.  
(Ф.И.О.) (Подпись)

**Научный руководитель:** д.т.н., проф. Кулешов А.А.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.) (Подпись)

**Рецензенты:** д.т.н., проф. Самойленко В.М.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.) (Подпись)

к.т.н., доцент Олешко В.С.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.) (Подпись)

**Работа допущена к защите:**

**Заведующий кафедрой** к.ф-м.н., доцент Богомолов Д.В.  
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.) (Подпись)

**МОСКВА 2025**

## **Методы расчёта периодичности планового ТО планера ВС с учётом использования возможностей мониторинга технического состояния конструкции.**

**Актуальность** - в настоящее время все авиакомпании-эксплуатанты воздушных судов (ВС) стремятся к повышению эффективности их летно-технической эксплуатации при соблюдении заданного уровня безопасности полетов.. Такая цель является естественной в условиях высокой конкуренции на рынке авиаперевозок. Для оценки эффективности эксплуатации ВС используют универсальный критерий – стоимость летного часа эксплуатации ВС. Данный критерий учитывает основные затраты в процессе эксплуатации ВС и включает в себя расходы на владение ВС, аэронавигацию, аэропортовое обслуживание, горюче-смазочные материалы (ГСМ), летный экипаж, а также на техническое обслуживание (ТО) воздушного судна.

Выделяют основные способы снижения себестоимости лётного часа:

- эксплуатация ВС на расстояниях, близких к экономической дальности беспосадочного полета;
- модернизация парка ВС, приводящая к сокращению удельного расхода топлива и увеличению надежности;
- увеличение коэффициента использования коммерческой загрузки ВС;
- оптимизация системы технического обслуживания ВС [20].

При этом, расходы на ТО в структуре стоимости лётного часа составляют около 15-18% и зависят от эффективности действующей системы технического обслуживания ВС [1]. Данная работа посвящена разработке метода совершенствования программы технического обслуживания ВС.

Система технического обслуживания ВС (ТО ВС) - совокупность организационных мероприятий, документации, технического обслуживания и исполнителей, необходимых для поддержания качества изделий авиационной техники, входящих в эту систему [18]. Система ТО включает в себя:

1. Объекты ТО (авиационная техника);
2. Средства ТО;

3. Инженерно - технический персонал;
4. Программу ТО и другую документацию.

Рассмотрим оптимизацию Программы ТО как один из способов оптимизации системы ТО ВС. Программа ТО - документ, устанавливающий выбранные стратегии, количественные и качественные характеристики режимов ТО, допустимые при эксплуатации уровни повреждений, средства контроля и диагностики [21]. Программа ТО разрабатывается эксплуатантом ВС на основе Исходных Требований к плановому техническому обслуживанию (ИТПТО) и Исходных Данных к плановому техническому обслуживанию (ИДПТО). Программа ТО является составной частью Системы и состоит из следующих разделов:

5. Программа ТО функциональных систем ВС;
6. Программа ТО конструкции планера ВС;
7. Программа зонных осмотров;
- Программа защиты от молний/электромагнитных полей высокой интенсивности.

В данной работе рассматривается оптимизация Программы ТО конструкции планера ВС как одного из разделов Программы ТО. Данный раздел по объёму работ и их трудоёмкости сопоставим со всеми задачами по ТО всех функциональных систем самолёта. В программе ТО планера ВС приведено описание каждой задачи по контролю состояния конструкции: порог начала работ, интервал выполнения задачи, применимость и др. Требования к плановому ТО конструкции основаны на оценке особенностей конструкции планера, воздействия окружающей среды, влияющей на конструкцию, особенностях защитного покрытия конструкции, опыте эксплуатации аналогичной конструкции и результатах соответствующих испытаний.

В настоящее время основным (классическим) методом контроля технического состояния конструкции планера ВС является визуальный осмотр состояния конструкции. Данный метод имеет как ряд плюсов

(простота применения, отсутствие необходимости применения дорогостоящего оборудования), так и ряд минусов (большие временные затраты, возможность «пропуска» дефекта).

Перспективным методом контроля состояния планера ВС является применение методов мониторинга технического состояния конструкции планера ВС (Structure Health Monitoring, SHM). Данный метод основан на применении автоматизированной системы мониторинга технического состояния конструкции планера ВС (например, системы стационарных датчиков, основанных на технологиях неразрушающего контроля).

