

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)**

*На правах рукописи*

**ТОИРОВ ИЛХОМ САФАРОВИЧ**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДДЕРЖАНИЯ ЛЕТНОЙ  
ГОДНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Научная специальность 2.9.6. – Аэронавигация и эксплуатация  
авиационной техники

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
к.т.н., доцент Самуленков Юрий Иванович

МОСКВА –2026

## Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Анализ состояния вопроса и постановка задачи исследования.....</b>	<b>14</b>
1.1. Современное состояние беспилотной авиации.....	14
1.2. Анализ нормативно-правовой базы по обеспечению и ПЛГ БАС.....	19
1.2.1. Процедуры ПЛГ ВС и безопасности полётов.....	24
1.2.2. База данных директив лётной годности.....	26
1.3. Особенности существующей системы эксплуатации БАС и её функционирование в Республике Таджикистан.....	27
1.4. Влияние квалификации авиационного персонала на процессы обеспечения и ПЛГ БАС.....	31
1.5. Постановка задачи исследования.....	33
1.6. Выводы по первой главе.....	38
<b>Глава 2. Разработка информационной модели процессов лётной годности беспилотных авиационных систем.....</b>	<b>39</b>
2.1 Разработка информационно-управляющей системы ПЛГ БАС.....	39
2.2 Процедуры ПЛГ ВС и безопасности полётов.....	42
2.3 Информационные технологии, используемые в управлении процессами жизненного цикла АТ и документационном обеспечении.....	43
2.4 Разработка информационной базы данных обеспечения и ПЛГ беспилотных авиационных систем. Описание базы данных.....	46
2.5 Выводы по второй главе.....	69
<b>Глава 3. Разработка методики оценки эффективности системы ТЭ БАС на основе интегральной математической модели.....</b>	<b>70</b>
3.1 Выбор и обоснование показателей эффективности системы ТЭ БАС.....	70
3.2 Моделирование системы ТЭ БАС.....	77
3.3 Математическая модель системы ТЭ парка БВС при выполнении авиационной организацией задач лётной деятельности.....	79
3.4 Применение методов факторного и регрессионного анализа для комплексного исследования эффективности системы ТЭ парка БВС.....	87

3.5 Оценка достоверности и исследование свойств модели системы ТЭ парка БВС в авиационных организациях.....	101
3.6 Исследование влияния эксплуатационных факторов и МТО на эффективность системы ТЭ БВС.....	105
3.7 Выводы по третьей главе.....	110
<b>Глава 4. Разработка и верификация научно-методического обеспечения и ПЛГ БАС на основе информационных технологий.....</b>	<b>111</b>
4.1. Информационные технологии по обеспечению и ПЛГ БАС.....	111
4.2 Верификация информационной базы данных ПЛГ БАС.....	113
4.3 Разработка методики формирования рациональной системы ТЭ парка БАС с использованием ППО на основе интегральной математической модели.....	116
4.3.1 Основные этапы создания эффективной системы ТЭ парка БАС..	116
4.3.2 Выбор рациональных параметров системы ТЭ парка БВС.....	119
4.4 Использование нейросети при обеспечении и ПЛГ БАС.....	123
4.4.1 Актуализация локальных НПА авиационных организаций.....	123
4.4.2 Использование нейросети для оценки технического состояния авиационных ГТД.....	125
4.4.3 Использование нейросети для оценки технического состояния ГТД по термодинамическим параметрам.....	131
4.5 Совершенствование инфраструктуры ТО БАС.....	135
4.6 Выводы по четвертой главе.....	140
<b>Заключение.....</b>	<b>141</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений.....</b>	<b>143</b>
<b>Список используемых источников.....</b>	<b>146</b>
<b>Приложение А.....</b>	<b>159</b>
<b>Приложение Б.....</b>	<b>170</b>
<b>Приложение В.....</b>	<b>175</b>

## Введение

**Актуальность** темы обусловлена интенсивным развитием беспилотной авиации в разных странах мира, необходимостью обеспечения технологического суверенитета в области беспилотных авиационных систем (БАС) в Российской Федерации (РФ), требованием сформировать информационную систему обеспечения лётной годности (ЛГ) БАС на всех этапах жизненного цикла с использованием информационных технологий (ИТ). Кроме того, в настоящее время требуют переработки и актуализации нормативные акты по созданию инфраструктуры для эксплуатации БАС. Требованием времени является создание непрерывной системы подготовки научных кадров в области БАС.

При разработке и эксплуатации сложных эргодических систем возникает необходимость решения задач обеспечения безопасности функционирования авиационно-транспортной системы и безопасности полётов (БП) с учётом характеристик внешней среды и ожидаемых условий эксплуатации (ОУЭ).

Исходя из этого, в диссертационной работе определены недостатки и проблемы поддержания лётной годности (ПЛГ) БАС и поставлены задачи, направленные на разработку и совершенствование научно-методического обеспечения процессов проектирования, изготовления и ПЛГ БАС.

На основе анализа проблем научно-методического обеспечения ЛГ БАС предложены решения и рекомендации для совершенствования системы технической эксплуатации (ТЭ) БАС (рисунок 1).

Кроме того, следует отметить, что в полном соответствии со стандартами и рекомендованной практикой ИКАО ряд проблем может быть решен на основе достижений российской научной школы, занимающейся проблемами обеспечения ПЛГ БАС.

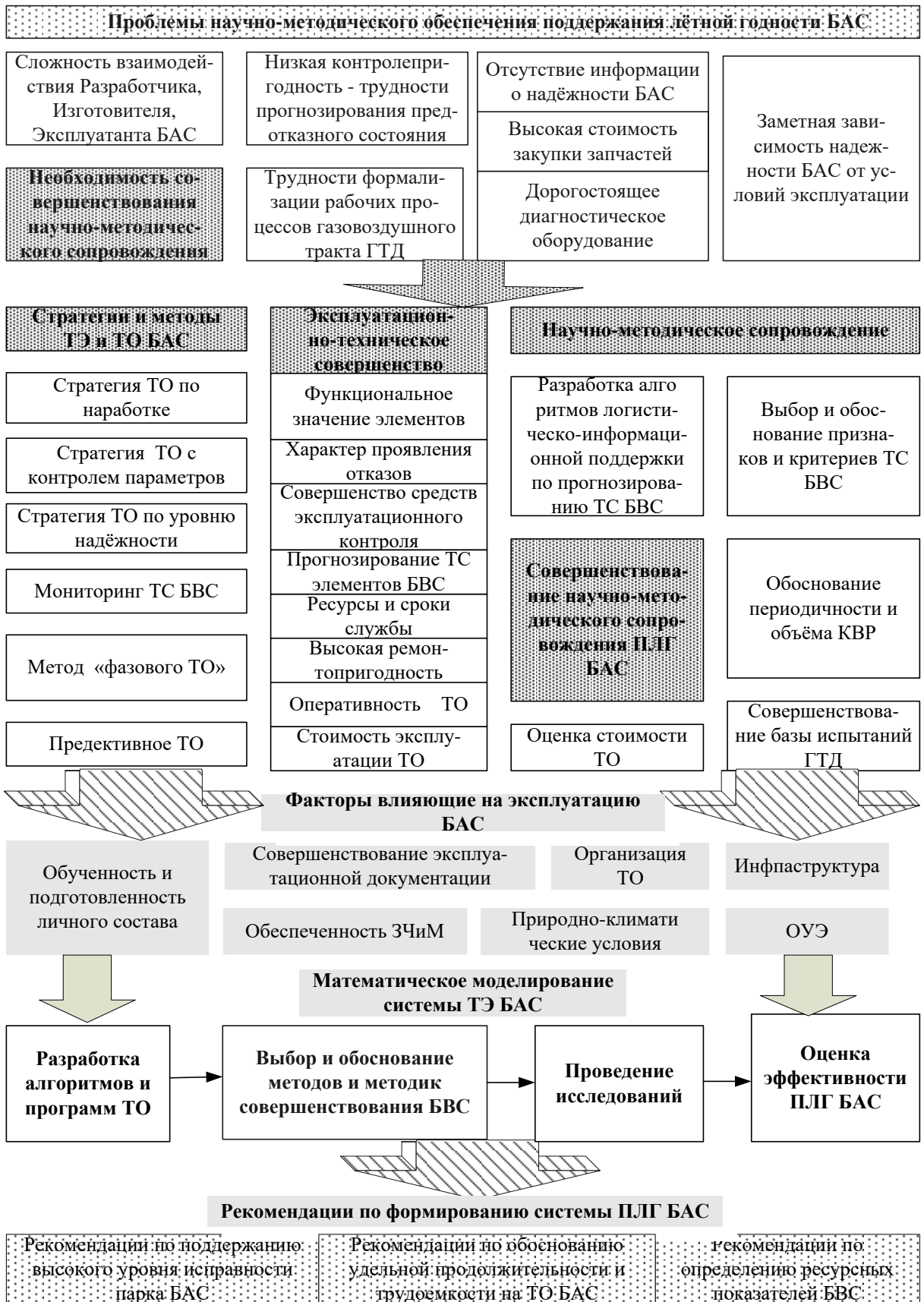


Рисунок 1 – Структурная схема исследования системы ПЛГ БАС

Принимая во внимание эти аспекты, необходимо внедрение эффективного научно-методического обеспечения ПЛГ БАС, в том числе эксплуатируемых в авиапредприятиях Республики Таджикистан.

### **Степень разработанности темы исследования.**

В вопросах обеспечения и ПЛГ, повышения эффективности ТЭ пилотируемых ВС большое значение имеют работы отечественных исследователей из ГосНИИ ГА, ЦАГИ, ЛИИ им. М.М. Громова, МГТУ ГА, УВАУ ГА (УИ ГА), МАТИ, МАИ и др.

В данном исследовании предложена структура информационно-управляющей системы ЛГ БАС, создана информационная база данных, включающая международные и национальные нормативно-правовые акты (НПА), эксплуатационную документацию, сведения о техническом состоянии БВС и их двигателях. Кроме того, разработаны подходы применения нейросетей с целью совершенствования процедур ПЛГ БВС. Для нейросети сформированы запросы (промт), которые содержат задание на актуализацию и формирование локальных нормативных актов.

В процессе работы создана имитационная модель и разработано прикладное программное обеспечение (ППО) [1] на основе полумарковских процессов.

В сформированную для анализа информационную базу данных (ИБД) включено более 70 российских и международных нормативных актов [2].

Решению комплекса проблем, способствующих обеспечению и ПЛГ ВС, оценке технического состояния (ТС) авиационной техники (АТ), повышению уровня безопасности полётов посвящены научные работы Алексаняна А.Р., Воробьева В.В., Гафурова Д.С., Герасимовой Е.Д., Гипича Г.Н., Далецкого С.В., Деркача О.Я., Зубкова Б.В., Ицковича А.А., Кирпичева И.Г., Кулешова А.А., Ойдова Н., Петрова А.Н., Самойленко В.М., Самуленкова Ю. И., Смирнова Н.Н., Файнбург И.А., Чинючина Ю.М., Шапкина В.С. и др.

Анализ выполненных научных работ позволил выявить ряд проблем и недостатков, связанных с ПЛГ пилотируемых ВС [3, 4, 5].

В данной диссертации особое внимание уделяется работам, посвящённым информационным системам, обеспечению ПЛГ БАС и повышению уровня БП. Отметим, что освещение вопросов по разработке, изготовлению, сертификации и ПЛГ БВС в литературе и научных работах в настоящее время недостаточно для эффективной эксплуатации БАС. Наибольший интерес представляют материалы изданные в ГосНИИ ГА, ЦАГИ, МАИ, МГТУ ГА [2, 6, 7, 8].

В ходе исследования проведён анализ особенностей эксплуатации БАС и законодательного регулирования, их правового статуса, при этом особое внимание уделялось требованиям Воздушного кодекса РФ.

В открытых источниках достаточно много работ публицистического характера по разработке, производству и эксплуатации БАС. Большинство таких работ не имеют научного характера, однако для общего представления о проблематике их изучение весьма ценно, поскольку дает возможность представить масштаб применения БВС, оценить зарубежный опыт разработки и эксплуатации [9].

По результатам ежегодных научно-практических конференций, посвященных перспективам развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами, проводимых под руководством Министерства образования и науки РФ, публикуются разнообразные материалы по особенностям БАС, потенциалу их применения, процедурам лётно-технической эксплуатации и подготовки кадров для БАС.

В работе Гребеникова А.Г., Мялицы А.К., Парфенюк В.В. «Общие виды и характеристики БЛА» представлен материал по лётно-техническим характеристикам (ЛТХ) БАС различных стран. Книга авторов Ковалёва М.А., Овакимян Д.Н. «Беспилотные летательные аппараты вертикального взлёта: сборка, настройка и программирование» посвящена изучению беспилотных летательных аппаратов (БЛА), а также их сборке, настройке и программированию. Федотовских А.В. в монографии «Особенности разработки и эксплуатации гражданских БАС с технологиями искусственного интеллекта в арктической зоне Российской Федерации» рассмотрел использование современных технологий в

освоении арктической зоны и в недоступных местах.

Необходимо отметить, что разработанные Межгосударственным авиационным комитетом (МАК) авиационные правила (АП) для ВС, в том числе и для Республики Таджикистан, а также НПА по ПЛГ ВС, требуют переработки и актуализации, так как большинство функций МАК передано Росавиации [5, 10].

Международные и российские НПА по научно-методическому сопровождению ПЛГ БАС в данной диссертационной работе используются в качестве рекомендаций для разработки стандартов по эксплуатации БАС в Республике Таджикистан.

**Объект исследования** – система управления летной годностью БАС.

**Предметом исследования** являются процессы и процедуры обеспечения и ПЛГ БАС.

**Целью диссертационной работы** является решение научной задачи по формированию и совершенствованию системы технической эксплуатации БВС на основе современных информационных технологий.

**Для достижения цели поставлены следующие задачи:**

1. Провести анализ методов обеспечения и ПЛГ БАС и их значимости на основе рекомендаций ИКАО.
2. Выполнить анализ нормативно-правовой базы и научно-технической литературы по ПЛГ БВС.
3. Рассмотреть существующую систему эксплуатации БАС и её функционирование в Республике Таджикистан.
4. Разработать математическую модель системы обеспечения и ПЛГ БВС на основе полумарковских процессов.
5. Разработать ППО системы обеспечения и ПЛГ БВС на основе полумарковских процессов в Visual Studio C++.
6. Создать информационную базу данных по управлению ПЛГ БАС на основе Microsoft Access (MS Access).
7. Разработать методику формирования рациональной системы ТЭ парка БВС с использованием ППО на основе интегральной математической модели.

8. Провести эксперимент по использованию ИТ для оценки технического состояния (ТС) газотурбинных двигателей (ГТД), актуализации локальных НПА авиационных организаций.

9. Обосновать требования по построению инфраструктуры системы эксплуатации БАС и разработать рекомендации по организационно-техническому и технологическому сопровождению процессов обеспечения и ПЛГ.

