

На правах рукописи

Андреев Денис Валерьевич



**Методика проектирования отечественных транспортных
вертолётов с учетом стоимости жизненного цикла
и обеспечения безопасности полёта**

Специальность: 05.07.02

«Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Артамонов Борис Лейзерович** - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры 102 «Проектирование вертолетов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты: **Буряк Юрий Иванович** - доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), начальник подразделения.

Цесарский Лев Гершенович - кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Объединенная авиастроительная корпорация - центр комплексирования» (ООО «ОАК - Центр комплексирования»), заместитель начальника отдела.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации» (ФГУП «ГосНИИ ГА»)

Защита состоится 26 ноября 2019 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.10
кандидат технических наук, доцент  Денискина Антонина Робертовна

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время парк отечественных вертолётов эксплуатируется по стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) по ресурсу. Основным недостатком такого метода является большая трудоемкость обслуживания, а так же высокая стоимость капитальных ремонтов (КР). Однако, как показывает практика эксплуатации отечественных транспортных вертолётов, некоторые работы планового технического обслуживания (ТО) можно сократить, а при КР выполнять замену только тех агрегатов, состояние которых по результатам диагностики не соответствует заданным параметрам.

Актуальность темы

Стратегия развития отечественного вертолётостроения требует решения ряда задач:

1. Снижение себестоимости эксплуатации вертолётов.
2. Повышение уровня безопасности полётов вертолётов.
3. Повышение уровня готовности вертолётов к вылету.
4. Повышение конкурентоспособности вертолётов отечественной разработки на мировом рынке.
5. Обеспечение стабильной загрузки производственных мощностей серийных и ремонтных вертолётных заводов.
6. Расширение рынков сбыта.

Одной из основных задач в деятельности любого предприятия является снижение себестоимости выпускаемой продукции. Предлагаемый подход к проектированию и переход на ТОиР по состоянию позволят создавать конструкции вертолётов, отвечающие требуемому уровню безопасности полётов, снизить себестоимость эксплуатации и сократить трудоемкость выполнения плановых работ.

Степень проработанности темы

Классический подход к проектированию воздушного судна (ВС) дополняется методологией, которая использует методы интегрированной логистической поддержки, изложенные в трудах Судова Е.В. Для определения стратегии ТОиР, выбора оптимального состава работ используются труды Смирнова Н.Н., Ицковича

А.А., Жмеренецкого В.Ф., Полуляха К.Д., Акбашева О.Ф., Гипича Г.Н. и др., описывающие теоретические наработки в области ТОиР авиационной техники. При анализе отказобезопасности, расчетах стоимости жизненного цикла (ЖЦ) вертолёт применялись современные международные стандарты, методики и руководства.

Для оценки текущего уровня надёжности конструкции вертолёт и достигнутого уровня безопасности полётов использовались статистические данные по безопасности полётов отечественных вертолёт. При написании работы использовались и анализировались тенденции развития отечественного и зарубежного вертолётостроения, анализировались научные работы в этой области, в том числе и зарубежные.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются гражданские транспортные вертолёт отечественного производства. Предметом исследования являются части ЖЦ вертолёт – этапы разработки и эксплуатации.

Цель работы

Цель работы - разработка методики проектирования отечественных транспортных вертолёт с учетом стоимости жизненного цикла и обеспечения безопасности полёт.

Работа направлена на изменение существующей методологии проектирования вертолёт и разработки концепции формирования плана их ТОиР. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ уровня безопасности полётов и достигнутых показателей надёжности парка отечественных транспортных вертолёт, находящихся в эксплуатации.
2. Провести количественный анализ существующей модели технической эксплуатации вертолёт и оценить трудоемкость выполнения оперативных и регламентных форм обслуживания.
3. Провести оценку отказобезопасности функциональных систем вертолёт на стадии проектирования.

4. Применить концепцию «приемлемого риска» на этапе проектирования вертолѐта и при формировании плана ТОиР.

5. Разработать программу ТОиР вертолѐта на основе стратегии технической эксплуатации «по состоянию».

6. Оценить экономическую эффективность перехода на предлагаемую систему ТОиР вертолѐта.

7. Разработать концепцию внедрения технологии интегрированной логистической поддержки (ИЛП) в практику отечественного вертолѐтостроения на различных этапах ЖЦ ВС.

При решении поставленных задач в качестве основного ограничения принято сохранение уровня безопасности полѐтов гражданских вертолѐтов по показателю K_{100000} - коэффициента числа катастроф на сто тысяч часов налета.

Научная новизна работы

В практике отечественного вертолѐтостроения:

1. Применена концепция «приемлемого риска» для этапов разработки и эксплуатации вертолѐта.

2. Применен анализ отказобезопасности, совмещенный с теорией рисков, который используется для подтверждения соответствия вертолѐтов требованиям норм лѐтной годности.

3. Установлена алгоритмическая связь между уровнем надёжности функциональных систем и конечной стоимостью ЖЦ вертолѐта.

4. Для вновь созданных вертолѐтов Ми-171А2 и Ми-38-2 разработаны:

- программа технического обслуживания и ремонта для модели технической эксплуатации «по состоянию»;

- структура информационной базы данных единой для разработчика, изготовителя и эксплуатанта для мониторинга технического состояния;

- модель взаимодействия пользователей базы данных из различных организаций.

5. Расчетным путем показана экономическая эффективность перехода на новую концепцию проектирования и разработки программ ТОиР вертолѐтов.

Теоретическая значимость работы

1. Применяемая концепция «приемлемого риска» и анализ отказобезопасности функциональных систем вертолѐта позволяют:

- научно обосновать переход от постулата «абсолютной безопасности» («нулевого» риска) к принципам «приемлемой безопасности»,
- оценить на этапе проектирования по критерию безопасности полѐтов недостатки в конструкции вертолѐта,
- дать количественную оценку экономической эффективности применения технической эксплуатации вертолѐта по состоянию.

2. Разработан единый алгоритм выбора метода технической эксплуатации для любых комплектующих изделий, входящих в состав вертолѐта.

3. Использование технологий ИЛП позволяет создать единое для разработчика, производителя и эксплуатанта информационное поле, являющееся основой для практического применения полученных данных при разработке новых и модернизации имеющихся типов вертолѐтов.

Практическая значимость работы

1. Стратегия технической эксплуатации «по состоянию» приведет к снижению трудоемкости ТОиР, а следовательно, и стоимости владения вертолѐтом.

2. Применение концепция «приемлемого риска» не приведет к снижению уровня безопасности полѐтов созданных и вновь проектируемых вертолѐтов.

3. Системный подход к процессу проектирования вертолѐта позволит сократить срок разработки новых вертолѐтов за счет сокращения периода доводки ВС и переналадки оборудования на производстве.

4. Снижение стоимости эксплуатации отечественных вертолѐтов повысит их конкурентоспособность на мировом рынке.

Методология и методы исследования

В работе применяются следующие методологические подходы:

1. Концепция «приемлемого риска». Закладывается в основу проектирования конструкции вертолѐта, оптимальной по критерию обеспечения безопасности полѐтов и отказоустойчивости его функциональных систем и агрегатов.

2. Принципы системного инжиниринга. Используются при планировании работ по проектированию вертолѐта.

3. Технологии ИЛП. Используются при формировании информационной базы эксплуатируемых вертолѐтов и поиска оптимальной системы технической эксплуатации.

Методы исследования:

1. Анализ отказобезопасности. Применяется в процессе проверки систем вертолѐта на соответствие требованиям безопасности на этапе разработки.

2. Расчет периодичности обслуживания. Проводится по современным отечественным стандартам планирования ТОиР и стандарту MSG-3.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа безопасности полѐтов гражданских вертолѐтов марки «МИ» по результатам их эксплуатации.

2. Результаты анализа отказобезопасности бортовых систем контроля вертолѐтов на различных этапах проектирования.

3. Способы применения концепции «приемлемого риска» на различных этапах жизненного цикла вертолѐта.

4. Алгоритм выбора метода технической эксплуатации систем и агрегатов вертолѐта

5. План мероприятий (дорожная карта) перехода на предлагаемую модель технической эксплуатации «по состоянию» для вертолѐтов:

- с упрощенными бортовыми системами контроля (Ми-8АМТ/Ми-8МТВ);
- с высокоинтегрированными бортовыми системами (Ми-171А2 и Ми-38-2).

6. Результаты сравнительного анализа стоимости жизненного цикла вертолѐтов при существующей и предлагаемой стратегии их технической эксплуатации.

7. Структура и состав информационной базы данных вертолѐта Ми-171А2.

Степень достоверности и апробация результатов

1. Разработанная стратегия эксплуатации ТОиР «по состоянию», основанная на концепции «приемлемого риска», опробованна в АО «ЮТэйр-Инжиниринг»

при эксплуатации вертолѐта Ми-171А2 №22880 в период с декабря 2018 г. по август 2019 г. Налѐт вертолѐта за подконтрольный период составил более 300 час. Отказов систем и агрегатов, эксплуатируемых «по состоянию», не отмечено.