Актуальной проблемой на данный момент является отсутствие единого метода по формированию задач контроля состояния конструкции планера ВС с помощью методов мониторинга состояния конструкции планера ВС и расчёта периодичности их выполнения. Работы на данную тему проводились отечественными учёными Н.Н. Смирновым, А.А. Ицковичем, Ю.М. Чинючиным, Г.Н. Гипичем, В.С. Шапкиным, А.А. Кулешовым, С.С. Далецким, Е.Ю. Барзиловичем, О.М. Машошиным, а также такими зарубежными учеными, как Т.Д. Матесон (T.D. Matteson), Ф.С. Нолан (F.S. Nowlan). В данной работе предпринята попытка обобщить накопленный опыт оптимизации и совершенствования программ обслуживания планера ВС, объединив их в единый интегрированный метод.

**Объектом исследования** является Программа ТО планера ВС.

**Цель диссертационной работы** — разработка метода расчёта периодичности планового ТО планера ВС с учётом использования перспективных возможностей мониторинга технического состояния конструкции планера ВС путем установки встроенных датчиков контроля состояния планера ВС. Разработка данного метода позволит:

1. Сократить объемы выполнения задач ТО по контролю состояния конструкции планера ВС;
2. Изменить периодичность выполнения задач ТО;
3. Исключить некоторые задачи при плановом ТО;

4. Внести в Программу ТО планера ВС новые задачи по контролю состояния конструкции планера ВС, которые будут являться альтернативой классическим задачам по ТО планера ВС.

Достижение данной цели позволит оптимизировать Программу ТО в части выполнения задач по контролю состояния конструкции планера ВС, как следствие, снизить себестоимость лётного часа.

**Для достижения намеченной цели требуется решить следующие задачи:**

1) Проанализировать актуальную нормативную базу по формированию Программы ТО конструкции планера ВС;

2) Систематизировать перечень основных дефектов конструкции планера ВС;

3) Проанализировать существующие технологии, на которых основаны методы мониторинга состояния конструкции планера ВС;

4) Дать рекомендации по выбору метода мониторинга состояния конструкции с целью дальнейшего формирования задачи по ТО планера ВС на основе данного метода;

5) Сформировать теоретическую основу для возможности формирования задач по ТО конструкции планера ВС с помощью методов мониторинга состояния конструкции;

6) Показать практическую применимость разработанного интегрального метода на примере конкретных элементов конструкции планера ВС;

7) Показать возможности оптимизации Программы ТО планера ВС и снижения стоимости лётного часа вследствие этого.

**Методы исследования.** В работе использовались аналитические методы оценки эксплуатационных свойств конструкции, методы MSG-3 анализа, методы математической статистики и теории вероятностей, методы рейтинговой оценки.

**Научная новизна** состоит в следующем:

- Разработан интегрированный метод оптимизации задач планового ТО планера ВС с помощью методов мониторинга состояния конструкции планера ВС;

- На основе разработанной методики показана возможность расчёта периодичности для задач, основанных на методах мониторинга состояния конструкции планера ВС;

- Проведена технико-экономическая оценка эффективности внедрения данной методики.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что предложенный метод позволяет:

- Оптимизировать список задач по ТО конструкции планера ВС;
- Внедрять задачи, основанные на методах мониторинга состояния конструкции планера ВС, по ТО планера ВС в программу ТО ВС.
- Проводить выбор и корректировку периодичности выполнения внедрённых задач.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** рассматривается общая характеристика концепции ТО, место Программы ТО в данной концепции. Также проведён анализ действующей документации в области формирования Программы ТО. Показано место программы ТО планера ВС в Программе ТО ВС. На основе имеющихся данных рассмотрена возможность внедрения методов мониторинга конструкции планера ВС в программу ТО планера ВС и сформирована проблема отсутствия единой методики такого внедрения и расчёта периодичности ТО на основе данной методики.

**Во второй главе** описана концепция применения методов мониторинга состояния конструкции планера ВС. Описаны основные возможные повреждения конструкции планера ВС, которые должны диагностироваться методами мониторинга. Выделены основные методы мониторинга состояния конструкции и технологии, на которых они основаны, и приведены рекомендации по их оптимальному выбору.

При формировании ТО планера ВС все повреждения делятся на три вида:

- Повреждения от взаимодействия с окружающей средой (Environmental Damage, ED) - физическое снижение прочности изделия и его устойчивости к отказам в результате химического взаимодействия с климатическими агентами или с окружающей среды внешней средой;

- Случайные повреждения (Accidental Damage, AD) - физическая порча изделия, вследствие влияния среды, контакта или воздействия объекта, не являющегося частью самолёта, или вследствие ошибки специалиста при производстве, использовании самолёта по назначению или при техническом обслуживании.