**Методы диссертационного исследования:**

- всеобщие (анализ и синтез, классификация и моделирование);
- общенаучные (численный эксперимент, формализация ПЛГ БВС, математическое моделирование, логико-комбинаторный анализ, теория экспертных систем и математическая статистика);
- информационные технологии (нейросеть);
- теории вероятностей (полумарковские процессы, метод Монте-Карло);
- факторный и регрессионный анализ;
- планирование эксперимента;
- оптимизация процедур случайного поиска с адаптацией по направлению.

**Научная новизна исследования** состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель системы обеспечения и ПЛГ БВС, использующая аппарат полумарковских процессов, учитывающий особенности ТЭ БВС влияющие на критерии их оценки, отличающаяся от известных математических моделей, применяемых к пилотируемым ВС тем, что позволяет учитывать особенности функционирования БАС.

2. Разработана информационная база данных по управлению ПЛГ БАС, позволяющая структурировано хранить данные о процессах ПЛГ, предоставляя механизмы эффективного поиска и обработки.

3. Создана методика, позволяющая эксплуатирующим организациям формировать и совершенствовать систему ТЭ парка БВС, отличающуюся от аналогичных подходов применимостью не только к эксплуатации компонентов ВС по наработке, но и к эксплуатации по состоянию.

4. Установлены закономерности и определены функциональные зависимости, позволяющие выявить влияние эксплуатационных факторов на максимальные значения удельных показателей продолжительности и трудоёмкости БВС.

5. Верифицированы научные положения, полученные с применением информационно-аналитических технологий и методов цифрового моделирования, что обеспечило повышение достоверности оценки ТС компонентов беспилотных авиационных систем и обоснованность принимаемых решений в контуре поддержания их летной годности.

**Практическая значимость диссертационного исследования** состоит в возможности:

- научно-обоснованного прогнозирования исправности парка БВС в течение календарного срока эксплуатации (12 месяцев) и оценки фактического выполнения плана налета авиапредприятия;
- обоснования рациональных объемов и периодичности ТО БВС для заданных норм налета;
- расчета показателей удельных трудозатрат и продолжительности выполнения технического обслуживания (ТО) на БВС;
- формирования рациональной системы ТЭ применительно к парку БАС и оценки ее эффективности с использованием разработанного автором ППО на основе интегральной математической модели;
- разработки и актуализации на основе сформированной ИБД локальных нормативных актов по управлению системой качества и поддержанию летной годности БАС, как основы системы управления безопасностью полетов (СУБП);
- совершенствования процессов комплексной подготовки БВС, направленной на обеспечение и повышение регулярности полетов;
- расчета потребного оборотного фонда авиационных двигателей для обеспечения планируемого годового налёта парка БВС;
- использования ИТ (оценка ТС ГТД пилотируемых ВС, актуализация локальных НПА авиационных организаций) для совершенствования процессов ТЭ БВС в авиационных организациях;

- развития инфраструктуры системы эксплуатации и организационно-технического, технологического сопровождения процессов обеспечения и ПЛГ БАС.

**Положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель системы обеспечения и ПЛГ БВС, использующая аппарат полумарковских процессов, учитывающий особенности ТЭ БВС влияющие на критерии их оценки, отличающаяся от известных математических моделей, применяемых к пилотируемым ВС тем, что позволяет учитывать особенности функционирования БАС;

- информационная база данных по управлению ПЛГ БАС, позволяющая структурировано хранить данные о процессах ПЛГ, предоставляя механизмы эффективного поиска и обработки;

- методика, позволяющая эксплуатирующим организациям формировать и совершенствовать систему ТЭ парка БВС, отличающуюся от аналогичных подходов применимостью не только к эксплуатации компонентов ВС по наработке, но и к эксплуатации по состоянию;

- результаты исследований, позволяющие выявить влияние эксплуатационных факторов на максимальные значения удельных показателей продолжительности и трудоёмкости ТО БВС;

- научные положения, полученные с применением информационно-аналитических технологий и методов цифрового моделирования, что обеспечило повышение достоверности оценки технического состояния компонентов беспилотных авиационных систем и обоснованность принимаемых решений в контуре поддержания их летной годности.

**Автором лично** получены все основные результаты, выносимые на защиту:

- математическая модель системы обеспечения и ПЛГ БВС, использующая аппарат полумарковских процессов, учитывающий особенности ТЭ БВС влияющие на критерии их оценки, отличающаяся от известных математических моделей, применяемых к пилотируемым ВС тем, что позволяет учитывать особенности функционирования БАС;

- информационная база данных по управлению ПЛГ БАС, позволяющая структурировано хранить данные о процессах ПЛГ, предоставляя механизмы эффективного поиска и обработки;

- методика, позволяющая эксплуатирующим организациям формировать и совершенствовать систему ТЭ парка БВС, отличающуюся от аналогичных подходов применимостью не только к эксплуатации компонентов ВС по наработке, но и к эксплуатации по состоянию;

- результаты исследований, позволяющие выявить влияние эксплуатационных факторов на максимальные значения удельных показателей продолжительности и трудоёмкости БВС;

- научные положения, полученные с применением информационно-аналитических технологий и методов цифрового моделирования, что обеспечило повышение достоверности оценки ТС компонентов беспилотных авиационных систем и обоснованность принимаемых решений в контуре поддержания их летной годности;

**Достоверность результатов** обеспечивается комплексом мер:

- теоретико-методологической обоснованностью, которая базируется на фундаментальных законах и положениях теории вероятностей и математической статистики, теории систем, теории уравнения, а также на корректном применении математического аппарата;

- адекватность разработанных моделей подтверждена проверкой на сходимость, устойчивость и установлена путем сопоставления результатов моделирования с данными аналогичных моделей при расхождении не более 7%, достаточным для задач данного класса [11];

- полученные результаты не противоречат известным теоретическим положениям и эмпирическим данным, опубликованным в авторитетных научных источниках по тематике исследования.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях и семинаре.

Список публикаций автора по теме диссертации включает 9 печатных научных трудов, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ. Зарегистрированы: 1 программа для ЭВМ, 1 база данных управления летной годностью БАС [1, 12] в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 176 страниц машинописного текста, в том числе 62 рисунка, 22 таблицы, а также А, Б, В приложений. Список используемых источников содержит 133 наименования.

## **Глава 1. Анализ состояния вопроса и постановка задачи исследования**

### **1.1. Современное состояние беспилотной авиации**

Современные БАС представляют собой одну из наиболее перспективных областей развития авиации. Эти системы, включающие БВС, используются как в гражданских, так и в военных сферах, выполняя широкий спектр задач – от мониторинга и аэрофотосъемки до поисково-спасательных операций и грузовых перевозок. Процедуры, направленные на обеспечение летной годности (ЛГ), охватывают все этапы жизненного цикла БВС, включая проектирование, производство и эксплуатацию [2]. В этих условиях ПЛГ БВС является ключевым аспектом их успешного применения.

Шестой технологический уклад развития мировой индустрии предполагает внедрение технологий искусственного интеллекта в различные сферы гражданской авиации. К этому направлению следует отнести создание цифровых двойников, информационных управляющих систем, цифровых помощников, нейронные сети (в том числе формирование запросов), актуализированные математические модели, управление данными, сопровождение истинности и др. [13].

Современные исследователи этапов развития БАС достаточно полно описали летно-технические характеристики, конструктивные особенности области применения беспилотников [14, 15, 16, 17, 18]. В этих работах также рассматриваются перспективы развития беспилотной авиации, а также внедрение новых технологий [19, 20, 21, 22].

В первой главе данного диссертационного исследования рассматриваются современные тенденции, технологические достижения, нормативные аспекты [23], а также ключевые мировые производители и направления дальнейшего применения тяжёлых беспилотников в гражданской и других сферах.

В настоящее время тяжёлые БВС находят применение в следующих сферах:

- военные миссии: разведка, целеуказание, нанесение ударов, патрулирование;

- гражданские задачи: мониторинг объектов инфраструктуры, борьба с природными катастрофами, геологоразведка, картография, грузовые перевозки (доставка грузов в труднодоступные регионы, включая Арктику и горные районы).

Современные БВС с максимальной взлетной массой более 30 кг характеризуются:

- частота возникновения практически невероятных событий должна быть менее  $10^{-7}$ ;

- широким использованием композитных материалов;

- применением силовых установок с электрическими, поршневыми, гибридными двигателями и ГТД;

- внедрением интеллектуальных систем управления с искусственным интеллектом (ИИ);

- модульностью конструкции, позволяющей замену полезной нагрузки.

На современном мировом рынке сверхдержавы достигли значительных успехов в проектировании и изготовлении БАС [24]:

- General Atomics (США) – MQ-9 Reaper;

- Baykar (Турция) – Bayraktar Akıncı;

- CASC и AVIC (Китай) – CH-4, Wing Loong II;

- IAI (Израиль) – Heron, Eitan;

- Airbus Defence (ЕС) – Eurodrone;

- Уральский завод гражданской авиации (УЗГА), Россия – «Альтиус»;

- Кронштадт, Россия – «Орион»;

- ОКБ имени П.О. Сухого – С-70 «Охотник»;

- Специальный технологический центр (СТЦ) Россия – «Орлан-10».

Сравнение тяжелых БВС по странам, разработчикам (изготовителям) и взлётной массе приведено в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Тяжелые БВС по странам, производителям и по массе

Страна	Разработчик	Взлётная масса, кг	Варианты использования
США	General Atomics (MQ-9 Reaper), Boeing (MQ-25)	> 4500	Разведка, нанесение ударов, наблюдение
Турция	Baykar (Bayraktar Akıncı)	~6000	Тактический ISR
Китай	CASC (CH-4), AVIC (Wing Loong II)	~1200-3300	Для наблюдения, боя, экспортный рынок
Израиль	Israel Aerospace Industries (Heron, Eitan)	~1200-5000	Для военных операций
Россия	Kronshtadt (Orion), OPMB im P. O. Sukhogo (Sukhoi S-70)	~1000 ~25000	Для разведки, нанесения ударов
ЕС (Германия)	Airbus Defence (Eurodrone)	~10000	Для тактической разведки
Южная Корея	KAI (KUS-FS)	~1300-4000	Для наблюдения и внутренней обороны

Развитие БВС в Российской Федерации демонстрирует устойчивую динамику роста. Классификация по взлётной массе позволяет установить стратегические приоритеты в разработке, производстве и применении БВС в различных секторах экономики и обороны (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация БВС по взлётной массе

№	Класс БВС	Взлётная масса	Назначение	Примеры
1	Микро-БВС	до 1 кг	Разведка, наблюдение, спецоперации	«Гарпун», ZALA 100
2	Мини-БПЛА	от 1 до 30 кг	Тактическое наблюдение, охрана объектов	«Орлан-10», ZALA 421-16

## Продолжение таблицы 1.2

3	Малые БВС	от 30 до 150 кг	Тактическая разведка, сопровождение колонн	«Тахион»
4	Средние БВС	от 150 до 600 кг	Длительная разведка, ретрансляция связи	«Форпост-Р», «Куб-БЛА»
5	Тяжёлые БВС	от 600 до 5000 кг	Многофункциональные: разведка + ударные задачи	«Орион», «Альтиус», «Сириус»
6	Сверхтяжёлые БВС	свыше 5000 кг	Стратегические, ударные и дальние миссии	С-70 «Охотник-Б»

В настоящее время сложно получить информацию о ЛТХ, ТЭ БВС в сфере гражданской авиации, так как БАС с БВС самолетного типа с максимальной взлетной массой более 30 кг находятся в стадии разработки, изготовления и сертификации. В целях выполнения поставленных задач в данной научной работе выполнен анализ ЛТХ БВС государственной авиации представленных на рисунке 1.1 [25] (таблица 1.3) и пилотируемых ВС гражданской авиации, наиболее близкие по характеристикам к рассматриваемым БВС: Ан-28 [26], Ил-114-300 [27] и Як-40 [28] (таблица 1.4).

Таблица 1.3 – Лётно-технические характеристики БВС

ЛТХ	Тип БВС				
	RQ-4A	RQ-4B	«Альтиус»	X-47B	Chengdu WZ-10
Длина, м	13,53	14,50	11,6	11,64	9,0
Размах крыла, м	35,42	39,89	28,38	18,92	20,0
Площадь крыла, м <sup>2</sup>	50,10	50,1	-	88,59	-
Удлинение крыла, м	25,04	31,76	-	4,04	-
Удельная нагрузка на крыло, кгс/м <sup>2</sup>	232	232	-	213-260	-
Высота, м	4,63	4,63	0,706	3,16	3,66
Масса пустого, кг	5 148	6 781	6 000	6 350	2 300
Макс взлётная масса, кг	12133 кг	14628	7000	20 215	3 200
Макс скор, км/ч	837	637	250	990	620
Потолок, м	16 811	18 000	12 000	12 000	15 000
Радиус действия, км	15 000	5 500	10 000	1 950	5 500
Максимальная продолжительность полёта, ч	36	32	48	8	20
Дальность, км	25 015	22 780	10 000	3 900	12 000

## Продолжение таблицы 1.3

Полезная нагрузка кг	907	1360	2000	2 000	400
Силовая установка	Allison Rolls- Royce AE3 007H 1X33 кН	Allison Rolls- Royce AE30 07H	RED A03/V12	ТРДД 1×Pratt & Whitney F100-220 Тяга 79,1 кН	ТРДД ZF850 Тяга 9,8 кН



а)



б)



с)



д)

Рисунок 1.1 – БВС иностранного производства а) CASC Rainbow CH-5; б) Guizhou WZ-7 Soaring Dragon; в) Chengdu WZ-10; д) RQ-4 Global Hawk

Таблица 1.4 – Лётно-технические характеристики Ан-28, Ил-114-300 и Як-40

ЛТХ ВС	Ан-28	Ил-114-300	Як-40
Длина ВС, м	13,1	26,9	20,36
Высота ВС, м	4,9	9,2	6,5
Размах крыла, м	22,06	30,0	25,0
Максимальная взлетная масса, кг	6500	до 23500	17200
Полезная нагрузка	2000 кг или 19 пассажиров	6500 кг или (60 пассажир)	3240кг или (32-40 пассажир)
Макс. скорость, км/ч	352	500	546

*Продолжение таблицы 1.4*

Практическая дальность, км	560-1250	2000	1350
Макс. длительность полета, ч	-	3-4	2,2 (3 ч. перегон.)
Практический потолок, м	6000	7600	6000
Экипаж	2	2	3 + 1 бортпроводник
Количество двигателей, мощность	2х ТВД 10 Б 960 л.с.	2 х ТВ7-117СТ- 01 2900 л.с.	3 × ТРДД АИ-25 1120 кгс (номин.)

Необходимо отметить, что в связи с устареванием парка самолетов Ан-28 и Як-40, для перевозки грузов, багажа, почты и других коммерческих услуг на местных и региональных воздушных линиях планируется использование БВС.