2. Разработанная единая информационная база данных вертолѐта Ми-171А2 внедрена на предприятиях холдинга «Вертолѐты России» и в АО «ЮТэйр-Инжиниринг». Сервер базы данных установлен в АО «МВЗ им. М.Л. Миля» (пос.Томилино, Московская область), к ней в режиме «он-лайн» подключен АО «У-УАЗ» (г.Улан-Удэ, республика Бурятия). Третьим участником ЖЦ вертолѐта является эксплуатирующая организация в лице АО «ЮТэйр-Вертолѐтные Услуги» (г.Тобольск) и АО «ЮТэйр-Инжиниринг» (г.Тюмень). Пополнение базы данных АО «МВЗ им. М.Л. Миля» осуществляется путем передачи обменных файлов, содержащих информацию о ходе эксплуатации вертолѐтов, в эксплуатирующей организации.

3. При разработке вертолѐта Ми-171А3 применен процесс оценки безопасности систем на ранней стадии проектирования. На основании результатов предварительной оценки отказобезопасности сформированы требования к вновь разрабатываемой составной части вертолѐта. Эти требования включены в техническое задание на разработку изделия.

Структура и объем диссертации

Диссертация объемом 153 страницы состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемых источников из 104 наименований и одного приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится описание существующей проблематики в области проектирования и эксплуатации вертолѐтной техники отечественного производства, выявлена актуальность темы исследования. Проанализированы и даны ссылки на имеющиеся информационные источники в предметной области. Выбраны предмет и объект исследования. Определены и сформулированы цель работы, а также перечень задач, которые необходимо решить для достижения цели. Обоснована научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость.

Выбраны методология и методы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

В первой главе рассматриваются различные методы технической эксплуатации ВС гражданской авиации и направления их совершенствования. Проведен анализ безопасности полётов гражданских вертолётов отечественного производства. Описаны основные недостатки существующей модели эксплуатации, проведен обзор работ в области создания и оптимизации моделей ЖЦ авиационной техники. На основании проведенного анализа поставлены задачи исследования.

Анализ надёжности и безопасности полётов вертолётов гражданской авиации проводился на примере парка вертолётов типа Ми-8 и Ми-8АМТ/Ми-8МТВ. Критерием оценки уровня безопасности полётов выбран коэффициент K_{100000} , определяющий число катастроф на 100000 часов налета ВС. Анализ и систематизация причин авиационных происшествий показывает, что по причине отказов авиационной техники происходят 63% инцидентов и 15% катастроф (рис. 1-2). Сделан вывод о несовершенстве принятого подхода к анализу безопасности полётов и предложен переход на концепцию «приемлемого риска».

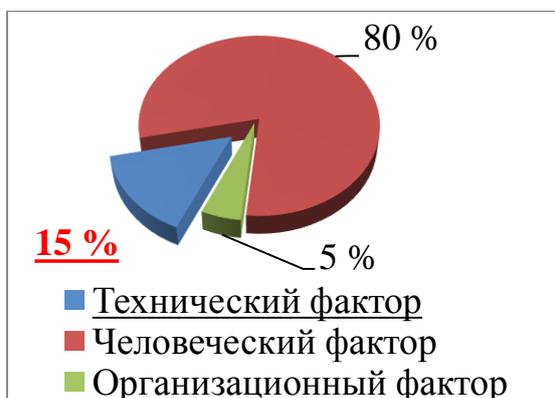


Рис. 1 – Причины авиационных катастроф



Рис. 2 – Факторы авиационных инцидентов

Проведенный расчет уровня надёжности (безотказности) вертолётов семейства Ми-8 показал, что нормируемый показатель среднего налёта на отказ и повреждений T_C в несколько раз превышает заданный уровень.

$$T_C = \frac{T_i}{m_i} \quad (1)$$

где T_i – суммарный налёт парка вертолётов за рассматриваемый период,
 m_i – количество отказов, выявленных за рассматриваемый период.

На рис. 3 для вертолётов «Ми» показано распределение по годам относительного показателя налета на отказ \overline{T}_C

$$\overline{T}_C = \frac{T_C}{T_C^{\text{НОРМ}}} \quad (2)$$

где значение нормированного показателя $T_C^{\text{НОРМ}}$ определяется в соответствии с нормами надёжности и задается в технических условиях на изделие. Линия аппроксимации описана экспоненциальной функцией и показывает тренд распределения показателя \overline{T}_C по годам. Тренд увеличения \overline{T}_C носит постоянный характер, что соответствует нормальному закону распределению отказов.

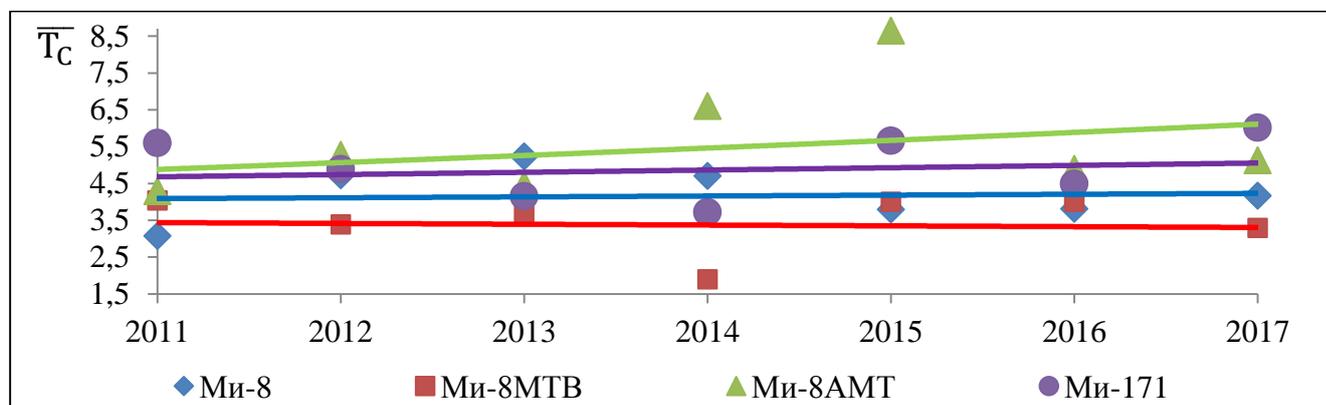


Рис. 3 - Распределение показателя \overline{T}_C по годам

На примере вертолётов гражданской авиации в России проанализированы модели эксплуатации и их составляющие, даны понятия о стратегиях обслуживания и ремонта. Применение разных стратегий технической эксплуатации определяется совершенством конструкции ВС, заложенными в нее эксплуатационно-техническими характеристиками и прилагаемой к ней эксплуатационной и ремонтной документации.

Существует три системы эксплуатации:

1. ТЭР – техническая эксплуатация по ресурсу;
2. ТЭП – техническая эксплуатация до предотказного состояния;
3. ТЭО – техническая эксплуатация до безопасного отказа.

Вертолётам отечественного производства документацией определена система эксплуатации по ТЭР. При этом стандартизированы две стратегии ТОиР: «по наработке» и «по состоянию». Для стратегии «по состоянию» перечень и периодичность выполнения операций определяются фактическим техническим состоянием изделия в момент начала технического обслуживания. Анализ показал, что наиболее эффективной является стратегия технической эксплуатации «по состоянию». Максимальная эффективность возможна при применении бортовых систем контроля. В работе проведен сравнительный анализ функциональных возможностей бортовых систем контроля отечественных и зарубежных вертолётов. Сравнение показало, что отечественные системы ничем не уступают зарубежным аналогам.

Для стратегии эксплуатации «по состоянию» наличие бортовых систем является одной из необходимостью, однако оборудование вертолёта такой системой не обеспечит эффективность стратегии в полной мере. Для этого необходимо на этапе проектирования помимо разработки конструкции ВС разрабатывать и оптимизировать план ТОиР.

В работе проанализирована структура стоимости ЖЦ вертолёта (рис. 4). Анализ показал, что половина стоимости приходится на этап эксплуатации, иными словами, это затраты на владение ВС.

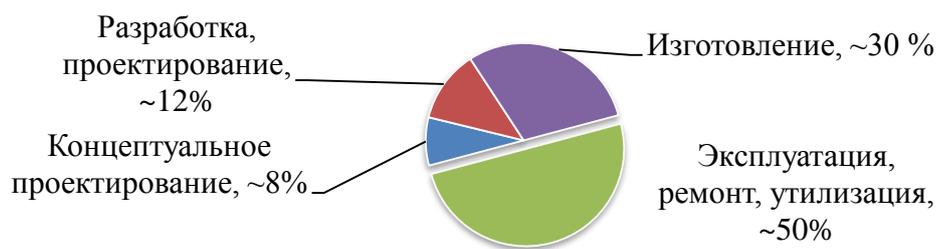


Рис. 4 - Структура стоимости жизненного цикла ВС

Анализируя отечественные и зарубежные научные работ в области создания и оптимизации моделей ЖЦ авиационной техники, можно оценить степень проработанности тех или иных организационных элементов, регламентирующих процесс ЖЦ АТ. Выяснилось, что ни одна из них не описывает и не решает проблематику проектирования ВС, направленную на снижение стоимости ЖЦ АТ при наличии ограничений по безопасности полётов.