- Усталостные повреждения (Fatigue damage, FD) – появление трещины или трещин вследствие циклического нагружения с их последующим распространением.

Также на возникновение повреждений конструкции планера ВС оказывает влияние материал изготовления того или иного конструктивного элемента. Выделяют две большие группы материалов, которые используются для изготовления конструктивных элементов: металлические материалы и композитные материалы.

**В работе рассмотрены следующие технологии, на которых основано применение методов мониторинга конструкции ВС:**

- Датчики, основанные на применении ультразвукового излучения;
- Датчики, основанные на принципе акустической эмиссии;
- Датчики, оценивающие деформацию конструкции.

Данный список не является полным и исчерпывающим. Однако датчики, основанные на данных технологиях, имеют на сегодняшний день наибольшую техническую проработанность и готовность к практическому применению. Выбор датчика должен основываться на следующих положениях:

- выдерживать заведомо большее количество эксплуатационных циклов, не ниже, чем контролируемые элементы. Для датчиков, не удовлетворяющих этому условию, должна быть разработана эффективная система резервирования;

- не приводить к заметному изменению целостности конструкции и не уменьшать её прочность, обеспечивая при этом заданные ресурсные характеристики контролируемых элементов конструкции;

- обеспечивать возможность ремонта и замены, утративших способность получать и передавать информацию элементов системы мониторинга;

- иметь минимальный объём и вес;

- иметь возможность дополнения и расширения системы контроля на тот случай, если дополнительные опасные с точки зрения прочности места будут обнаружены в эксплуатации.

Также важно отметить, что выбор технологии датчика зависит от материала конструкции, для контроля которой он будет применяться.

**В третьей главе** описана методика анализа конструкции планера ВС на основе MSG-3 анализа как наиболее популярного метода формирования Программы ТО ВС.

Основной целью MSG-3 анализа конструкции планера ВС является разработка мероприятий/задач для обеспечения поддержания лётной годности конструктивно-важных для ТО элементов конструкции.

Анализ конструкции выполняется для следующих конструктивных элементов:

1. Планера ВС, состоящего из крыла, фюзеляжа, оперения, включая входящие в него пилоны МСУ, закрылки, предкрылки, элероны, спойлеры, тормозные щитки, рули высоты и направления, пассажирские, служебные, грузовые двери, герметические люки, створки основных опор шасси и передней опоры шасси;

2. Стойки основных опор шасси и передней опоры шасси;



3. Маршевой силовой установки (МСУ).

**Анализ конструкции проводится выполнением нисходящих процедур, требующих принятия решений в следующей последовательности:**

1. Определение перечня конструктивно-важных элементов планера ВС и элементов прочей конструкции;
2. Категорирование конструктивно-важных элементов;
3. Определение устойчивости конструктивного элемента к повреждениям;
4. Анализ ограничения безопасного ресурса;
5. Анализ усталостных повреждений конструктивных элементов;
6. На основе пунктов 4 и 5 формирование списка ограничений лётной годности в части конструкции планера ВС;
7. Анализ повреждений конструкций планера ВС (металлическая конструкция);
8. Анализ повреждений конструкций планера ВС (неметаллическая конструкция);
9. Анализ Прочей конструкции;
10. Формирование списка задач по ТО планера ВС и объединённой программы ТО планера ВС на основе задач по ТО планера ВС.