БВС имеют неоспоримые преимущества по сравнению с пилотируемыми ВС: продолжительность полета может составлять до 48 часов, отсутствует лётный и cabinный экипаж, нет необходимости в системе жизнеобеспечения (кислородное оборудование, спасательные жилеты, надувные трапы и др.), количество двигателей может быть уменьшено до одного, уменьшена продолжительность оформления судовой и технической документации (манифест), в системе управления отсутствуют штурвалы, педали и т.д.

## **1.2. Анализ нормативно-правовой базы по обеспечению и ПЛГ БАС**

Развитие современных технологий привело к тому, что БАС стали новым компонентом авиационной системы в целом. Изучение, идентификация БАС осуществляется международными организациями гражданской авиации и государствами-членами ИКАО, непосредственно занимающимися их производством и эксплуатацией [29, 30, 31].

На международном уровне вопросы обеспечения ЛГ и БП БВС регулируются ИКАО, которая разрабатывает рекомендации и стандарты для интеграции БВС в международное воздушное пространство (рисунок 1.2) [2].

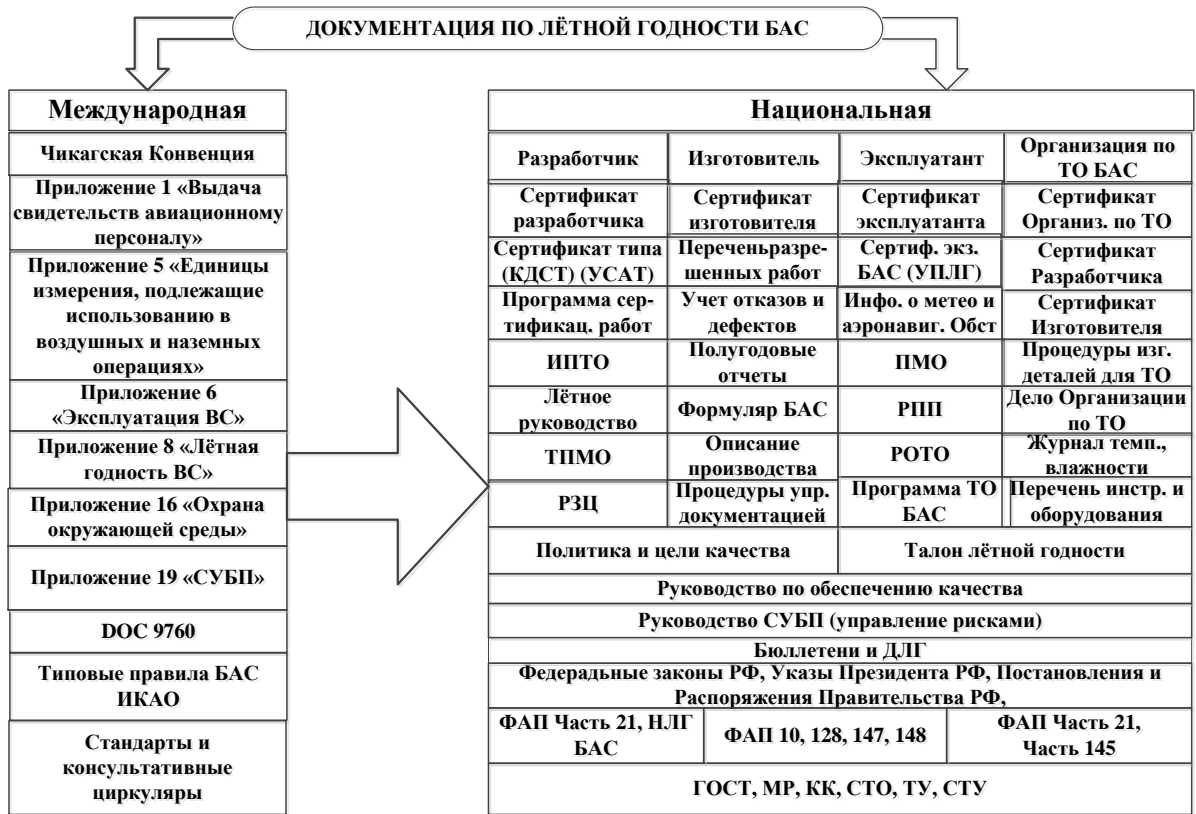


Рисунок. 1.2 – Основные нормативные акты по лётной годности БАС

КДСТ – карта данных сертификата типа; УСАТ – Управление сертификации авиационной техники; УПЛГ – Управление поддержания лётной годности; ИПТО – информация для планирования технического обслуживания; ПМО – перечень минимального оборудования; РПП – руководство по производству полётов; ТПМО – типовой перечень минимального оборудования; РОТО – Руководство по организации технического обслуживания; РЗЦ – руководство по центровке и загрузке; СУБП – система управления безопасностью полётов; ДЛГ – директива лётной годности; ГОСТ – государственный стандарт; МР – методические рекомендации; КК – контрольные карты; СТО – средство технического обслуживания; ТУ – технические условия; СТУ – специальные технические условия

Использование БАС, основанных на новейших разработках в области авиационных технологий, может расширить возможности в развитии отрасли гражданской авиации, связанные с социальными, коммерческими и техническими вопросами, а также повысить эффективность деятельности в области гражданской авиации, связанной с обеспечением БП.

Развитие беспилотной авиации тесно связано с совершенствованием нормативно-правовой базы, которая обеспечивает правовые и организационные основы для проектирования, производства, эксплуатации и ТО БАС.

Несмотря на активное развитие нормативно-правовой базы, существуют проблемы, связанные с регулированием эксплуатации БАС. Основные трудности включают необходимость гармонизации международных и национальных стандартов, разработку новых стандартов ЛГ для уникальных конструкций и сложностей в обеспечении эксплуатации БАС в контролируемом воздушном пространстве.

К основным проблемам развития нормативной базы по эксплуатации БАС следует отнести: несоответствие национальных и международных стандартов, что затрудняет интеграцию БАС в глобальное воздушное пространство; недостаточная проработанность документов ЛГ; отсутствие нормативно-правовой базы по созданию производственной инфраструктуры для ТО БАС; нехватка ППО для сопровождения жизненного цикла БАС; недостаточно проработанные требования по квалификации летного и инженерного-технического состава для БАС.

ИКАО активно работает над созданием и внедрением стандартов и рекомендуемых практик (SARPs) для интеграции БАС в международное воздушное пространство. Ключевые инициативы и документы ИКАО в этой области включают [32]:

### **1. Типовые правила ИКАО для БАС**

ИКАО разработала типовые правила для БАС, известные как Части 101, 102 и 149, которые служат шаблоном для государств-членов при разработке национальных нормативных актов. Эти правила охватывают [33]:

- **Часть 101:** Общие требования к эксплуатации БАС, включая регистрацию всех БВС и условия стандартной эксплуатации.
- **Часть 102:** Требования для операций, выходящих за рамки стандартных условий, включая сертификацию операторов и дополнительные меры безопасности.
- **Часть 149:** Установление требований к организациям, занимающимся сертификацией и надзором за БАС.

Эти типовые правила призваны обеспечить гармонизацию национальных норм и содействовать безопасной интеграции БАС в воздушное пространство.

## **2. Стандарты и рекомендуемые практики для дистанционно пилотируемых авиационных систем (RPAS)**

В апреле 2024 года Совет ИКАО принял новые SARPs, касающиеся RPAS. Эти стандарты включают [34]:

- Требования к операторам RPAS при получении свидетельства оператора (ROC), аналогичное свидетельству пилота для пилотируемых ВС;
- Введение положений, касающихся лицензирования внешних пилотов, требований к летной годности и процедурам связи.

Эти меры направлены на создание основы для безопасной и эффективной интеграции RPAS в международную авиационную систему.

## **3. Инструментарий ИКАО для БАС**

Необходимо отметить, что ИКАО разрабатывает и обновляет стандарты и рекомендации, касающиеся сертификации и интеграции беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в международное воздушное пространство.

Как свидетельствует статистика, 9-10% авиационных происшествий происходит по вине разработчика и изготовителя пилотируемых ВС, 20-25% – из-за неудовлетворительного ТС ВС [35]. Поэтому одним из направлений повышения БП является обязательная сертификация БАС. Причем, сертификации подлежит [36]: тип БАС и экземпляр БАС.

Правила сертификации и схема взаимодействия типа пилотируемых ВС едины для всех стран Союза независимых государств (СНГ) (рисунок 1.3).

Сертификация экземпляра пилотируемых ВС (БАС) - установление соответствия экземпляра ВС требованиям законодательства РФ и нормативно-технической документации. На экземпляр ВС (БАС) выдается сертификат летной годности.

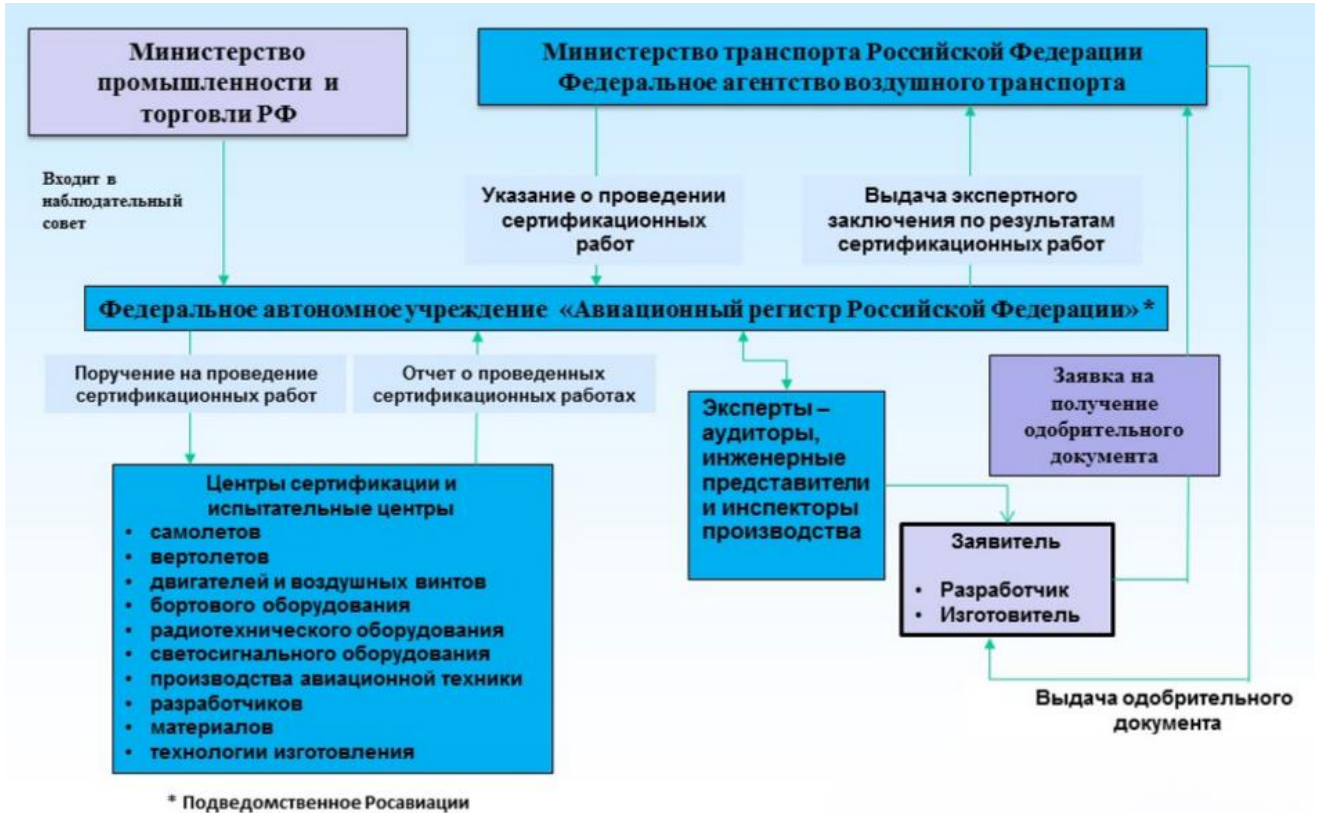


Рисунок 1.3 – Схема взаимодействия в сфере сертификации ВС в Российской Федерации [37]

С 26 ноября 2026 года требования к конструированию, предусмотренные соответствующими нормами лётной годности (НЛГ), которые используются Договаривающимся государством для сертификации типа ВС (БВС), пункта дистанционного пилотирования, двигателя или воздушного винта или для любого изменения такой сертификации типа, являются таковыми, что их соблюдение будет гарантировать соблюдение частей Приложения 8 ИКАО [29].

С целью упрощения процедур обязательной сертификации гражданской АТ, необходимых для выдачи сертификата типа для БАС [38] с 1 сентября 2023 года

действует приказ Минтранса России №196. В соответствии с этим документом для полётов на высоте до 10 метров в сельскохозяйственных целях предусматривается декларативный метод определения соответствия, допускается сертификация авиационного двигателя и воздушного винта в составе БАС. Также предусматривается упрощённая процедура сертификации для организации-разработчика БАС с максимальной взлётной массой менее 5700 кг, не осуществляющим полёты над населённой местностью и не предназначенным для перевозки пассажиров.

### **1.2.1. Процедуры ПЛГ ВС и безопасности полётов**

Система ПЛГ ВС на каждом этапе развития гражданской авиации реализуется в соответствии с положениями актуальной нормативной и технической документации, уровнем развития науки и техники.

В Приложениях к Конвенции о международной гражданской авиации, определены процедуры сертификации и ПЛГ ВС, управление БП, в том числе, для БАС.

Под ПЛГ понимают совокупность процессов, обеспечивающих соответствие БАС и (или) их элементов, гражданских ВС, авиационных двигателей, воздушных винтов требованиям к ЛГ и к охране окружающей среды. В целях ПЛГ гражданского ВС, АвД и воздушных винтов (ВВ) при их эксплуатации осуществляется наземное и ТО. Однако этим процедуры ПЛГ не ограничиваются. Федеральные авиационные правила (ФАП) устанавливают организацию и подходы к сертификации АТ, процедуры контроля качества и управления БП, требования к структуре авиационной организации и перечень основных работ по ТО, количество цехов, отделов и подразделений организаций по ТО ВС [39, 40]. Вместе с тем, решение задач ПЛГ ВС требует от всех участников авиационно-транспортной системы научно обоснованного подхода, в том числе детального анализа факторов, влияющих на процессы и процедуры ПЛГ АТ (рисунок. 1.4).



Рисунок 1.4 – Факторы, влияющие на ПЛГ ВС (БАС, авиационные двигатели, воздушные винты): МТО – материально – техническое обеспечение, ЭТХ – эксплуатационно-технические характеристики; ОТО – оперативное ТО, ПТО – периодическое ТО, РЭ – руководство по эксплуатации, ИПТО – информация для планирования технического обслуживания

В Воздушном кодексе РФ в 2021 году появилась новая статья, в которой раскрывается понятие «Управление поддержанием лётной годности» и указывается, что этот комплекс мер осуществляется в соответствии с ФАП. Вместе с тем, в ФАП 145 и ФАП 148 нет чётких указаний и требований к организации и проведению такой процедуры.