Исходя из проведенного анализа поставлена задача разработки методики проектирования транспортных вертолётов с учетом стоимости их ЖЦ и обеспечения безопасности полёта. Эта методика предполагает переход к концепции ТОиР «по состоянию» и возможна только при решении комплекса технических и организационных задач.

Во второй главе рассмотрены научно-методические основы оценки и прогнозирования надёжности ВС и формирования плана их ТОиР.

По статистике ежегодно до 80% авиационных инцидентов и от 12% до 25% авиакатастроф происходят из-за отказов техники. Обеспечение безопасности полётов является одной из важнейших проблем современной авиации. В настоящей работе в качестве критерия оценки степени безопасности эксплуатации используется понятие «риск», распространяемое на функционирование сложного технического объекта.

В настоящее время подход к понятию «риск» происходит как к неизменному, статистическому параметру. Предлагается отойти от принципа «абсолютной безопасности» («нулевого» риска) и постепенно перейти к принципам «приемлемой безопасности». Концепция «приемлемого риска» позволит минимизировать технические риски на всех этапах ЖЦ ВС – от этапа разработки до этапа эксплуатации серийных машин.

Для этого в качестве критерия оценки надёжности конструкции системы или ВС в целом примем показатель технического риска. Он характеризует вероятность аварии или катастрофы, произошедшей по техническим причинам, и вычисляется по формуле

$$TR = \frac{K+A}{B}, \quad (3)$$

где K – количество катастроф, A – количество аварий, B – количество ВС (систем), находившихся в эксплуатации за рассматриваемый период.

Частью концепции «приемлемого риска» являются методы управления рисками. Это процессы, связанные с идентификацией, анализом рисков и принятием решений, обеспечивающих максимизацию положительных и минимизацию отрицательных последствий наступления рискованных событий.

Управление рисками включает в себя разработку обоснованных рекомендаций и реализацию мероприятий, направленных на уменьшение исходного уровня риска до приемлемого финального уровня. Приемлемый уровень риска достигается путём выработки мероприятий, нейтрализующих последствия отказов, которые были выявлены по результатам исследований последствий неисправности ВС или систем, а также при выявлении скрытых отказов при эксплуатации ВС. Процесс управления рисками начинается с ранних этапов разработки ВС и продолжается на всех этапах его ЖЦ.

Предлагаемый метод снижения уровня риска при эксплуатации ВС основан на анализе отказов систем ВС и степени их влияния на безопасность полёта. Это позволяет выработать обоснованные решения по безопасной эксплуатации ВС в полёте и на земле и дает возможность эксплуатантам ВС обеспечить управление приемлемым уровнем безопасности полётов.

Для количественной оценки уровня риска используется численный показатель λ - интенсивность возникновения особой ситуации, определяющий степень опасности последствий проявления отказа, определяемый тяжестью последствий проявлений отказа (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация особых ситуаций

Особая ситуация		Допустимая оценка возникновения ОС	
Наименование	Обозначение	Качественная	Количественная
Катастрофическая ситуация	КС	Практически невероятное	$\lambda \leq 10^{-9}$
Аварийная ситуация	АС	Крайне маловероятные	$\lambda \leq 10^{-7}$
Сложная ситуация	СС	Маловероятные	$\lambda \leq 10^{-5}$
Усложнение условий полёта	УУП	Вероятные	$\lambda \leq 10^{-3}$
Ситуация без последствий	БП	Требования не предъявляются	

Критерием экспертной оценки при назначении степени опасности того или иного отказа является анализ последствий его проявления по ряду признаков (таблица 2).

Таблица 2 - Классификация последствий отказных состояний

Классификация ОС	Последствия отказа		
	для ВС	для экипажа	для пассажиров
КС	Потеря управляемости или разрушение элементов конструкции	Смертельная травма, жертвы	Смертельная травма, жертвы
АС	Опасное уменьшение функциональных возможностей или запасов безопасности	Чрезмерное увеличение нагрузки, снижающее способность выполнения задач	Серьезные травмы
СС	Значительное уменьшение функциональных возможностей или запасов безопасности	Заметное увеличение нагрузки или физический дискомфорт	Физическое недомогание, возможные травмы
УУП	Незначительное уменьшение функциональных возможностей или запасов безопасности	Незначительное увеличение нагрузки	Физический дискомфорт
БП	Отсутствие влияния на эксплуатационные характеристики	Отсутствие последствий	Неудобство

Разработан алгоритм оценки и управления рисками (рис. 5).

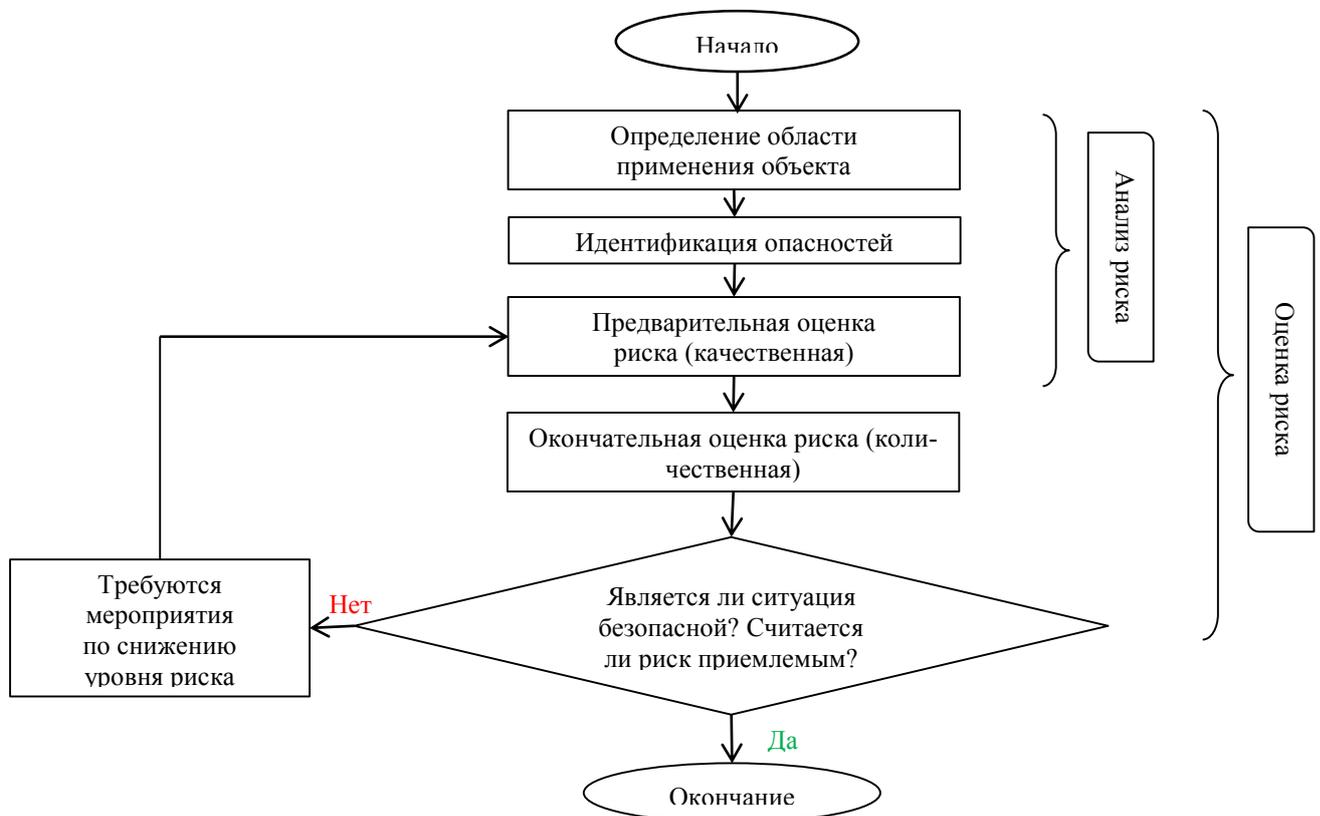


Рис. 5. – Блок-схема оценки и управления рисками

Для идентификации рисков используется анализ отказобезопасности. Степень влияния риска проецируется на матрицу рисков, после чего оценивается рискоустойчивость и определяется приемлемость риска. Для прогнозирования риска применяется формула:

$$R = P \times S, \quad (4)$$

где R – численный показатель уровня риска, P – индекс частоты (вероятности) проявления ОС, S – индекс степени опасности ОС.