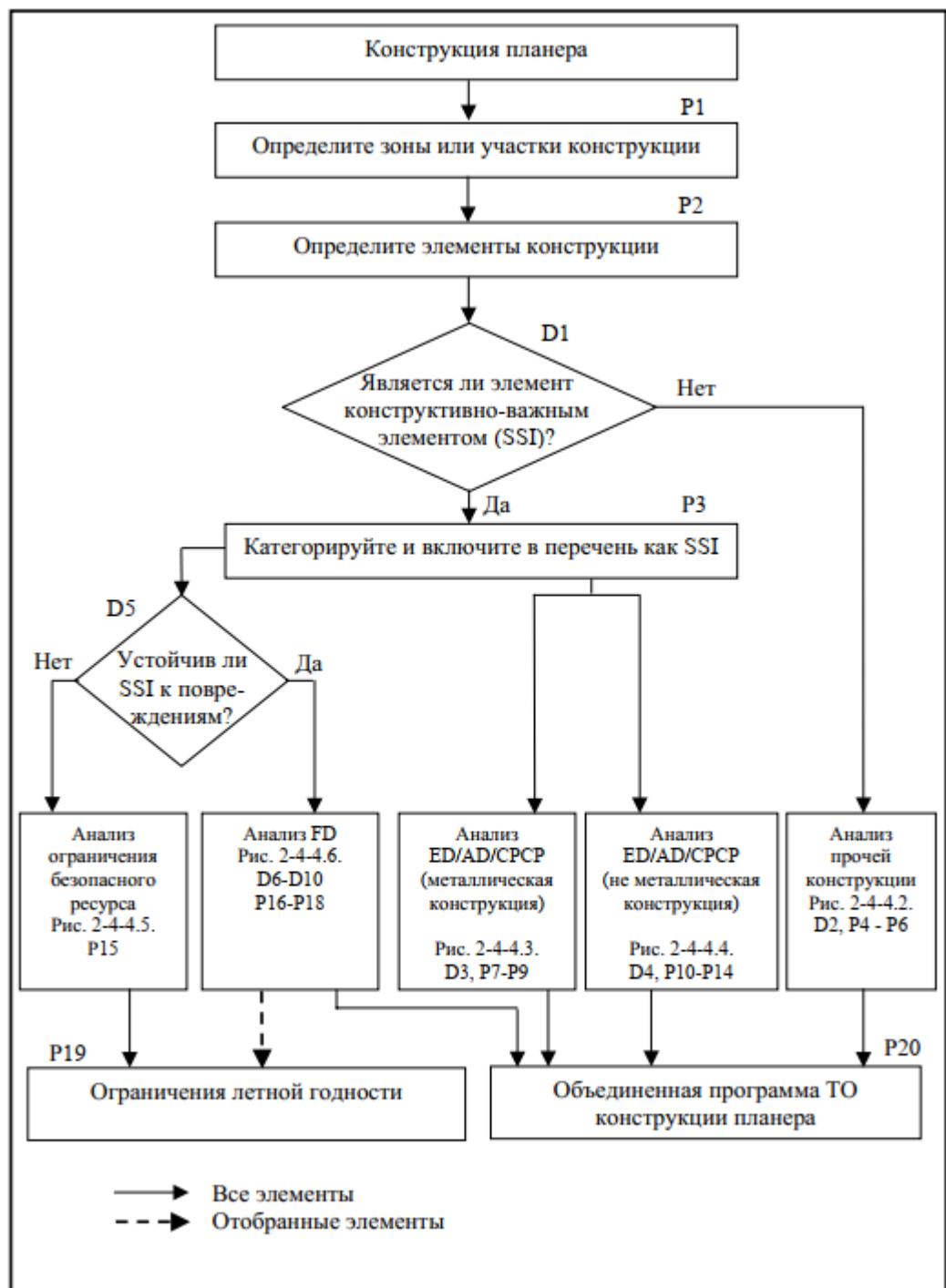


Рис.1. Схема MSG-3 анализа конструкции планера ВС.

Внедрение методов мониторинга состояния конструкции в существующую методику MSG-3 анализа основано на исследовании, примененное к оценке внедрения методов мониторинга состояния конструкции на самолетах типа Airbus A320. На данный момент оно

признаётся как наиболее готовое к практическому применению для конкретного типа ВС.

В рамках концепции использования метода мониторинга состояния конструкции как составной части Программы ТО планера ВС, идет речь о переходе на автоматизированные средства контроля, собирающие и передающие информацию в режиме реального времени. В то же время примеры реализации методов мониторинга состояния конструкции планера ВС на практике позволяют говорить о выполнении плановых задач на основе анализа данных либо о процедурах по получению и обработке данных мониторинга состояния конструкции в реальном времени для текущего контроля состояния конструкции.

В связи с этим, можно говорить о двойственной природе самой концепции технического обслуживания с использованием методов мониторинга состояния конструкции, или о необходимости некоего переходного процесса от одной концепции – «планового ТО», к новой концепции – «технического обслуживания по состоянию».

Нас сегодняшний день реализации технологий полностью автоматизированный контроль не обеспечивает необходимого уровня минимизации рисков, в связи с этим необходимо иметь два уровня задач, основанных на методах мониторинга состояния конструкции.

Первый уровень - это плановые задачи по считыванию параметров мониторинга состояния конструкции или Scheduled – SHM (S-SHM), которые обеспечивают контроль критических узлов конструкции в рамках Программы ТО планера ВС. Концепция подразумевает постепенную оптимизацию периодичности и состава задач программы ТО планера ВС на основе эксплуатационных данных и методов оптимизации ТО, построенных на оценке стоимости эксплуатации и рисков разрушения конструкции.