Порядок сертификации АТ, организаций разработчиков и изготовителей АТ устанавливается ФАП [41], эксплуатантов и организаций по ТО ВС, поддержания ЛГ устанавливается ФАП [39, 40] и в зависимости от максимальной взлётной массы ВС и целей их использования (коммерческие воздушные перевозки, авиационные работы, полёты авиации общего назначения).

## 1.2.2. База данных директив лётной годности

Так как для БАС на сегодняшний день нет статистических данных по надёжности и БП, поэтому за основу были взяты директивы пилотируемого ВС, а созданная база данных применима и для БАС. В ходе выполнения исследования была создана база данных ДЛГ самолёта RRJ-95 на основе данных с сайта Федерального агентства воздушного транспорта [42].

На основании созданной базы данных можно делать выборки по системам самолета, году выпуска директивы, технического решения и т.д. Для примера сделана выборка по сервисным бюллетеням (рисунок 1.5) и выборка по системам самолета (рисунок 1.6).

№	Тип само.	№ директивы	Дата дир.	Номер ФС	Система	Сервисный бюллетень	Техническое решени	Дата ТехРе
11	RRJ-95	2019-FATA-01020A-06	05.08.2019	57	Крыло	RRJ-57-00451-БД	RRJ0000-OR-470 3016/A	31.07.2019
13	RRJ-95	2019-322-03	22.05.2019	57	Крыло	RRJ-57-00451-БД	RRJ0000-OR-470-3016	14.05.2019

Рисунок 1.5 – База данных с выборкой по сервисному бюллетеню.

№	Тип само.	№ директивы	Дата дир.	Номер ФС	Система	Сервисный бюллетень	Техническое решени	Дата ТехРе	Заводской
5	RRJ-95	2020-FATA-01020A-11	28.07.2020	55	Оперение	RRJ-55-00489-БД	RRJ0000-OR-470-4701	22.07.2020	
17	RRJ-95	2017-322-02	24.05.2017	55	Оперение		RRJ0000-OR-470-0290	23.05.2017	
18	RRJ-95	2017-322-01	07.03.2017	55	Оперение	RRJ-55-00348-БД	RRJ0000-OR-470-7229	02.03.2017	
19	RRJ-95	2016-322-01	11.08.2016	55	Оперение		RRJ0000-OR-470-8879/С	11.08.2016	

Рисунок – 1.6. База данных с выборкой по системам самолета.

На основе построенной гистограммы можно сделать вывод о надёжности функциональных систем самолета RRJ-95 (рисунок 1.7.).

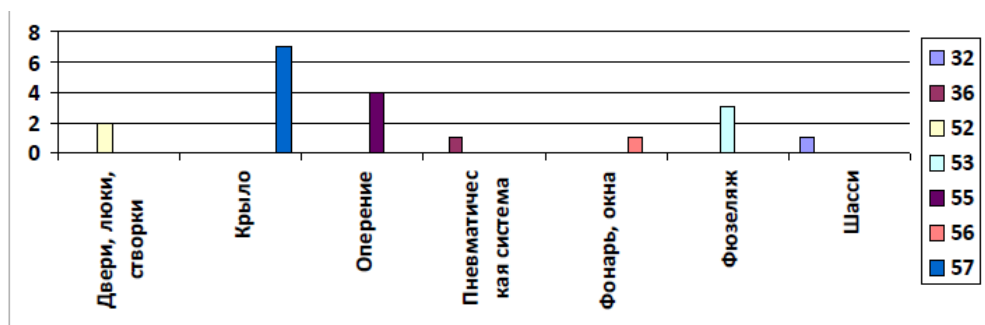


Рисунок – 1.7. Гистограмма о надёжности функциональных систем самолета RRJ-95, созданная на основе базы данных по ДЛГ

По данному отчету проведен анализ, из которого следует, что наибольшее количество ДЛГ разработаны для системы - 57 «Крыло».

### **1.3. Особенности существующей системы эксплуатации БАС и её функционирование в Республике Таджикистан**

В исследовании проведён анализ существующей системы ПЛГ в гражданской авиации Республики Таджикистан и выявлено, что в целях обеспечения БП и повышения качества услуг в области гражданской авиации и для приведения в соответствие к международным требованиям на основании постановления Правительства Республики Таджикистан от 01 ноября 2024г. №589 в структуру Агентства гражданской авиации при Правительстве Республики Таджикистан были внесены дополнения и создан Сектор учета и надзора за БЛА (рисунок. 1.8).

Из анализа структуры уполномоченных органов в области авиации различных государств следует, что большинство стран находятся в стадии перехода к эксплуатации или производства БЛА в соответствии с требованиями ИКАО, и Республика Таджикистан относится к числу таких государств. Поэтому можно с уверенностью сказать, что для таких государств первые шаги, связанные с эксплуатацией или производством БЛА, являются сложными и требуют создания условий для подготовки высококвалифицированных кадров и разработки ряда НПА. Основная концепция исследования заключается в обеспечении ПЛГ БАС, что на напрямую повлияет на эффективность эксплуатации и БП. Поэтому подготовка, переподготовка и повышение квалификации технических специалистов для обеспечения ПЛГ (AIR) ВС к полетам, в том числе БАС, непосредственно занимающихся системой сертификации и надзора является приоритетной темой и постоянно находится под контролем международных организаций.

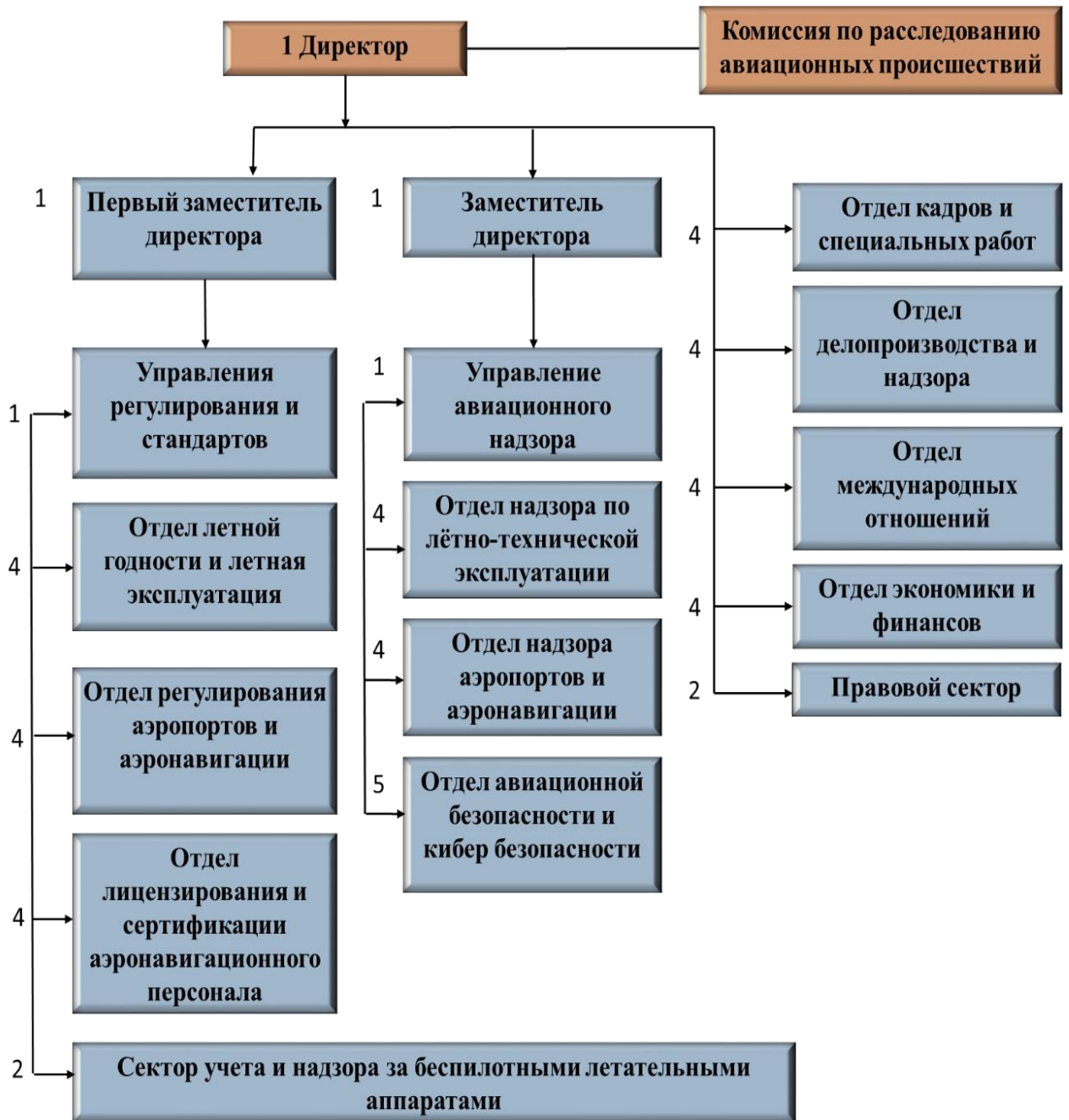


Рисунок 1.8 – Структура Агентства гражданской авиации при Правительстве Республики Таджикистан

Поэтому анализ результатов проверок критических элементов ГА Республики Таджикистан экспертами ИКАО [43] (рисунок 1.9 и 1.10) за 2016 год, позволил создать структуру управления и контроля беспилотной авиации.

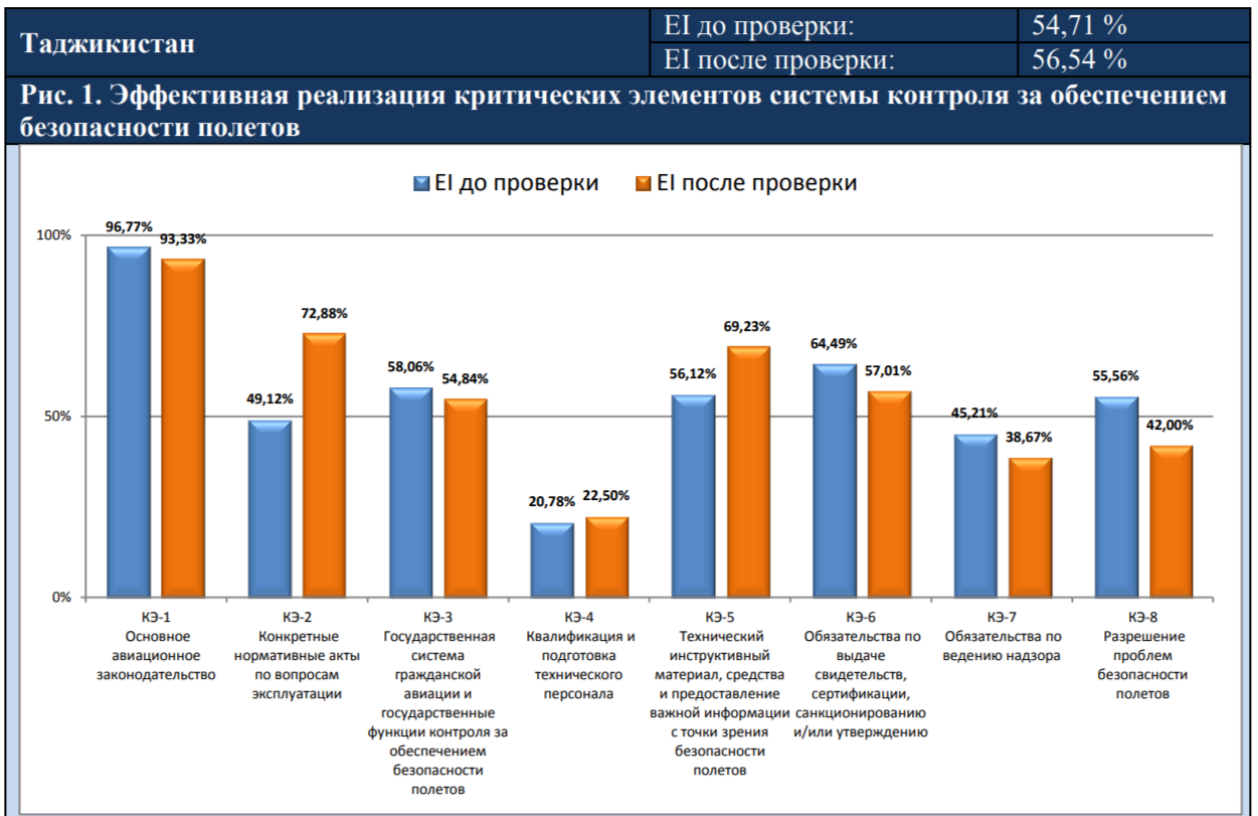


Рисунок 1.9 – Результаты проверок критических элементов системы контроля за обеспечением БП ГА Республики Таджикистан

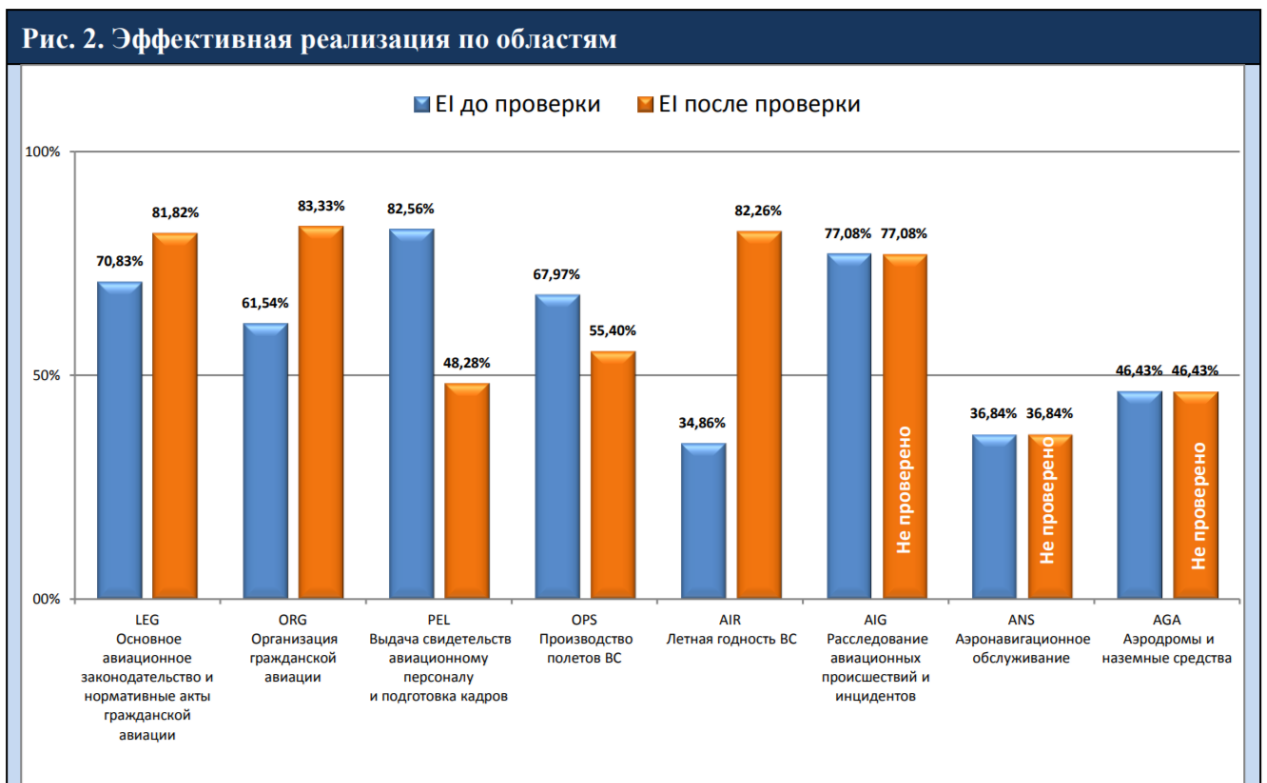


Рисунок 1.10 – Результаты проверок критических элементов системы контроля за обеспечением БП ГА Республики Таджикистан

К основным сферам, где широко применяются БАС относятся: нефтегазовый сектор, транспортная безопасность, сельское хозяйство, мониторинг состояния линий электропередач (ЛЭП), геодезия, геологоразведка, аэро и фотосъемка, проведение научных исследований, при ликвидации последствий чрезвычайных происшествий, экологический мониторинг, контролирование границ охраняемой территории и др. (рисунок 1.11, 1.12).