Таблица 3 – Матрица индексов риска

Степень опасности ОС		БП	УУП	СС	АС	КС
Индексы риска		Серьезность риска				
<i>Частота проявления ОС</i>		1	2	3	4	5
Практически невероятная	1	1	2	3	4	
Крайне маловероятная	2	2	4	6	8	1
Малая вероятность	3	3	6	9	12	1
Редкая (вероятная)	4	4	8	12	16	20
Частая	5		1	1	20	

Таблица 4 – Индексы риска

Зона риска		Индексы риска	Приемлемость уровня риска
Недопустимая зона		10-25 (баллов)	Недопустимо при существующих обстоятельствах
Допустимая зона		5-9 (баллов)	Допустимо на основании снижения рисков
Приемлемая зона		0-4 (баллов)	Приемлемо

В работе описана методика проведения процесса анализа отказобезопасности и на примере разработки системы индикации оборотов несущего винта рассмотрено ее применение.

Рассмотрим основные этапы процесса анализа отказобезопасности. Он начинается с оценки функциональной опасности (*FHA - Function Hazard Assessment*), на котором оцениваются функции изделия с целью выявления потенциальных отказов и проводится классификация опасностей, связанных с последствиями проявления

отказного состояния. Следующим этапом при проектировании системы или ВС является этап «бюджетирования». Этот процесс заключается в распределении «бюджета» надежности по функциям, выполняемым системами, на основании последствий отказов, определённых в оценке безопасности и соответствующих им уровней риска.

Для оценки правильности выбранной архитектуры и состава проектируемой системы проводится предварительная оценка безопасности системы (*PSSA - Preliminary System Safety Assessment*). Целью проверки является ответ на вопрос, будут ли при реализации предполагаемой архитектуры соблюдены цели по безопасности, установленные на этапе оценки функциональной опасности (*FHA*).

Для численных расчетов при проведении *PSSA* используют методы анализа логической схемы, анализа дерева неисправности (*FTA - Fault Tree Analysis*), анализа цепей Маркова, анализа видов и последствий отказов. Заключительным этапом проверки конечной конструкции проектируемой системы служит оценка безопасности системы (*SSA - System Safety Assessment*).

После того, как будут спроектированы все системы вертолётa, проведены оценка их безопасности и анализ общих причин уровня системы, приступают к оценке безопасности вертолётa (*ASA – Aircraft Safety Assessment*) и анализу общих причин отказов уровня вертолётa. Анализ общих причин отказов (*CCA - Common Casual Analysis*) выявляет наличие независимости функций систем или элементов и показывает отсутствие в спроектированных системах общих причин отказа, которые могли бы привести к катастрофическим и аварийным последствиям.

Проводимый анализ по отказобезопасности и включенный в него процесс управления рисками позволяет уже на ранних этапах создания архитектуры системы предвидеть влияние возможных отказов систем и изделий на ВС, оценить последствия отказов и внести корректирующие действия по пересмотру разрабатываемой конструкции. Расчеты могут проводиться как ручным способом с применением стандартного программного обеспечения (ПО), так и в специализированном ПО. Специализированное ПО имеет ряд преимуществ, одним из наиболее важных

является наличие справочников по надёжности изделий и агрегатов, а также возможность производить взаимоувязку полученных результатов.

Опыт сертификации вертолётов Ми-38 и Ми-171А2 показал, что для эффективного применения ПО для расчета надёжности и анализа отказобезопасности оно должно отвечать ряду требований. В АО «МВЗ им.М.Л.Миля» сформирован перечень требований, предъявляемых к ПО, и проведен сравнительный анализ трех программных продуктов: *ПТК «ФАНАТ»* (внутренняя разработка ПАО «Ил» и ОАО «ПРОГРАММПРОМ», Россия); *RAM Commander* (разработка компании ALD, Израиль); *MADe* (разработка компании *PHM Technologies*, Австралия). По результатам сравнения сделаны следующие выводы:

1. ПО *MADe* не отвечает большинству предъявляемых требований;
2. ПО *ПТК «ФАНАТ»* и *RAM Commander* наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым авиационными властями РФ (сертификационными центрами) к анализу отказобезопасности;
3. По совокупности всех трех оценочных методов наилучшим является программное обеспечение *RAM Commander*.

Результаты анализа отказобезопасности используются при формировании плана технического обслуживания и ремонта воздушных судов.

Конструирование ВС и разработка СТЭ тесно связаны. Выбор оптимальных конструкторских решений можно описать схемой (рис. 6.). Модель проектирования ВС и формирования плана его ТОиР должна заключаться в поиске оптимальных конструкторских решений, способных обеспечить наивыгоднейшую модель обслуживания в ожидаемых условиях эксплуатации.

При формировании программы ТОиР уделяют внимание следующим вопросам: ожидаемым условиям эксплуатации (ОУЭ); эксплуатационно-техническим характеристикам ВС как объекта ТОиР; плану ТОиР ВС; материально-техническому обеспечению ТОиР; информационному обеспечению ТОиР; эффективности программы ТОиР.

Перечень ОУЭ ВС создается на этапе его проектирования с целью определения граничных параметров в пределах, в которых должно оцениваться соответствие вертолёта требованиям авиационных правил.

Проведена работа по анализу данных расшифровки бортовых самописцев, предоставленными 10 организациями, эксплуатирующими вертолёты типа Ми-8.

Анализ данных показывает, что:

- почти 78% полётов происходит на высотах до 1000 м;
- средняя продолжительность полётов составляет 65,1 мин. (рис. 8);
- более 40% полётов производятся со взлетной массой вертолета 11-12 т.

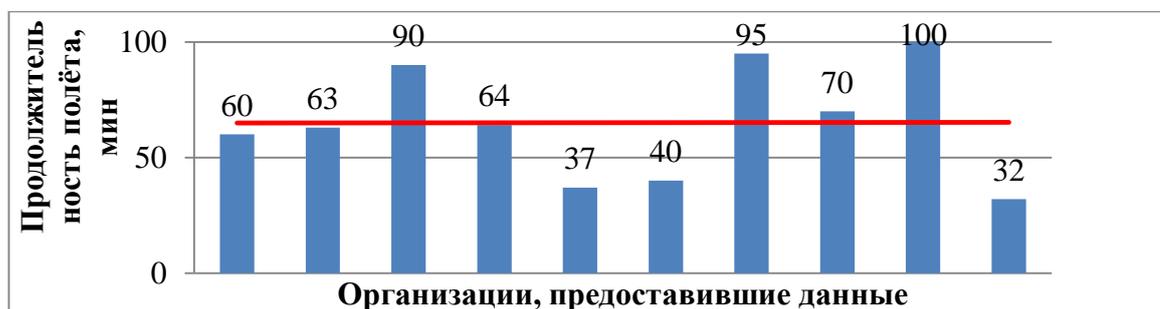


Рис. 8 - Повторяемость полётных операций вертолётов типа Ми-8 по средней продолжительности полётов

Исходя из анализа повторяемости условий эксплуатации сформирована таблица типового полёта вертолёта с разделением его по этапам. Продолжительность типового полёта принята равной 1 час. Таблица типового полёта используется в анализе последствий отказов при проведении анализа отказобезопасности.

В третьей главе представлена методика формирования плана ТОиР отечественной вертолётной техники гражданского назначения.

Важным элементом в формировании современного плана ТОиР является учет данных бортовых систем контроля. Так, например, автоматизация переноса и учета информации об изменении наработки ВС в электронный формуляр (электронное

дело изделия) позволит сократить время его заполнения и уберет ошибку «человеческого фактора» при переносе данных.

На вертолётe Ми-171А2 система СОКД-171М, имеющая в своем составе 16 датчиков вибрации, 7 комбинированных датчиков измерения вибрации и температуры, 2 датчика вращения, а также датчики систем из состава оборудования вертолётa, принимает и регистрирует 107 параметров и сигналов, 52 бинарных сигнала, 36 высокочастотных параметра. Система принимает информацию о: дате начала и окончания полётa; продолжительности полётa; количестве посадок; режимах работы двигателя и их наработке. Обработка данных, полученных по результатам контроля, дает сведения о текущем техническом состоянии агрегатов и систем вертолётa, которые используются в системе ТЭ по «состоянию».

Формирование системы ТЭ на этапе проектирования ВС ведется параллельно с разработкой его конструкции. Задачи по выбору оптимальной системы ТЭ и формированию периодичности работ по ТОиР предлагается решать с помощью анализа отказобезопасности на основе оценки рисков. Он включает в себя два ключевых фактора: определение и классификация тяжести последствий отказных состояний ВС, его систем и оборудования, и выбор перечня работ по ТОиР. Исходными данными для анализа отказобезопасности являются ОУЭ и типовая конструкция ВС, которая определяет перечень систем и агрегатов, логическую и функциональную взаимосвязь между ними. Определяется перечень функциональных отказов и описывается их влияние на ВС и его экипаж в ОУЭ.