Второй уровень — это полностью автоматизированная работа датчиков мониторинга состояния конструкции или Automated (A-SHM). Такая работа не является составной частью программы ТО эксплуатанта. Работа в данном

режиме позволяет считывать информацию с датчиков реальном времени для текущего контроля состояния конструкции.

Подобный подход уже реализован в Руководящем документе IMRBPB Issue Paper 180 «Aircraft Health Monitoring (AHM) integration in MSG-3». Данный руководящий документ содержит схему внедрения в Программу ТО смежной технологии мониторинга состояния функциональных систем ВС. Также теоретическая диаграмма внедрения методов мониторинга состояния конструкции в MSG-3 анализ изложена в Руководящем документе IMRBPB Issue Paper 105 «Further advanced definition of Structural Health Monitoring (SHM)/Addition to MSG-3». Данная схема приведена ниже.

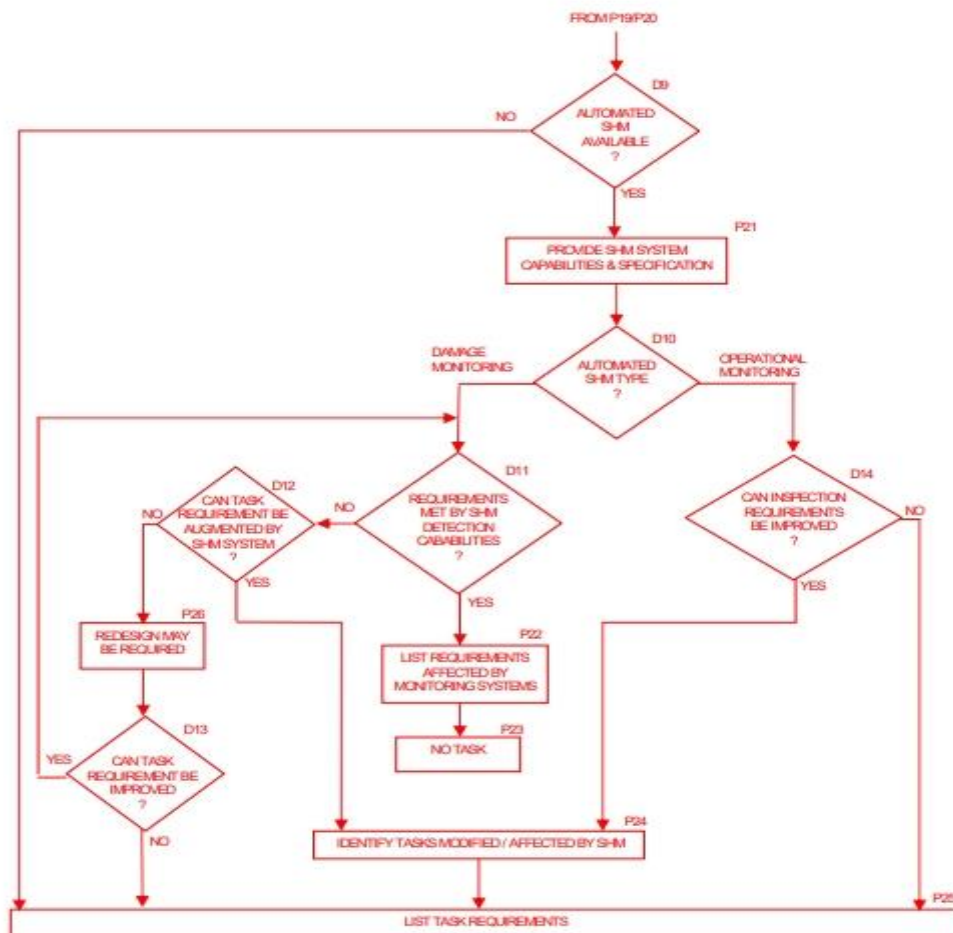


Рис. 2 Схема формирования итогового перечня программы ТО конструкции с учетом возможностей методов мониторинга состояния конструкции планера ВС.

Данная схема может быть использована как дополнение к уже имеющейся схеме анализа конструкции планера ВС на основе MSG-3 анализа. Рассмотрим основные положения данной схемы.

**В четвертой главе** рассмотрено практическое применение схемы MSG-3 анализа конструктивной схемы на примере главы ATA 53-70-00 ВС RRJ-95 Отсек 4. Результаты расчётов представлены в таблицах.

**В заключении** даётся оценка результатов выполненных исследований,

п  
о  
д  
т  
в  
е  
р  
д  
а  
ю  
щ  
и  
х

р  
е  
ш  
е  
н  
и  
е

п  
о  
с  
т