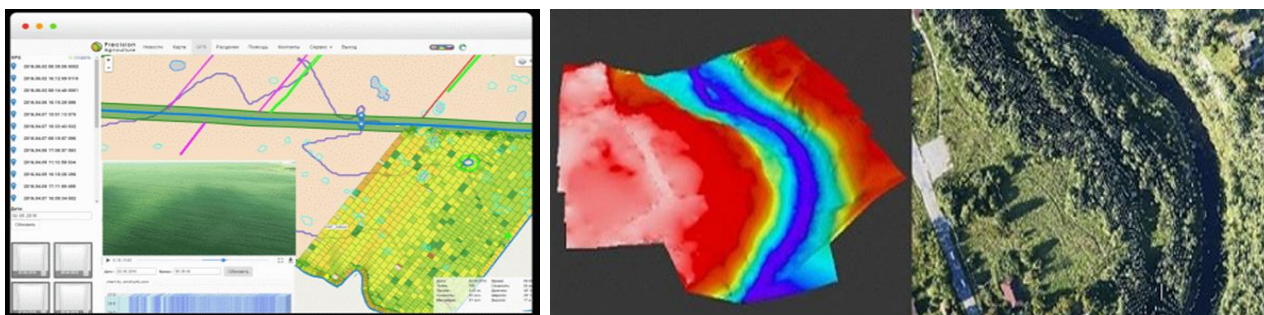


Рисунок 1.11 – Применение БАС в сельском хозяйстве и картографировании

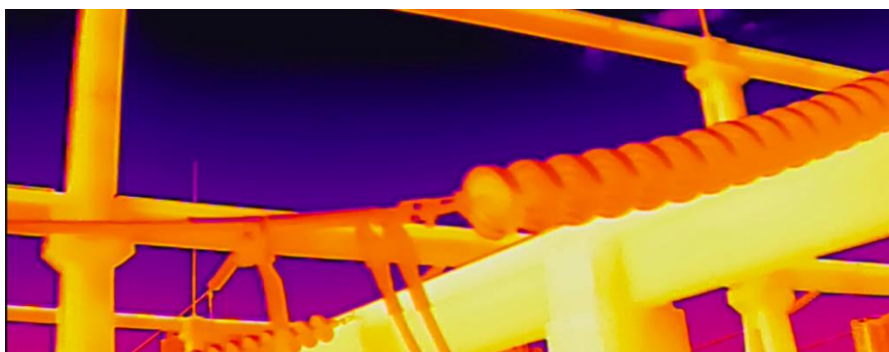


Рисунок 1.12. – Тепловизионный контроль ЛЭП с помощью БАС

Необходимо отметить, что 93% территории Таджикистана занимают горы, что влияет на развитие инфраструктуры тяжелой и легкой промышленности, транспорта, энергетики, сельского хозяйства и на проведение научно-технических работ. В связи с этим, особую актуальность приобретает использование БАС для мониторинга промышленных и производственных предприятий, гидроэлектростанций (ГЭС), угольных шахт, ЛЭП, контроля государственной границы, определения зон повышенной опасности, исследованию ледников и др.

С учетом изменения климата в мире и глобального потепления в целях защиты ледников и рационального использования вод, вытекающих из ледников (рисунок 1.13), Президент Республики Таджикистан 3 января 2024 года подписал Закон Республики Таджикистан «О защите ледников»



Рисунок 1.13 – Изучение состояния ледников с помощью БАС

#### **1.4. Влияние квалификации авиационного персонала на процессы обеспечения и ПЛГ БАС**

Обеспечение БП закладывается при создании АТ, в значительной степени зависит от ЛГ и от уровня подготовки инженерно-технического персонала.

В процессе массовой эксплуатации и применения АТ инженерно-технический состав выявляет имеющиеся недостатки конструкции летательных аппаратов (ЛА), руководств по летной и технической эксплуатации, формулирует требования и предложения по их совершенствованию.

Обеспечение квалифицированными специалистами авиационных организаций является ключевым вопросом, и их обучение с целью обеспечения БП считается проблемным вопросом дня.

Отметим, что в соответствии с требованиями Приложения 13 ИКАО «Расследование авиационных происшествий и инцидентов» авиационные события с БВС подлежат расследованию, а специалисты в области технической и летной эксплуатации БАС должны пройти обучение и иметь подтверждающие документы (свидетельство) специалиста с квалификационной отметкой [44].

Порядок получения сертификата (свидетельства) специалистов по эксплуатации БАС по категориям представлен на рисунках 1.14 и 1.15.



Рисунок 1.14 – Схема для получения сертификата (свидетельства) оператора БАС по категориям

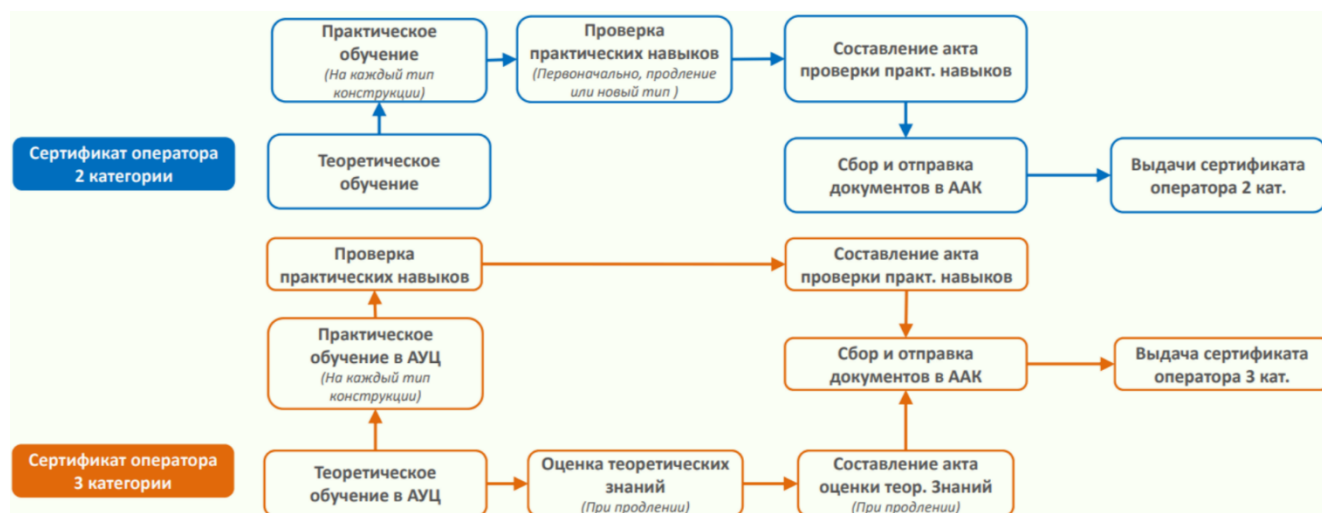


Рисунок 1.15 – Схема для получения сертификата (свидетельства) оператора для 2 и 3-го категорий

В целях своевременного выполнении всех видов ТО [45], особенно ПТО, создание авторизованного сервисного центра ТО БАС, эксплуатируемых в Республике Таджикистан, является приоритетной задачей.

В связи с инновационным характером новой отрасли в гражданской авиации Таджикистана выявлены следующие недостатки:

- отсутствует процедуры «введения в действие» эксплуатационной документации, утверждаемые Таджикской авиационной администрацией, при этом, существует «языковая» проблема перевода;
- отсутствует национальное «Руководство по ПЛГ БАС»;
- недостаточное количество ППО для ПЛГ БАС;
- отсутствуют учебные тренажерные центры и инновационные технологии обучения авиационного персонала для решения задач ПЛГ БАС [46, 47].

Наличие указанных нерешенных проблем подтверждает актуальность темы диссертационного исследования, направленного на разработку научно-методического обеспечения ПЛГ БАС, с учётом международных и российских документов по обеспечению БП.

### **1.5. Постановка задачи исследования**

Исследованию вопросов ПЛГ ВС, а также созданию математических моделей ТЭ ВС посвящен ряд научных работ, выполненных в МГТУ ГА, ГосНИИ ГА, МАИ, ЦАГИ и других научных организациях, часть из которых охватывают отдельные вопросы улучшения системы ПЛГ ВС с учетом БП в авиационных организациях.

Условно эти работы можно разделить следующие группы:

1. Обеспечение и ПЛГ ВС ГА.

2. Научно-методическое обеспечение процессов ПЛГ ВС и БАС с использованием информационных технологий.
3. Система подготовки авиационного персонала в области ГА.
4. Совершенствование контролепригодности ВС и их систем, создание и применение систем автоматизированного контроля и прогнозирования.
5. Формирование ЭТХ ВС ГА и мониторинг технического состояния ВС.

В работах [8, 10, 48] рассмотрено обеспечение и ПЛГ ВС ГА и обоснование конкретных предложений на основе теории управления случайными процессами различной природы, с использованием методов статистики, теории надежности и эффективности сложных систем.

В диссертации [10] рассмотрены вопросы повышения уровня ПЛГ и БП парка ВС Республики Таджикистан.

В исследовании [8] разработана методика определения размерно-весового облика беспилотного самолета с электрической силовой установкой в категории от 5 до 30 кг и обоснованы принимаемые технические решения на начальном этапе проектирования.

В работах [49, 50] исследовано повышение эффективности процедур ПЛГ ВС при ТЭ путём сокращения простоев и снижения затрат на ПЛГ ВС при ТЭ с учётом заданного уровня БП на основе единого научно-методического подхода к формированию процедур ПЛГ ВС с применением ИТ.

В работах [51, 52] рассматривается методика применения нейронных сетей для решения задач обнаружения объектов на изображениях с использованием открытой библиотеки Tensor Flow, а также рассмотрены возможности применения нейронных сетей для организации поиска информации во всемирном Web-пространстве.

В работе [53] разработаны теоретические основы и практические методы формирования и корректировки режимов ТО эксплуатируемых и перспективных отечественных ВС. Эти проблемы решались на основе международных нормативных документов в том числе с использованием MSG (Методика разработки программ ТО функциональных систем и конструкции ВС).

В работах [54, 55, 56] рассмотрено повышение эффективности кадрового обеспечения авиатранспортных предприятий, базирующееся на методологии модель-ориентированного подхода прогнозирования и оптимизации системы подготовки кадров в области эксплуатации воздушного транспорта, а также научно-обоснованного метода и алгоритмов выявления утомления специалистов авиационного персонала для повышения надежности их деятельности.

В работе [57] исследовали повышение достоверности диагностики авиационных ГТД на основе оптимального выбора методов диагностики с учетом информационного потенциала контролируемых параметров.

В авторефератах [58, 59] представлены вопросы сохранения ЛГ ВС в процессе их эксплуатации путем своевременного выявления предотказных состояний новых бортовых химических источников электроэнергии на основе непрерывного контроля и прогнозирования их ТС, повышении БП ВС за счет предотвращения аварийных режимов в электротехнических устройствах на основе оценки их теплового состояния.

В издании [60] рассматриваются вопросы теории и практики формирования, оценки и оптимизации ЭТХ ВС ГА на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ).

В работе [61] изучена технология эксплуатации АТ по состоянию, проведен анализ для решения проблемы оценки состояния образцов АТ, сформулированы требования к перспективной информационной системе мониторинга состояния ВС и АТ.

Проведённый анализ НПА Российской Федерации, научных работ по обеспечению и ПЛГ пилотируемых ВС и БАС указывают на необходимость поиска путей повышения эффективности систем ТЭ и ПЛГ БАС, в том числе, научно-методического обеспечения.

Рассмотренные выше подходы к обеспечению и ПЛГ пилотируемых ВС имеют ряд недостатков и существенные отличия применения для БАС:

- появление современных ИТ (ППО, нейросети, СУБД, цифровые двойники):

- внедрение в законодательные документы требований по обеспечению и поддержанию ПЛГ БАС [36, 38, 39, 40, 41, 62, 63];
- ранее не существовали процедуры сертификации организаций по ТО ВС (БАС) в качестве разработчика и изготовителя АТ;
- отсутствовали процедуры управления ЛГ ВС (БАС), оценки ТС БВС с помощью ИИ, цифровых двойников;
- для БАС снижены требования к вероятностям возникновения авиационных событий, в том числе катастрофическим, в связи с отсутствием человека на борту БВС [62];
- отсутствие в БВС систем жизнеобеспечения экипажа и пассажиров;
- возможность перевода БВС и всех его функциональных систем (ФС) на эксплуатацию по состоянию при полетах над безлюдной местностью;
- значительно возросшие летно-технические и эксплуатационно-технические характеристики БВС (возможность вертикального взлета и посадки, взлет с катапульт и приземление парашютным способом, возросшие возможности по дальности и продолжительности полета);
- упрощённые процедуры по сертификации типа и экземпляра БАС;
- возможность использования аддитивных технологий при ТЭ БВС.