Процесс выбора метода ТЭ ВС, функциональной системы и её элементов представляет собой сочетание качественного анализа видов и последствий отказов с их количественной оценкой. Для каждого агрегата и комплектующего изделия (КИ) по алгоритму, приведенному на рис. 9, выбирается метод эксплуатации.

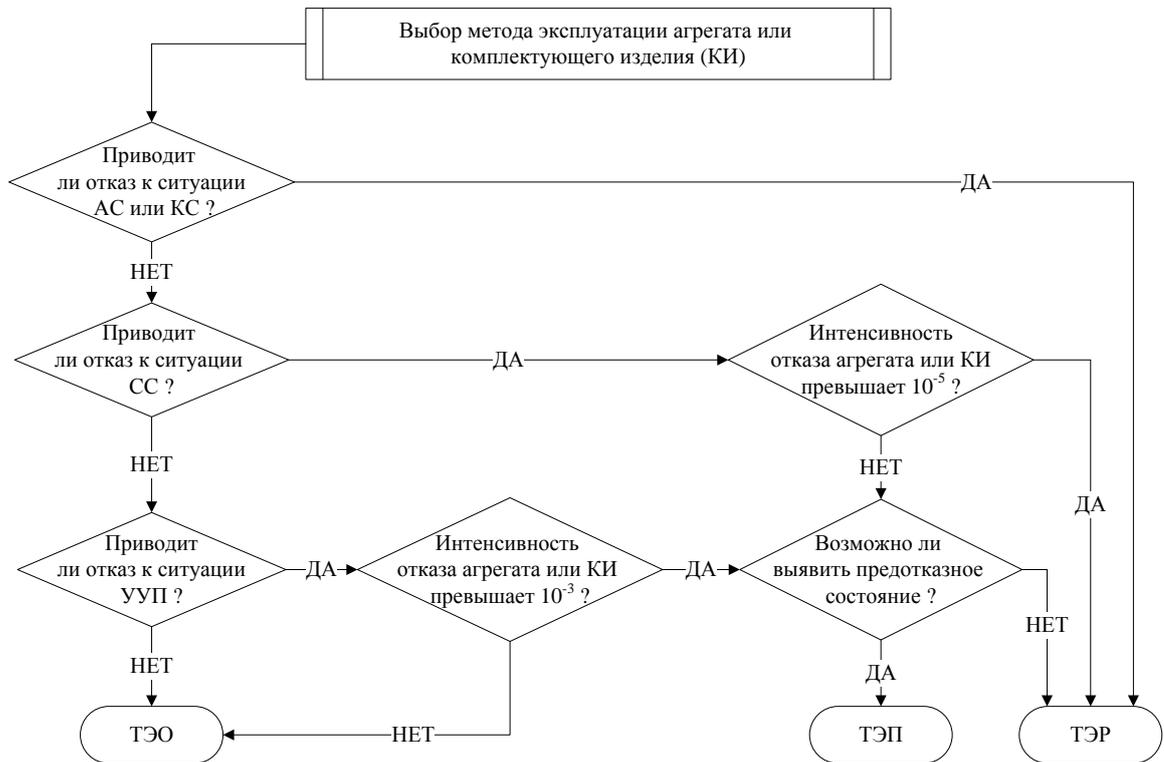


Рис. 9 - Алгоритм выбора метода ТЭ ВС

Для вертолётов Ми-171А2 и Ми-38-2 проанализированы агрегаты и КИ входящие соответственно в 28 и 27 функциональных систем. По результатам анализа отказобезопасности сформированы перечни агрегатов с соответствующими методами ТЭ. Анализ показывает, что из всего перечня систем и агрегатов рассматриваемых вертолётов:

- не меньше 5% агрегатов должны эксплуатироваться по ТЭР,
- до 25% агрегатов возможно эксплуатировать по ТЭП,
- не более 70% можно эксплуатировать по ТЭО.

Основой технической эксплуатации «по состоянию» является максимальное использование запасов работоспособности конструкции и комплектующих изделий вертолёта. Снижение эксплуатационных затрат при переводе вертолётов на ТЭС обеспечивается:

1. Заменой дорогостоящих и трудоемких плановых заводских (капитальных и средних) ремонтов вертолёта и его комплектующих в целом другим видом периодических работ – контрольно-восстановительными работами.

2. Сокращением потребных объемов обменных фондов запасных частей в связи с отменой назначенных ресурсов и сроков службы изделий.

3. Уменьшением трудоемкости ТОиР вследствие формирования их рациональных режимов при внедрении методов ТЭС.

Оперативный цикл ТО представляет собой систему подготовительных работ, осмотров, проверок технического состояния вертолѐта, обеспечивающих исправность, готовность и использование вертолѐта в интервалах между очередными работами по периодическому ТО (регламентными работами). Он проводится на стоянке вертолѐта, обеспечивая непосредственное использование вертолѐта по назначению, и включает в себя:

- предварительные (вспомогательные) работы;
- работы по осмотру, обслуживанию и контролю технического состояния;
- работы по обеспечению вылета или стоянки вертолѐта.

Выполненный расчет суммарной трудоемкости оперативных видов ТО вертолѐта в типовой день для типового полѐта при существующей (таблица 5) и предлагаемой (таблица 6) стратегии эксплуатации показал, что предлагаемая стратегия позволит снизить суммарную трудоемкость на 19,12%: с 10,51 чел-час до 8,5 чел-час.

Таблица 5 – Типовое применение вертолѐта при существующих видах оперативных работ

Вид работы	ТО	Полѐт1	ТО	Полѐт2	ТО	Сумма
ВС			0,42		0,42	2
ОС					0,72	1
ОВ			2,13			1
ОВ ₁	3,1					1
А ₁			1,86		1,86	2
А ₂						-
Т, чел-час	3,1	0	4,41	0	3	10,51
Время полѐта, час						

Таблица 6 – Типовое применение вертолѐта при предлагаемых видах оперативных работ

Вид работы	ТО	Полѐт1	ТО	Полѐт2	ТО	Сумма
ПП						1
ПпП						1
ПсП						1
Т, чел-час						8,5
Время полѐта, час						

Переход на эксплуатацию «по состоянию» предполагает выполнение следующих условий:

1. Большинство элементов планера и функциональных систем эксплуатируется до безопасного отказа.

2. Определяются перечни элементов планера и функциональных систем, отказы (неисправности) которых влияют на безопасность полёта. Они требуют повышенного контроля при ТО, при этом годность к летной эксплуатации определяется их техническим состоянием.

3. Уточняются перечни агрегатов и комплектующих изделий систем, которые эксплуатируются «по ресурсу». Предусматривается отстранение их от эксплуатации при достижении определенной наработки или срока службы для последующего ремонта или списания.

4. Предлагается отказаться от терминов «межремонтный ресурс» и «межремонтный срок службы» для планера вертолётa и части агрегатов вертолётных систем с выполнением капитального ремонта.

5. Предлагается заменить капитальный ремонт контрольно-восстановительными работами (КВР), выполняемыми в эксплуатации на сертифицированных сервисных центрах или центрах послепродажного обслуживания. Работы проводить через каждые 3000 часов наработки вертолётa по документации разработчика. Форма предусматривает выполнение комплекса работ по оценке и поддержанию ТС вертолётa и его систем, замене агрегатов эксплуатируемых «по ресурсу» или продление их ресурсов (сроков службы).

6. Предлагается предусмотреть введение в регламент ТО вертолётa «основной» формы ТО с периодичностью выполнения через каждые 1500 часов наработки вертолётa. Работы по форме предусматривают углубленный контроль технического состояния вертолётa и его систем, замену агрегатов, эксплуатируемых «по ресурсу» или продление их ресурсов (сроков службы).

В последующем в регламенте ТО следует предусмотреть, в зависимости от наработки вертолётa (срока службы), добавление дополнительных работ в формы

КВР по оценке технического состояния узлов и агрегатов, а также замены элементов функциональных систем по результатам анализа их надёжности. Эффективность применяемой стратегии предлагается оценивать через расчет стоимости ЖЦ.

Затраты на техническую эксплуатацию являются значимой составной частью общих затрат на сопровождение ЖЦ. Величина этих затрат является весомой эксплуатационно-технической характеристикой ВС, определяющей его конкурентоспособность.