В связи с этим в исследовании решаются задачи, направленные на совершенствование научно-методического обеспечения и ПЛГ БАС:

- анализ нормативно-правовой базы и научно-технической литературы по ПЛГ БАС;
- разработка рекомендаций по совершенствованию существующей системы эксплуатации и ПЛГ БАС в Республике Таджикистан;
- определение наиболее значимых факторов, влияющих на ПЛГ БАС;
- разработка концептуальной схемы системы ПЛГ БАС, позволяющей построить моделирующий алгоритм;
- разработка графа состояний ПЛГ БВС, который дает возможность проследить в динамике последовательность и частоту попадания БВС в различные состояния;

- на основе статистических данных обосновать выбор закона распределения для состояния «использование по назначению»;
- анализ трудоемкости ПТО для среднемагистральных самолетов российской регистрации с налетом от 10 000 до 30 000 часов и сравнение с БВС;
- обоснование необходимости системного подхода при построении моделирующего алгоритма системы ПЛГ БВС на основе полумарковских процессов, метода Монте-Карло (метод розыгрыша), теории графов, логико – комбинаторного анализа, планирования эксперимента, многофакторного анализа;
- разработка программы расчёта показателей эффективности системы ТЭ БВС на основе интегральной математической модели, которая позволяет:
  - оценивать фактическое выполнение плана налёта парка БВС;
  - анализировать исправность парка БВС с учетом параметров МТО;
  - анализировать влияние состояний парка БВС на эффективность системы ТО;
  - рассчитывать рациональную периодичность и продолжительность выполнения ПТО и ОТО БВС для заданных норм налета;
  - рассчитывать показатели удельных трудозатрат и продолжительности выполнения ТО на БВС;
- обоснование расчетных зависимостей вероятностей и интенсивностей при переходе из состояния в состояние для построения математической модели функционирования ПЛГ БАС с учётом ожидаемых условий в авиационной организации;
- создание СУБД по управлению летной годностью БАС в Microsoft Access;
- разработка процедур управления ЛГ БАС, оценка ТС БВС, их двигателей, актуализация и формирование локальных нормативных актов авиационных организаций с помощью нейросети;
- разработка метода применения нейросетей для актуализации локальных нормативных документов авиационной организации и оценки ТС ГТД;

- разработка методики формирования рациональной системы ТЭ парка БВС с использованием ППО на основе интегральной математической модели;

- разработка рекомендаций по организационно-техническому и технологическому сопровождению процессов обеспечения и ПЛГ.

В результате проведенного анализа ЛТХ БВС, нормативной документации по ПЛГ и сертификации БАС в диссертации приняты следующие допущения и ограничения:

- парк АТ составляет десять БВС самолетного типа с ГТД (ТРД, ТВД);
- планируемый налет в течение календарного периода (двенадцать месяцев) эксплуатации - до 36000 часов;
- безотказность ФС и БВС в целом определяется параметром потока отказов в диапазоне  $\omega_{о\text{ФС}} = 2,5 * 10^{-3} \dots 2,5 * 10^{-6}$ ;
- время полета БВС изменяется от 4 до 8 часов;
- максимальная взлетная масса БВС более 30 кг;
- безотказность, удельные продолжительность, трудоёмкость и стоимость пункта дистанционного управления БВС не рассматриваются.

## 1.6. Выводы по первой главе

1. Проведён анализ состояния БАС в ГА и актуальность действующей российской и зарубежной нормативной базы по БАС:

- представлена общая структура ГА в Республике Таджикистан и выявлены основные недостатки по ПЛГ БАС;

- на основе существующей системы пилотируемых ВС рассмотрена система сертификации типовой конструкции БАС, порядок выдачи СЛГ БАС.

2. В основу решения поставленной задачи положены методы теории сложных систем, математической статистики, теории вероятности, факторного анализа и оптимизации процессов.

## **Глава 2. Разработка информационной модели процессов лётной годности беспилотных авиационных систем**

### **2.1 Разработка информационно-управляющей системы ПЛГ БАС**

Приоритетным направлением [64] авиационной отрасли Российской Федерации является развитие беспилотной авиации.

Ключевыми решениями в этом направлении являются технологии зондирования и комплексной обработки информации для БАС, системы исходных данных для обучения нейронных сетей, создание и апробация алгоритмов для ПЛГ, программное обеспечение анализа окружающей обстановки и ТС БАС.

Первостепенным направлением может стать создание научно-технических центров, обеспечивающих научно-методическое обеспечение процессов лётной годности БАС.

Важной составляющей системы управления ЛГ БАС является элемент «критерии», определяемый целевой функцией. Зачастую в качестве критерия эффективности системы ЛГ БАС используют исправность парка, характеризующую коэффициентом исправности, удельной продолжительностью и трудоёмкостью ТО БАС.

Ключевыми решениями в этом направлении являются ИТ и комплексной обработки информации для БАС, исходных данных для обучения нейронных сетей, создание и апробация алгоритмов для ПЛГ, программное обеспечение анализа окружающей обстановки и ТС АТ.

К управлению ЛГ БАС относятся любая деятельность по разработке и осуществлению целенаправленных управляющих воздействий на процессы (объекты) ЛГ БАС, ориентированных на сохранение соответствия БАС действующим требованиям к ЛГ. В данном случае в управление ЛГ БАС включены процедуры создания и актуализации локальных НПА, результаты инспекций БАС с целью оценки их ЛГ, заключение проведённой инспекции неразрушающего

контроля (НК), процесс получения документа, удостоверяющего изменение ранее утвержденной типовой конструкции БАС (при наличии компетенций), итоги процесса сертификации организации по ТО, порядок оформления, хранения, учет и использование документации в системе управления ЛГ и др.

Для лучшего понимания функционирования системы управления ЛГ БАС, установления взаимосвязей между элементами системы разработана концептуальная модель управления лётной годностью БАС (рисунок 2.1).



Рисунок – 2.1. Структурная схема управления лётной годностью БАС:

I – блок ЛГ БАС, II – блок ТЭ БАС, III – блок информационной управляющей системы ЛГ БАС, X – входные параметры; Y – выходные параметры; G – факторы внешней среды; Z – целевые функции системы ЛГ БАС; СОК – средства объективного контроля; Центр Упр. ЛГ – центр управления лётной годностью; ИБД – информационная база данных

Эффективность выполнения задач планов налета авиационными организациями напрямую зависит от исправности парка БВС. В этом случае разумно определить целевую функцию для системы лётной годности БВС – «максимальная исправность».

$$b^* \in B: \{ P, C, U, F, S, D \} \longrightarrow \max K_{испр}$$

$B = b_1, b_2, \dots, b_n$  - множество решений, где  $b^*$  - наилучшее решение.

$P = \{ p \}$  – лётно-технические характеристики БАС;

$C = \{ c \}$  - параметры ТС БАС;

$F = \{ f \}$  - множество параметров, определяющих МТО системы ЛГ;

$S = \{ s \}$  - параметры определяющие стоимость эксплуатации БАС;

$D = \{ d \}$  - параметры, определяющие условия ТЭ БАС.

Для определения и прогнозирования состояния парка БВС, в том числе исправности АТ, в диссертации использованы полумарковские процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем [65].

Лётная годность БАС закладывается на этапах проектирования и изготовления, а поддерживается в процессе эксплуатации (рисунок 2.2).



Рисунок – 2.2. Факторы, влияющие на летную годность БАС

К основным процедурам ПЛГ следует отнести:

- сертификацию экземпляра БАС;
- разработку программы ТО БАС и поддержание её актуальности;
- выбор и контроль поставщиков услуг по ТО и МТО;

- ТО БАС и планирование ТО;
- управление и контроль модификаций (изменений конструкции) БАС;
- учёт и организация выполнения ДЛГ и сервисных бюллетеней;
- учёт и контроль агрегатов с ограниченным ресурсом;
- контроль массы и центровки БВС;
- выполнение осмотров БАС;
- организация контрольных облётов и др.

Для снижения неопределённостей системы ПЛГ БАС рекомендуется Организациям по ТО сертифицироваться в качестве разработчика и изготовителя АТ. Это мировой и российский тренд в авиационно-транспортной системе [66]. Одним из ключевых направлений может стать создание научно-производственных центров, обеспечивающих научно-методическое обеспечение процессов лётной годности БАС.

## **2.2 Процедуры ПЛ ГВС и безопасности полётов**

Система ПЛГ ВС базируется на актуализированной нормативно-правовой документации (международной и национальной), научно-методическом обеспечении (прикладном программном обеспечении, цифровых двойниках и др.) и зависит от уровня развития средств диагностики и контроля ТС АТ, методов и режимов ТО АТ, планирования ТО и др.

При разработке концептуальной модели системы ТЭ и ПЛГ использовались подходы на основе полумарковских процессов и теории графов.

В Приложениях к Конвенции о международной гражданской авиации [67, 68] определены процедуры сертификации и ПЛГ ВС, управление БП, в том числе, для БАС. Создание специализированной системы сертификации БАС с учётом риск ориентированного подхода в зависимости от типа ВС и ОУЭ определены в руководящих документах [66, 69].

Решение задач ПЛГ ВС требует от всех участников авиационно-транспортной системы научно обоснованного подхода, а факторы, влияющие на процессы и процедуры ПЛГ АТ – детального анализа (рисунок. 2.1).

Для эффективного функционирования системы управления ЛГ БАС следует использовать актуальные нормативные акты, апробированные математические модели, сертифицированное ППО.

На процесс ПЛГ ВС значительное влияние оказывают ЭТХ, МТО, процедуры оценки надёжности, оценка ТС БВС.

### **2.3 Информационные технологии, используемые в управлении процессами жизненного цикла АТ и документационном обеспечении**

Для эффективного управления процессами ПЛГ в течение жизненного цикла АТ используются различные информационные технологии:

- CALS – технологии (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) – информационная поддержка МТО и жизненного цикла АТ;

- PLM – технология (Product Lifecycle Management) – это подход к управлению жизненным циклом продукта.

- SCORM – (Sharable Content Object Reference Model) – сборник спецификации и стандартов для дистанционного обучения.

Структура и величина затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию БАС носит сложный стохастический характер.

Срок службы ВС может составлять до 60-70 лет, а затраты на ПЛГ АТ, как правило, значительно превышают затраты на их создание.

Эти требования отражены в различных международных и российских документах [70, 71] и должны включать:

- разработку концепции системы технической эксплуатации (СТЭ) с учетом ОУЭ авиационных изделий;

- получение и систематизацию сведений о конструкции, особенностях функционирования и ТЭ изделия и его составных частей (СЧ), необходимых для создания элементов СТЭ, включая данные о надежности и других ЭТХ изделия, о характеристиках других элементов СТЭ и т.п., планируемых к использованию для ТЭ изделия;

- проведение анализа логистической поддержки (АЛП) с формированием базы данных о БД АЛП, а также документирование результатов АЛП путем построения отчетов из БД АЛП в необходимых форматах;

- использование результатов и БД АЛП для решения других задач интегрированной логистической поддержки (ИЛП);

- оценку стоимости ЖЦ изделия и его СЧ, в том числе затрат на ТЭ и МТО;

- проверку эксплуатационно-экономической эффективности изделия в формируемой или существующей СТЭ (в том числе достигнутых уровней ЭТХ в зависимости от характеристик конструкции изделия и элементов его СТЭ) и оценку соответствия показателей заданным требованиям.

Технология ИЛП представляет собой комплекс методов [72, 73], средств и процессов, используемых для управления ЭТХ на стадиях ЖЦ изделия путем создания и сопровождения СТЭ, обеспечивающей решение поставленных задач, и включает в себя следующие основные виды деятельности (рисунок 2.3):

- АЛП, включая планирование ТО изделия и его МТО, и формирование БД АЛП для ее использования при решении других задач ИЛП;

- разработку и сопровождение эксплуатационной документации (ЭД) и руководящих документов (РД);

- разработку требований и рекомендаций к инфраструктуре СТЭ и средствам ТО, необходимым для ТЭ изделия;

- разработку требований к численности, специализациям и квалификации авиационного персонала, планирование и содействие в проведении подготовки персонала;

- планирование хранения, транспортирования и утилизации изделий;

- мониторинг ЭТХ изделия и других параметров СТЭ при испытаниях изделия и на стадии его эксплуатации (а также при необходимости в процессе капитального ремонта) с внесением необходимых изменений в БД АЛП [73].



Рисунок 2.3 – Состав интегрированной логистической поддержки

В процессе разработки ВС при создании эксплуатационной документации используется стандарт ASD S1000D (AeroSpace and Defence).

**CALS** заключаются в следующем: поддержка всех этапов ЖЦ АТ, широкое использование ИТ, снижение стоимости всех стадий ЖЦ АТ, повышение эффективности эксплуатации АТ.

К недостаткам **CALS** технологий следует отнести большие массивы информации и сложность взаимодействия между разработчиками, изготовителями и эксплуатантами ВС.

### Основные понятия о PLM-технологии

PDM (Product data management) и PLM это программы, где используется, основные функции модуля – структура управления данными об изделии.

Основная идея PLM-технологии заключается в управлении изделием от этапа создания и до утилизации: проектирования, разработка математических моделей и цифровых двойников изделий, анализ ТС в процессе эксплуатации.

## 2.4 Разработка информационной базы данных обеспечения и ПЛГ беспилотных авиационных систем. Описание базы данных

Созданная система управления базами данных (СУБД) [12], именуемая «База данных управления летной годностью беспилотных авиационных систем», разработана в Microsoft Access и представляет собой модульную структуру, включающую пять взаимосвязанных функциональных компонентов, позволяет реализовать полнофункциональное приложение информационной базы данных (ИБД) (рисунок 2.4, 2.5) и включает:

- формы для ввода/редактирования информации,
- таблицы для хранения данных,
- запросы для выборок и логики,
- отчёты и визуализацию,
- встроенный VBA-код для расчётов и автоматизации.

Для актуализации и верификации разработанную ИБД рекомендуется включить в Центральную нормативно-методическую библиотеку ГА [74] и реестр программ научно-производственных центров БАС.

Разработанная ИБД, состоит из отдельных подсистем:

1. Блок 1 **«Нормативная база»** (рисунок 2.4), включающий актуализированную международную и российскую нормативную базу.

Такие значимые локальные нормативные акты, как РОТО, могут и должны совершенствоваться и актуализироваться с помощью современных информационных технологий.

2. Блок 2 **«Система обработки информации»** (рисунок 2.4) включает математические модели, ППО и др.

3. В подсистеме оценки ТС БАС **«Оценка ТС БАС»** (рисунок 2.4) хранится информация средств объективного контроля (СОК), служащая основой для анализа ЛГ БВС, материалы неразрушающего контроля (НК), ЛТХ достигнутые в процессе эксплуатации и т.д.

4. Блок «**Инфраструктура БАС**», (рисунок 2.4) включает сведения о наличии производственных помещений, площадок для размещения и хранения БВС, сил и средств инженерно-авиационной службы (ИАС). Важное место занимает входной контроль компонентов и материалов, выполняемых испытательными лабораториями.



Рисунок 2.4 – Блок-схема информационного база данных летной годности БАС

5. Блок «**Инжиниринг ЛГ БАС**» (рисунок 2.4) состоит из методик и ППО для оценки эффективности процесса технической эксплуатации (ПТЭ) БАС на основе полумарковских процессов, алгоритмов управления данными, системы управления качеством ПЛГ БАС, СУБП, управления обучением авиационного персонала, сопровождение истинности ИБД, экспертной системы, фреймов, представляющих инженерию знаний (структура, содержащая описание объекта в виде атрибутов и их значений).

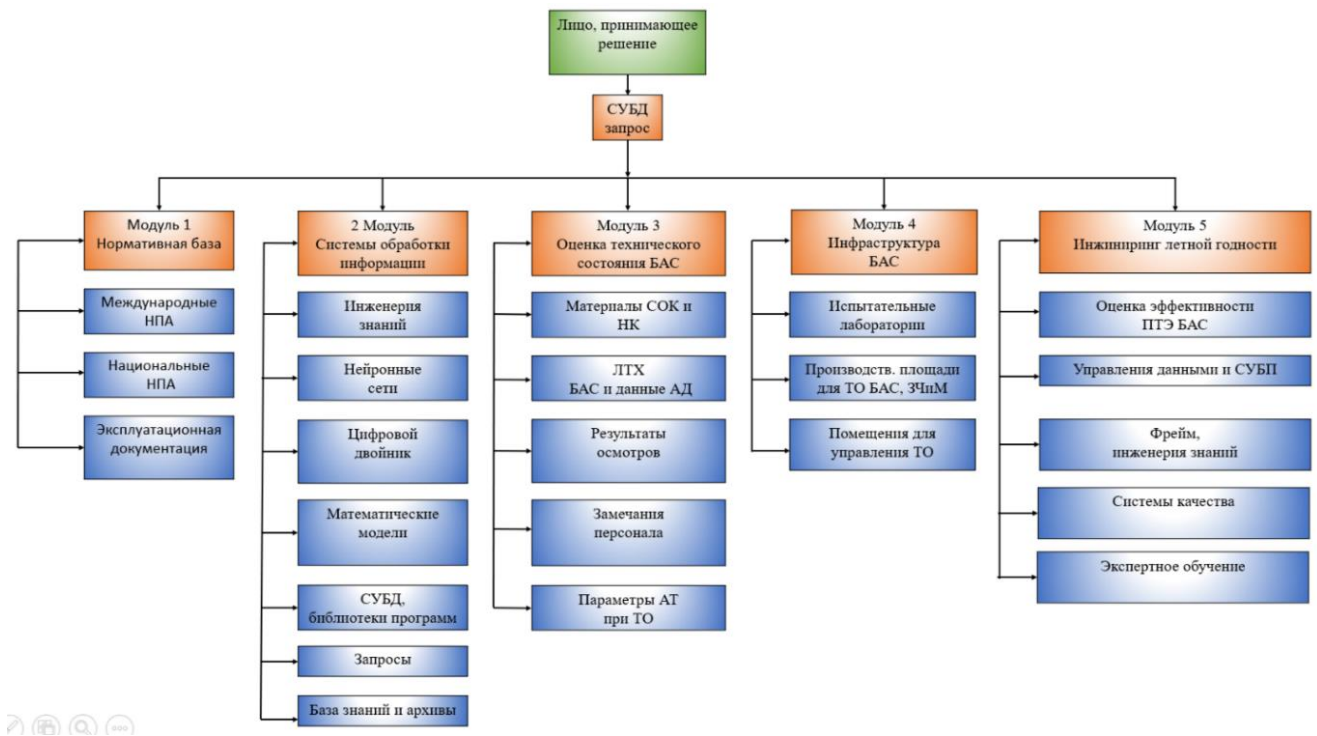


Рисунок 2.5 – Структурная схема взаимосвязанных функциональных компонентов ИБД летной годности БАС

Взаимодействие между элементами разработанной ИБД происходит в рамках локального сервера внутри авиационной организации по схеме, отображенной на рисунке 2.6:



Рисунок 2.6 – Схема локальной сети информационной базы данных ЛГ БАС

## Логика взаимодействия модулей информационной базы данных летной годности БАС

Каждый модуль выполняет свою роль в сопровождении ЛГ БАС, при этом все модули объединены единой архитектурой и ключевыми связующими элементами: моделью БВС, агрегатами, нормативными документами и параметрами ТС.

Главная кнопочная форма СУБД представлена на рисунке 2.7.

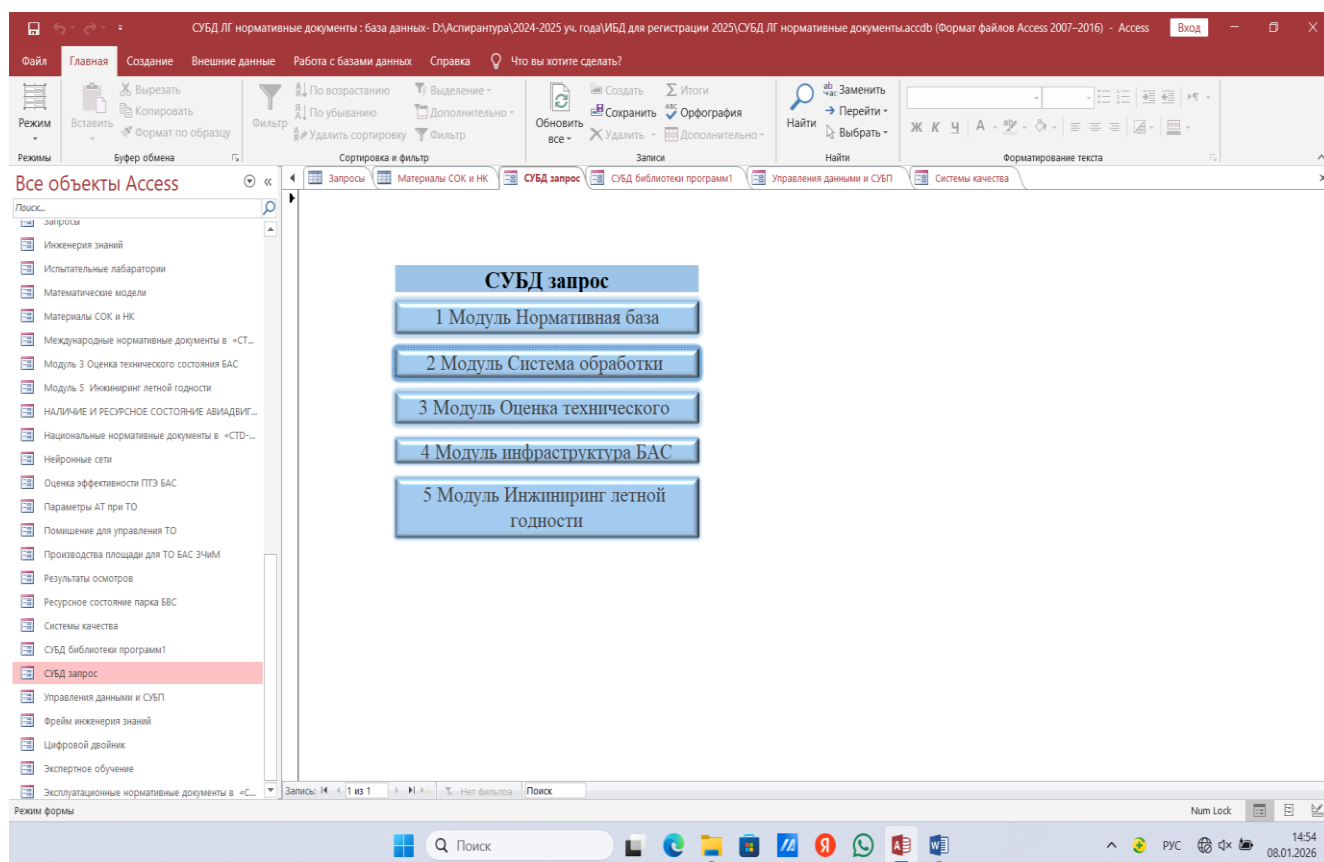


Рисунок 2.7 – Главная кнопочная форма СУБД «База данных управления летной годностью беспилотных авиационных систем»,

**Модуль 1. Нормативная база** является регуляторной основой всей системы. Все объекты ИБД — от цифровых моделей и алгоритмов до инфраструктурных зон и инженерных заключений — ссылаются на нормативные документы, хранящиеся в этом модуле. Каждый документ имеет уникальный идентификатор, тип, дату, статус, текстовую аннотацию и файл в формате PDF. Ключевой элемент — таблица

*Применимость НПА*, которая обеспечивает связку конкретных нормативов с моделями БВС и контролируемые агрегатами. Модуль служит входной точкой для формирования всех требований, ограничений и допустимых диапазонов параметров.

**Модуль 2. Система обработки информации** обеспечивает загрузку, хранение и анализ цифровых двойников (3D-моделей), математических моделей, нейросетевых алгоритмов и данных эксплуатации. Он использует идентификаторы моделей БВС и нормативных документов из Модуля 1, формирует эталонные цифровые профили и предоставляет их для анализа в Модуле 3. Выходные файлы (графики, прогнозы, отклонения) передаются также в Модуль 5 для принятия инженерных решений. Основные связи – с Модулем 1 (по полю `Связанный_НПА_ID`), Модулем 3 (по агрегатам и моделям) и Модулем 5 (по результатам аналитики).

**Модуль 3. Оценка технического состояния** содержит таблицы с результатами НК, СОК, параметров ТС БВС и лётных характеристик. Он сравнивает фактические значения с эталонными, полученными из Модуля 2, и использует нормативные данные из Модуля 1. Каждое отклонение фиксируется, привязывается к конкретной модели и агрегату, и формирует вход для инженерного анализа в Модуле 5. Также используется информация из Модуля 4 о зоне, в которой проводился контроль.

**Модуль 4. Инфраструктура БАС** отражает реальные условия, в которых выполняется ТО. Он содержит справочник ангаров, лабораторий, оборудования и запасные части, инструменты, принадлежности (ЗИП), а также условия выполнения работ (вентиляция, огнеопасность, освещённость и пр.). Связан с Модулем 3 через процедурный контроль (какие виды контроля можно выполнить в какой зоне), с Модулем 5 — через оценку условий выполнения ТО, и с Модулем 1 – через требования нормативов к месту проведения работ.

**Модуль 5. Инжиниринг лётной годности** агрегирует данные со всех предыдущих модулей. Он обеспечивает формирование инженерных заключений, оценку эффективности программ ПТЭ и доработок, ведение реестров экспертиз, аудитов и рекомендаций. Модуль обрабатывает аналитические данные из

Модуля 2, результаты технических проверок из Модуля 3, информацию об условиях выполнения из Модуля 4, а также нормативные основания из Модуля 1. Здесь формируется вывод: требуется ли доработка, продление ресурса, корректировка документации или обучение персонала.

### **Сквозная логика взаимодействия**

- **Модель БВС** является центральным объектом всех модулей: каждый агрегат, контроль ТС, руководства по эксплуатации, инфраструктура и выводы соотносятся с конкретной моделью.
- **Ключевые поля связи** — ID\_модели\_БВС, ID\_агрегата, ID\_НПА — используются в таблицах всех модулей.
- **Формы и подформы в Access** должны обеспечивать возможность перехода от модели к применимым нормативам, от нормативов к алгоритмам и процедурам, а от результатов контроля к выводам и решениям.
- Все модули используют **единые справочники** и обеспечивают **сквозной цикл сопровождения летной годности БАС** – от анализа нормативной базы до принятия инженерных решений.

### **Модуль 1. «Нормативная база»**

- Назначение: Основной задачей модуля является хранение, фильтрация, контроль актуальности и практическая применимость нормативных документов (ФАП, ГОСТ, Приложения ИКАО и др.) в контексте сопровождения летной годности БАС (рисунок 2.8, 2.9, 2.10).

Функции Модуля 1. «Нормативная база»:

- каталогизация ФАП, ГОСТ, НЛГ, сервисных бюллетеней и прочего;
- поиск, фильтрация и обновление по дате, теме, статусу;
- привязка документов к моделям БВС, процедурам ТО и мероприятиям ПТЭ;
- сохранение PDF-файлов и обеспечение гиперссылок для доступа;
- связь с другими модулями через справочники, ID и параметры применимости.

**Модуль включает:**

- таблицу нормативных документов с расширенным составом полей;
- журнал версий и истории изменений;
- связки между НПА и техническими узлами/процедурами;
- фильтры по обязательности, типу, дате и применимости;
- систему напоминаний об актуализации;
- возможность экспорта перечня применимых НПА по конкретному БВС

или операции ТО.

#### **Реализация в Access:**

- Таблица НПА (ID, Название, Тип\_НПА (ФЗ, ФАП, ГОСТ / ГОСТ Р, Постановления Правительства РФ, Приказы Минтранса, Методические рекомендации (МР), НЛГ, документы ИСАО, эксплуатационно-техническая документация (ЭТД), научно-технические документы (статьи, Сертификаты соответствия / одобрения, инструкции по ТО, ТУ, конструкторская документация (КД), программы и методики испытаний (ПМИ)), формуляры / паспорта изделий, руководства по безопасности / СУБП, ДЛГ, сервисные бюллетени), файл PDF, статус).

- Форма **Обзор НПА** — отображает документы, возможность фильтрации по типу (нац/межд/экспл), поиск по ключевым словам.

- Запрос Просроченные документы — показывает устаревшие НПА.

- Внедрение ИИ возможно через связку с Python-скриптами (или Copilot в будущем), которые аннотируют документы, сохраняют результаты в таблицу.

Для каждой модели БВС в системе реализована связка с применимыми ДЛГ, бюллетенями и методическими указаниями. Это позволяет формировать индивидуальные перечни обязательных НПА, контролировать статус внедрения изменений и своевременно адаптировать процедуры ТО под конкретную конструкцию.