В работе предложен алгоритм расчета стоимости ЖЦ, представляющий собой калькуляцию ежегодных затрат за весь период эксплуатации ВС.

$$C_{\text{жц}}(t_k) = C_{\text{вт}}(t_k) + C_{\text{озс}}(t_k) + C_{\text{утс}}(t_k) + C_{\text{э}}(t_k) + C_{\text{кр}}(t_k) + C_{\text{ут}}(t_k), \quad (5)$$

где $C_{\text{вт}}(t_k)$ – стоимость ВС;

$C_{\text{озс}}(t_k)$ – стоимость средств эксплуатации, обслуживания и ремонта (СНО, здания, сооружения, коммуникации), приведенные к одному изделию;

$C_{\text{утс}}(t_k)$ – стоимость средств обучения и тренировки персонала, приведённая к одному изделию;

$C_{\text{э}}(t_k)$ – затраты на эксплуатацию вертолёт, включающие затраты на содержание персонала, запасные части, расходные материалы, необходимые в процессе собственно эксплуатации, технического обслуживания и внеплановых ремонтов (восстановления) и т.п.;

$C_{\text{кр}}(t_k)$ – затраты на капитальный ремонт;

$C_{\text{ут}}(t_k)$ – затраты на утилизацию вертолёт (за вычетом его остаточной стоимости);

t_k – период эксплуатации ВС

$$t_k = \sum_{i=1}^k t_i \quad (6)$$

где: i – текущий год периода эксплуатации, изменяющийся в диапазоне $1 < i < k$;

k – последний год периода эксплуатации.

Все составляющие стоимости ЖЦ, входящие в (5), пересчитываются для каждого года эксплуатации i с учетом коэффициента дискотирования.

Результатирующий график сравнения стоимости ЖЦ представлен на рис. 10.

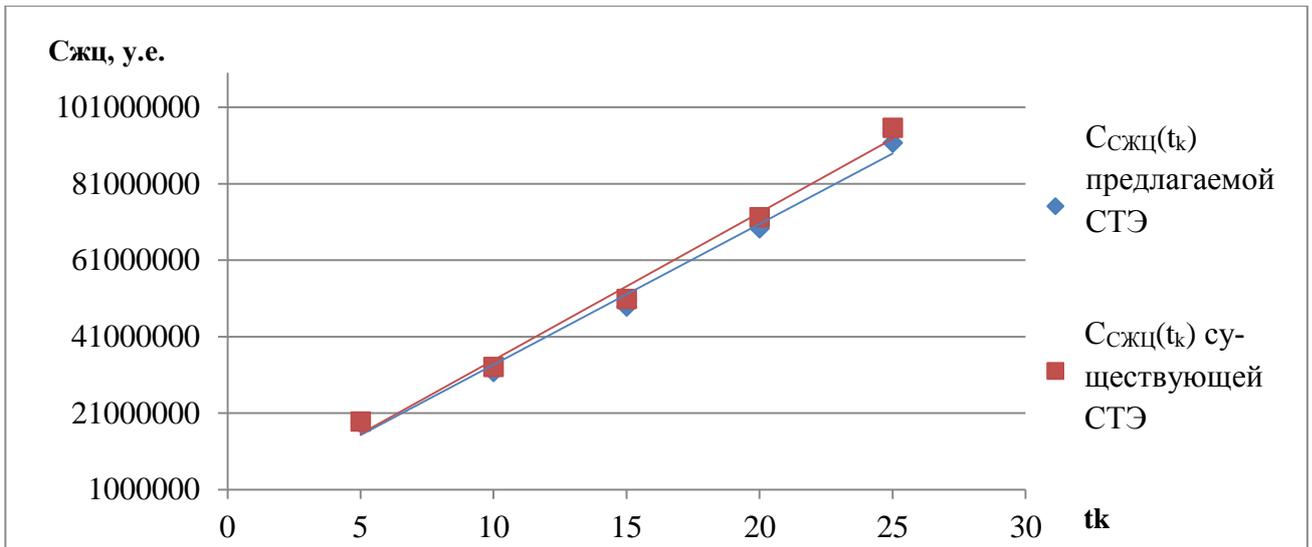


Рис. 10 – Сравнение стоимости ЖЦ для разных стратегий ТЭ

Анализируя график видно, что при одинаковой начальной стоимости ЖЦ, равной стоимости вертолёта, с течением времени стратегия эксплуатации «по состоянию» дает преимущество относительно стратегии эксплуатации «по ресурсу». Наиболее весомые составляющие стоимости ЖЦ представлены на рис. 11-12.

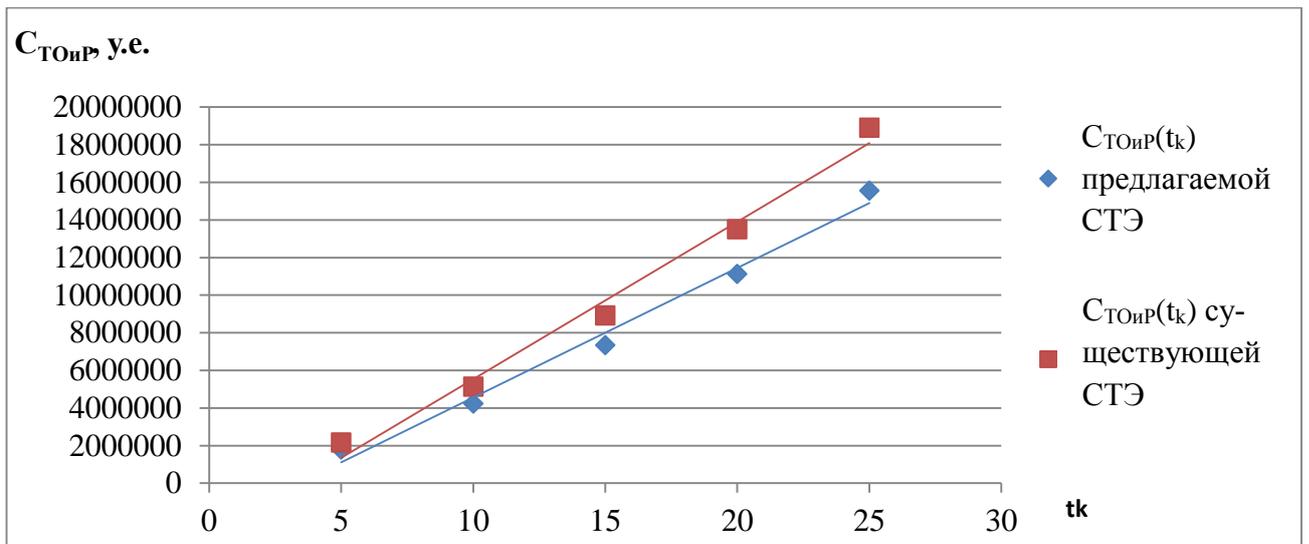


Рис. 11 – Сравнение затрат на ТОиР для разных стратегий ТЭ

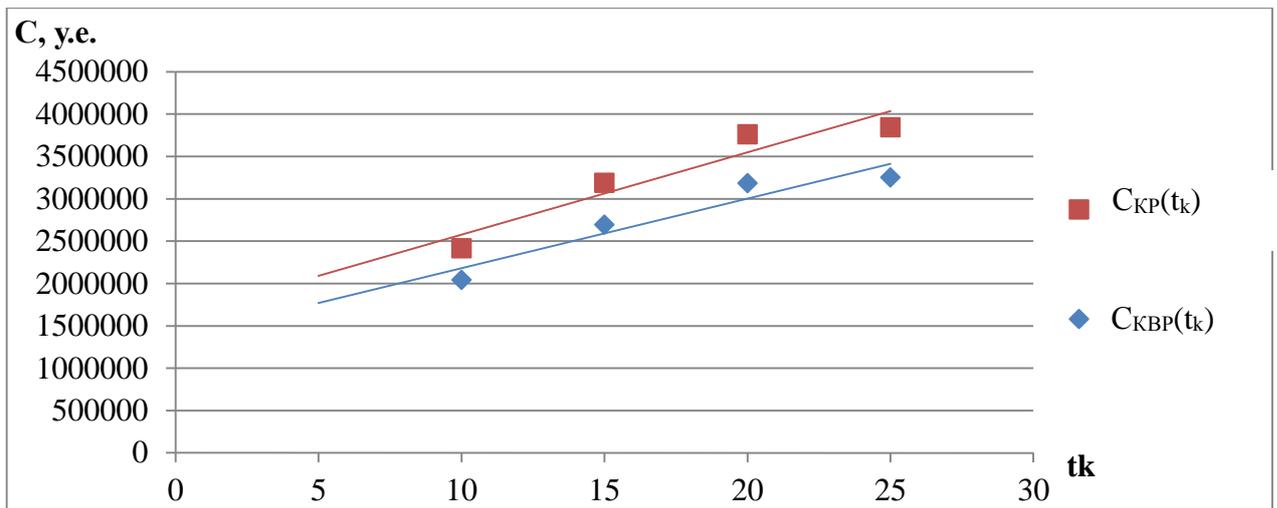


Рис. 12 – Стоимость затрат на КР и КВР

Расчеты показывают, что внедрение предлагаемой стратегии ТЭ для вертолёта типа Ми-171А2 позволит сократить стоимость ЖЦ на 4,1%, при этом:

- на 17 % снизится стоимость ТОиР;
- на 15 % снизятся затраты на КР (за счет введения КВР).

Такое преимущество возникает за счет снижения трудоемкостей обслуживания при оперативных видах подготовки и снижения количества заменяемых агрегатов при КВР.

В четвертой главе описана взаимосвязь различных этапов жизненного цикла воздушного судна при внедрении новой концепции ТОиР.

Совокупность видов деятельности, осуществляемой головным разработчиком изделия совместно с другими участниками ЖЦ, направленной на формирование системы его ТЭ, обеспечивающей эффективное использование изделия при приемлемой стоимости его ЖЦ, называется интегрированной логистической поддержкой (ИЛП).

Системообразующей частью ИЛП является анализ логистической поддержки (АЛП). С его помощью осуществляется взаимоувязка требований к различным видам деятельности ИЛП, оказывается влияние на проектирование ВС и его систем. По своей сути АЛП представляет из себя базу данных (БД).

БД описывает состав вертолёта в виде логистической структуры в иерархическом порядке. Исходная БД содержит свойства компонентов, регламент обслуживания вертолёта и технологические карты. Далее БД наполняется сведениями из

эксплуатации. Внедрение единых БД необходимо для создания общего информационного поля, как единственного источника для сбора информации о ВС и последующей аналитической ее обработки.

Модель взаимодействия и обмена информацией между участниками ЖЦ вертолёт в единой информационной БД представлена на рис. 13. Рассмотрен обмен данными между тремя участниками ЖЦ – разработчиком ВС, заводом-изготовителем и эксплуатантом ВС (обозначены красными линиями).

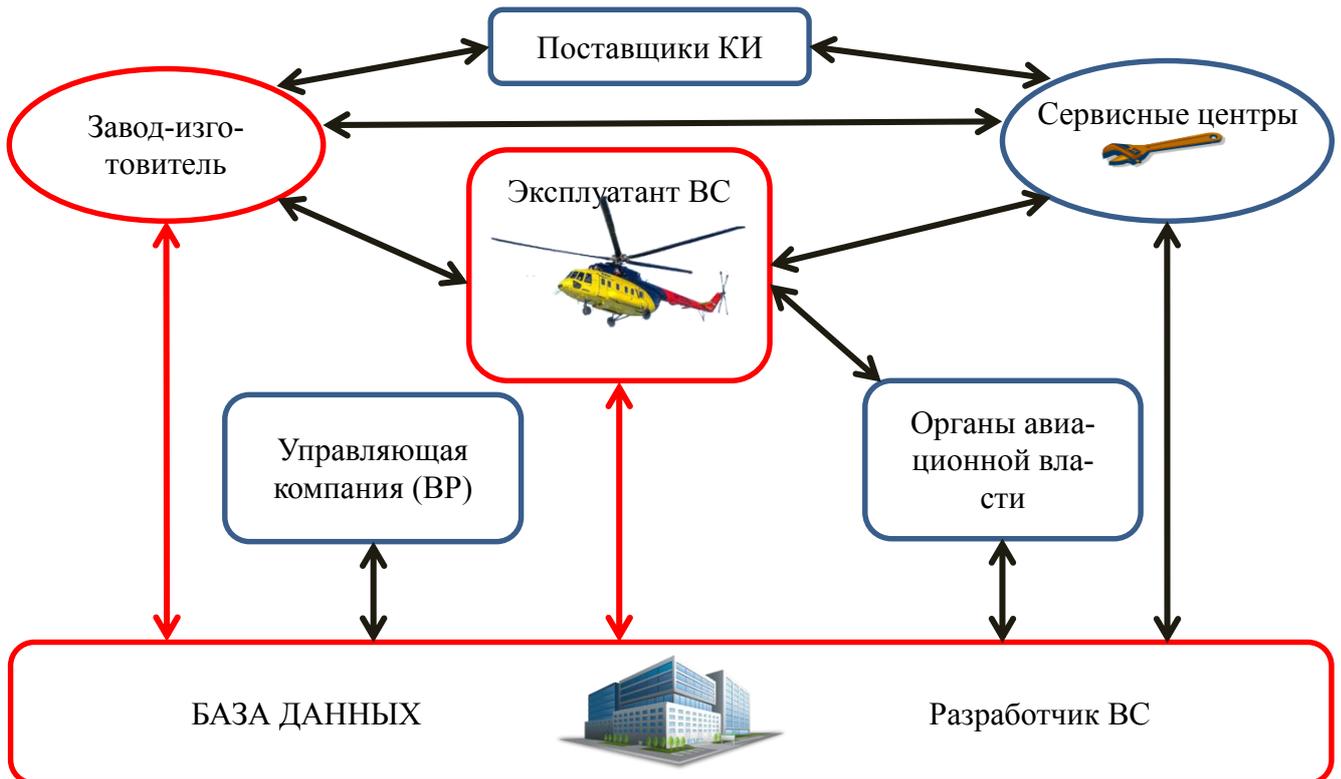


Рис. 13 – Схема взаимодействия участников ЖЦ в единой информационной БД
В АО «МВЗ им. М.Л.Миля» БД создавалась в программном комплексе *ILS Suite*. Проведены следующие работы:

1. Создана логистическая структура вертолёт типа Ми-171А2, являющаяся электронным формуляром.
2. В БД внесён план ТОиР. К каждому виду работ прикреплена имеющаяся документация (сборник технологических карт).
3. Составлен и внесён в БД справочник поставщиков КИ, перечень СНО, КПА и МТО.
4. Силами АО «У-УАЗ» типовой состав логистической структуры пере-

веден в экземплярный путем внесения паспортных номеров агрегатов и КИ вертолёта, внесена информации о ресурсах и сроках службы установленных КИ и агрегатов.

5. Силами АО «ЮТэйр-Инжиниринг» заполняются карты полётов, вводится информация об отказах и работах, проведенных на вертолёте.

При внедрении результатов работы реализована модель организации серверного пространства БД программы *ILS Suite* и подключения к ней пользователей для совместной работы (рис. 14).

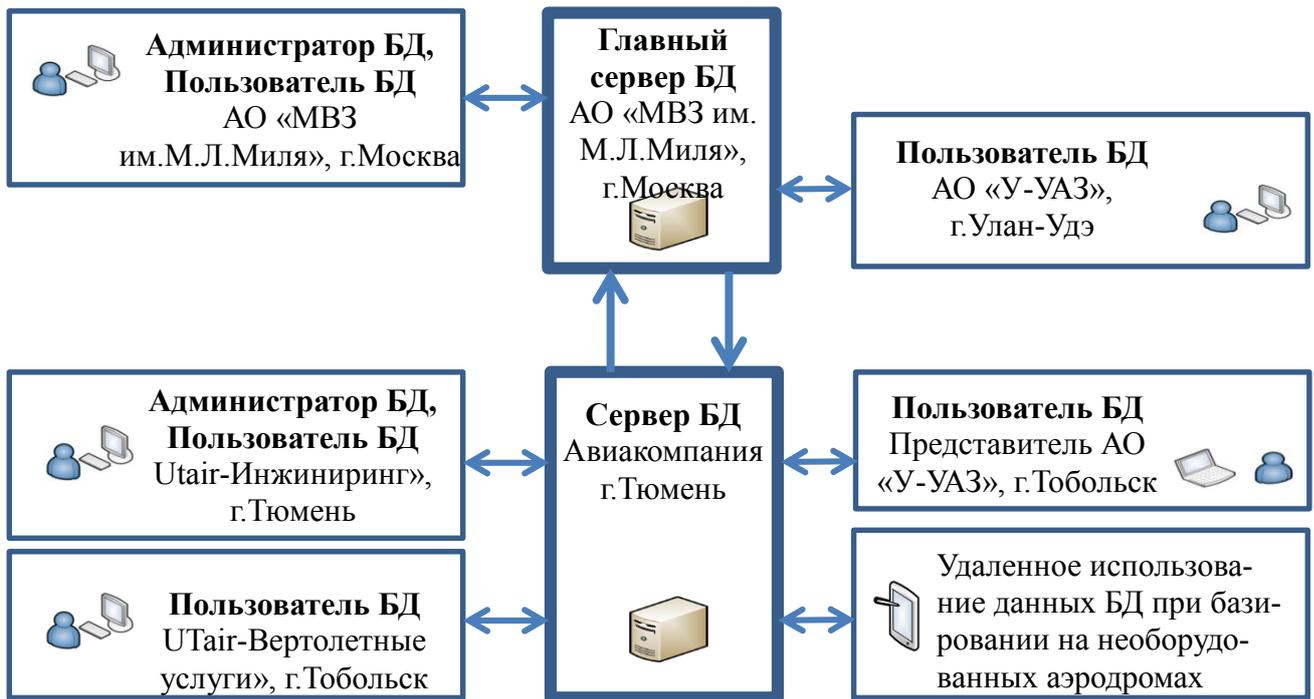
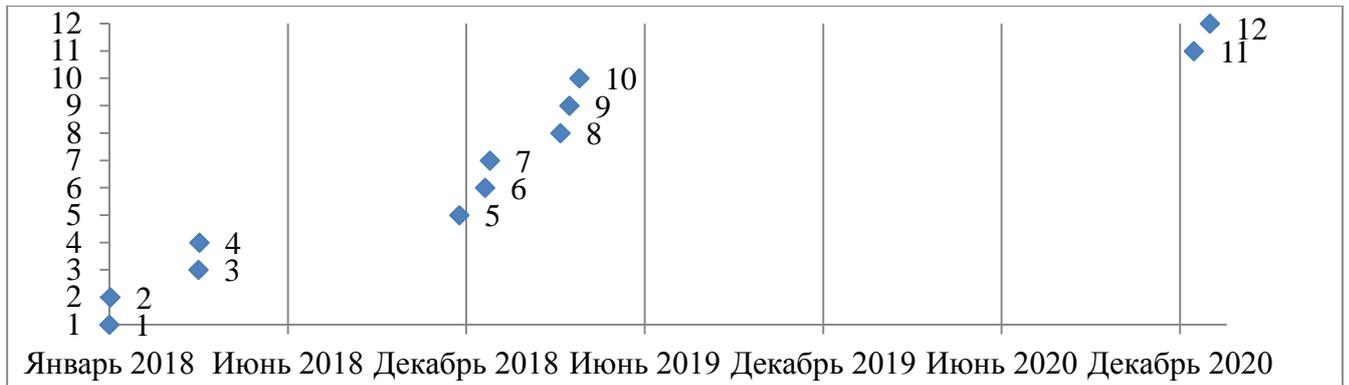


Рис. 14 – Схема организации серверного пространства единой БД

На примере вертолёта Ми-171А2 составлена дорожная карта внедрения единой БД (рис. 15). Опыт внедрения показал, что из-за большого массива вносимых данных работы по наполнению БД должны начинаться заблаговременно до её передачи в эксплуатирующую организацию.



Точка	Период		Выполняемая работа
	от	до	
1	Январь 2018	-	Установка ПО
2-3	Январь 2018	Апрель 2018	Период тестирования
4-5	Апрель 2018	Декабрь 2018	Период формирования справочников, создание логистической структуры вертолѐта
6	Январь 2019	-	Передача прав АО "У-УАЗ" на заполнение БД
7-8	Январь 2019	Апрель 2019	Период формирования экземплярного состава вертолѐта
9	Апрель 2019	-	Передача БД в АО "Ютэйр"
10-11	Апрель 2019	Декабрь 2019	Сбор, учет и анализ данных из эксплуатации
12	Январь 2021	-	Отчетная документация о результатах тестирования ILS Suite в качестве электронного формуляра

Рис. 15 – Дорожная карта внедрения единой БД для вертолѐта Ми-171А2

В настоящее время введенная в базу данных информация используется для: мониторинга исправности парка; отслеживания движения КИ, агрегатов и вертолѐта в эксплуатации; учета выполнения бюллетеней; расчета параметров МТО; учета отказов и повреждений, расчет показателей надёжности; учета и анализа происшествий, внесения информации о рекомендациях комиссии по расследованию авиационных происшествий в адрес разработчика и учета их выполнения; автоматизации рекламационной работы для представителей гарантийных бригад и формирование сводной отчетности по качеству.

В работе рассмотрено применение анализа отказобезопасности и элементов ИЛП для следующих этапов разработки ВС и его систем: техническое предложение (аванпроект), эскизный проект, технический проект, рабочее проектирование, из-

готовление опытного образца, испытания, сертификация. Они реализуются в процессе разработки проекта вертолета Ми-171 АЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика проектирования отечественных транспортных вертолётов с учетом стоимости жизненного цикла и обеспечения безопасности полёта.

Решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ уровня безопасности полётов и достигнутых показателей надёжности парка отечественных транспортных вертолётов, находящихся в эксплуатации. Показатели надёжности и безопасности полётов отечественных транспортных вертолётов не ухудшаются, что позволяет внедрять более экономичные системы технического обслуживания.

2. Проведен анализ существующей модели технической эксплуатации вертолётов. Анализ показал, что существующая модель технической эксплуатации морально устарела. Проведенная оценка перечня оперативных и регламентных работ выявила высокую трудоемкость их выполнения. Это приводит к увеличению затрат на содержание вертолётов.

3. Применена концепция «приемлемого риска», которая позволяет прогнозировать и оценивать безопасность эксплуатации вертолета на этапе его проектирования при формировании плана ТОиР до его запуска в серийное производство и передачи потребителю.

4. Проведена оценка отказобезопасности функциональных систем вертолёта на стадии проектирования. Анализ отказобезопасности, совмещенный с концепцией приемлемого риска, позволил выявить аналитическим путем имеющиеся недостатки в конструкции и получить исходные данные для проведения наземных и лётных испытаний.

5. Разработана программа технического обслуживания вертолёта на основе стратегии технической эксплуатации «по состоянию». Составлен и применен алгоритм выбора метода технической эксплуатации вертолёта с применением концеп-

ции «приемлемого риска», что позволило обосновать вид и периодичность технического обслуживания при применении стратегии «по состоянию».

6. Проведена оценка экономической эффективности перехода на предлагаемую систему технической эксплуатации вертолёта. Переход на частичную техническую эксплуатацию «по состоянию» позволит снизить трудоемкость ТО на 30% и на 25% сократить расходы на эксплуатацию вертолёта.

7. Разработана концепция внедрения технологии ИЛП в практику отечественного вертолётостроения на различные этапы жизненного цикла ВС. Наиболее проработанной частью внедрения технологий ИЛП является созданная БД, единая для разработчика, производителя и эксплуатанта ВС. Она позволяет отслеживать состояние ВС на этапе эксплуатации, накапливать и анализировать информацию по стоимости эксплуатации, отслеживать ресурсы, остаточные сроки службы, а также оценивать достигнутые показатели надёжности ВС, находящихся в эксплуатации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

1. Андреев Д.В. Анализ и контроль уровней технических рисков на различных этапах жизненного цикла вертолётов - Труды МАИ №101, 2018.
2. Андреев Д.В. Стратегия технического обслуживания вертолёта - Научный вестник ГосНИИ ГА №22 (333), 2018.

В других изданиях

3. Андреев Д.В. Разработка стратегии технического обслуживания и ремонта вертолёта «по фактическому состоянию» - Сборник тезисов 15-ой международной конференции «Авиация и космонавтика», МАИ, 14 – 18 ноября 2016 г.
4. Андреев Д.В. Анализ и контроль уровней рисков при эксплуатации вертолётов в рамках системы технического обслуживания и ремонта по состоянию - Сборник тезисов 16-ой международной конференции «Авиация и космонавтика», 20 – 24 ноября 2017 г.
5. Андреев Д.В. Обзор и статистика по надёжности и безопасности полётов вертолётов АО «МВЗ им. М.Л.Миля». Система организации сбора информации о надёжности. Анализ и контроль уровней рисков при эксплуатации вертолётов в рамках

системы технического обслуживания и ремонта по состоянию - Двенадцатый форум Российского вертолетного общества (РосВО), МАИ, 30 ноября 2017 г.

6. Андреев Д.В. Анализ и контроль уровней технических рисков при эксплуатации вертолётов в рамках системы технического обслуживания и ремонта по состоянию - Сборник докладов «XXXXVII Всероссийский симпозиум по механике и процессам управления», Челябинская обл., г. Миасс, 19 - 21 декабря 2017 г.

7. Андреев Д.В. Анализ и контроль уровней рисков при эксплуатации вертолётов - Летно-техническая конференция по эксплуатации вертолётов в АП РФ, АО «ЮТэйр-Инжиниринг», г.Тюмень. 16-17 марта 2017 г.

8. Андреев Д.В. Обзор и статистика по надёжности и безопасности полётов вертолётов АО «МВЗ им. М.Л.Миля». Система организации сбора информации о надёжности - Научно-практическая конференция по качеству и надёжности авиационной техники на базе АО «У-УАЗ» » с участием предприятий - поставщиков ПКИ, г.Улан-Удэ, 8-9 ноября 2017 г.

9. Андреев Д.В. О предоставлении информации из эксплуатирующих организаций о надёжности авиационной техники - Конференция межведомственной рабочей группы на базе НИЦ (г. Люберцы) ФГБУ «ЦНИИ ВВС» МО РФ, 06 декабря 2017

10. Андреев Д.В. Показатели надёжности вертолёта типа Ми-26. Предложения по системе организации сбора информации о надёжности - Конференция по эксплуатации, качеству и надёжности вертолётов производства ПАО «Роствертол», на базе ПАО «Роствертол», 09-11 октября 2018 г.

11. Андреев Д.В. Показатели надёжности вертолётов типа Ми-8 Предложения по организации сбора информации о надёжности - Конференция по качеству и надёжности авиационной техники с участием предприятий-поставщиков ПКИ на базе АО «У-УАЗ», 21-22 ноября 2018 г.