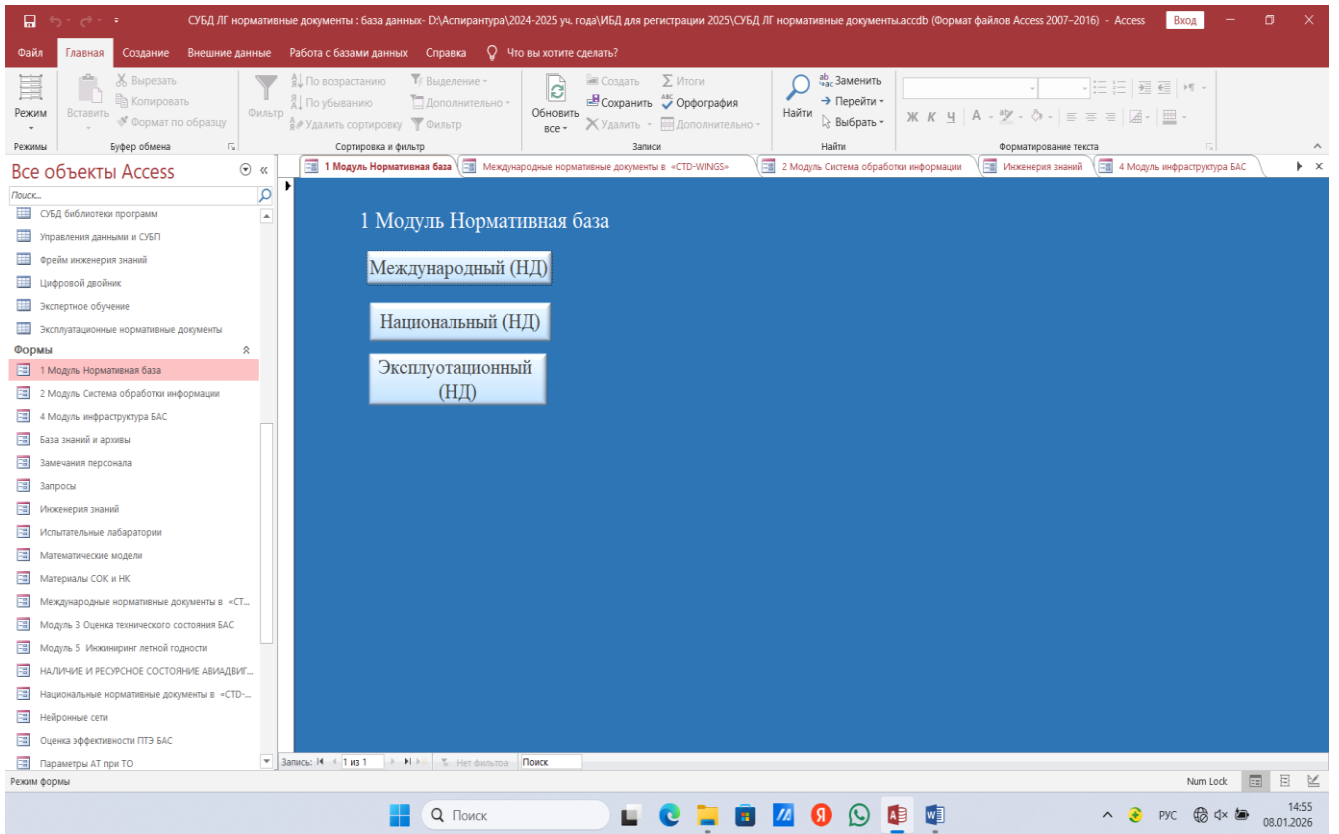


Рисунок 2.8 – Форма «Нормативная база»

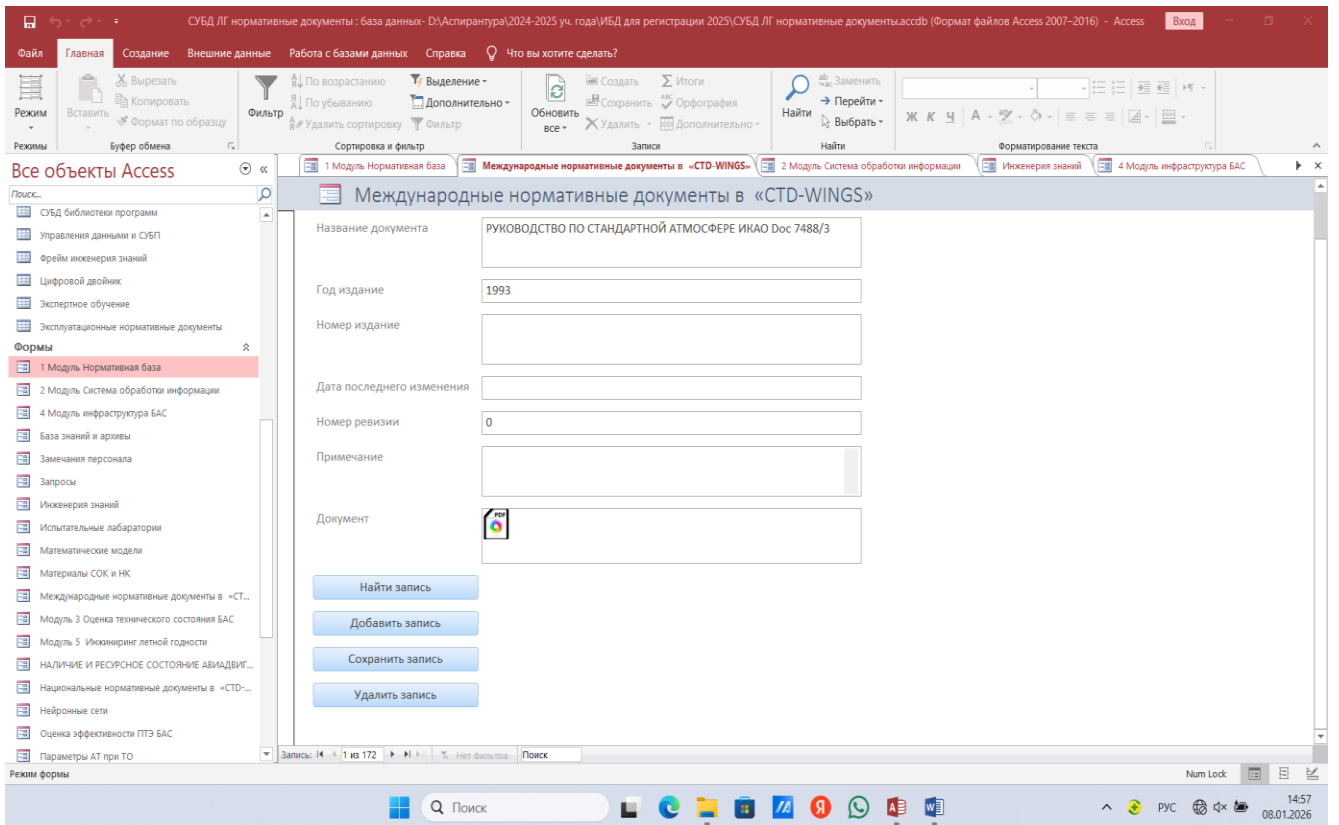


Рисунок 2.9 – Форма «Международные нормативные документы»

№ п/п	Название документа	Кем утверждено	Год издания	Номер изда	Дата послед	Дата ревизи	Причины из	Примечание
2	ПРОГРАММА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ф. ул. Пилотов дом 18			ПТО: SDM.RRJS				0(1)
3	САМОЛЁТ RRU-95 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПЛАИ ф. ПАО "Яковлев"		2024	009	0	0		0(1)
4	ИСХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЛАНОВОМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ф. ПАО "Корпорация"		2021	8	0	0		0(1)
5	герметизация топливных и воздушных отсеков Президент ЗАО ГСС		2012	233	0	0		0(1)
6	АММ 70_С_081		2015		0	0		0(1)
7	АММ 71_С_081		2015		0	0		0(1)
8	АММ 72_С_081		2015		0	0		0(1)
9	АММ 73_С_081		2015		0	0		0(1)
10	АММ 74_С_081		2015		0	0		0(1)
11	АММ 75_С_081		2015		0	0		0(1)
12			0		0	0		0(0)
13			0		0	0		0(0)

Рисунок 2.10 – Перечень эксплуатационной НПА СУБД

## Модуль 2. «Системы обработки информации»

### 1. Назначение и цели модуля

Модуль 2 предназначен для хранения, обработки и анализа технической информации, связанной с ПЛГ БАС. Он выполняет функцию интеллектуального ядра ИБД, обеспечивая интеграцию цифровых моделей, баз знаний, нейросетевых механизмов предиктивной диагностики и архивов эксплуатационных данных. Модуль играет важную роль в автоматизации оценки ТС и формировании цифровых двойников БАС.

### 2. Основные функции модуля

- хранение цифровых двойников планера, силовой установки, агрегатов и узлов БАС;
- интеграция математических моделей, используемых при проектировании и диагностики;
- поддержка и запуск нейросетевых алгоритмов прогнозирования ТС;

- обработка параметров телеметрии, наработки и эксплуатационных режимов БВС;
- формирование базы знаний и библиотеки инженерных шаблонов;
- поддержка промт-запросов и выполнение аналитических скриптов;
- архивирование, индексация версии данных эксплуатации и диагностики;

### **3. Структура таблиц и связей**

В модуле реализуются следующие ключевые таблицы (рисунок 2.11):

- цифровые двойники (ID, Модель\_БВС, Тип\_агрегата, Файл\_модели, Версия, Примечание);
- математические модели (ID, Название\_модели, Объект, Файл\_модели, Автор, Связанный\_НПА\_ID);
- нейросетевые алгоритмы (ID, Название, Назначение, Файл\_модели, Область\_применения, Версия, Активность);
- эксплуатационные данные (ID, Дата, БВС\_ID, Параметр, Значение, Ед\_изм, Источник);
- база знаний (ID, Название, Тип\_записи, Категория, Содержание, Автор, Ссылка\_на\_НПА).

### **4. Связи с другими модулями ИБД**

- с модулем 1 «Нормативная база»: привязка математических моделей и алгоритмов к конкретным нормативным документам;
- с модулем 3 «Оценка ТС»: предоставление эталонных цифровых моделей и параметров для сопоставления с фактическими значениями;
- с модулем 5 «Инжиниринг ЛГ»: передача аналитических выводов, прогнозов и сценариев эксплуатации для принятия инженерных решений и проведения экспертиз.

### **5. Интерфейс и пользовательские функции**

Модуль должен обеспечивать пользователю (инженеру) следующие возможности:

- просмотр и загрузку цифровых моделей (3D, расчетные схемы) по типу агрегата или модели БВС;
- запуск и визуализацию предиктивного анализа по загруженным данным;
- поиск и фильтрацию записей по объекту, дате, алгоритму, отклонениям;
- экспорт результатов анализа в Excel и Word;
- регистрацию новой модели/алгоритма и её верификация;
- просмотр истории обработки данных и версий моделей.

## 6. Технические требования

Реализация осуществляется на платформе Microsoft Access с использованием форм, подформ, макросов, модулей VBA и встроенного редактора выражений. Должна быть обеспечена защита от несанкционированного доступа, верификация полей, резервное копирование и интеграция с модулем 1.

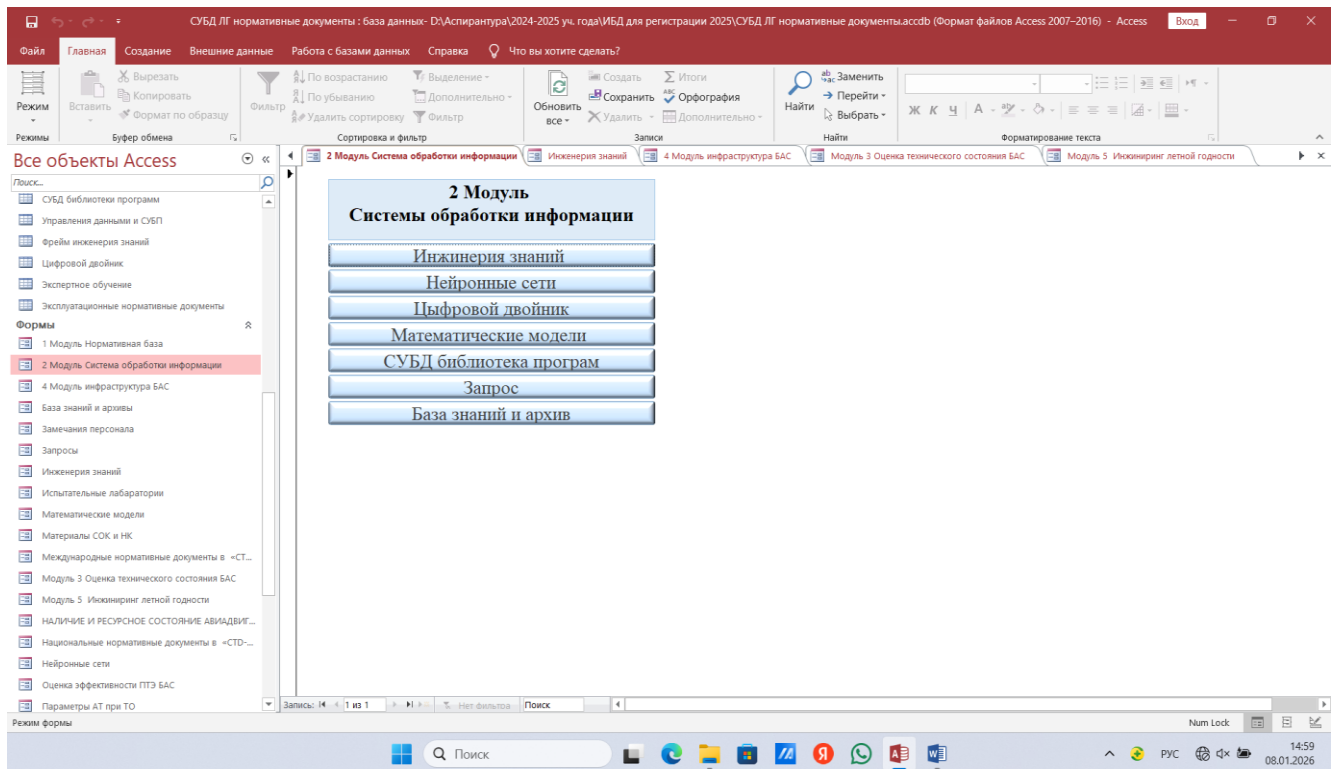


Рисунок 2.11 – Форма модуля 2 «Системы обработки информации»

### Модуль 3. «Оценка технического состояния»

#### 1. Назначение и цели модуля

Модуль 3 предназначен для сбора, анализа и визуализации данных о ТС элементов БАС. Он обеспечивает оценку соответствия фактических параметров нормативам, ведение карт состояния, регистрацию результатов контроля и принятие решений о дальнейшей эксплуатации, ремонте или выводе агрегатов из эксплуатации. Также модуль должен поддерживать системы управления технической эксплуатацией и обслуживанием (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Схема модуля оценки ТС БАС

#### 2. Основные функции модуля (рисунок 2.13, 2.14, 2.15):

- регистрация результатов СОК, НК, дефектации, инспекционных осмотров;
- хранение ЛТХ и диагностических параметров;
- создание технической карточки агрегата/БАС с привязкой к цифровому двойнику;
- оценка отклонений от нормативов и генерация предупреждений;

- анализ трендов и динамики параметров по времени;
- отображение уровня технической пригодности в графическом или табличном виде;
- связь с планами ТО и рекомендациями по доработкам АТ;
- учёт замечаний инженерного состава.

### **3. Структура таблиц и связей**

Предлагаемые ключевые таблицы модуля:

- карточки ТС (ID, БВС\_ID, Агрегат, Дата контроля, Параметр, Значение, Метод контроля, Состояние, Комментарий);
- результаты контроля (ID, Вид\_контроля, Дата, Исполнитель, Методика, Файл отчета, Привязка к агрегату);
- отклонения ТС (ID, Карточка ТС\_ID, Порог, Фактическое, Уровень опасности, Рекомендации);
- замечания инженеров (ID, Объект, Автор, Текст, Дата ввода);
- история эксплуатации (ID, БВС\_ID, Дата, Событие, Пробег, Нарботка, Примечание).

### **4. Связи с другими модулями ИБД**

- Модуль 1: нормативные значения предельных параметров и методики НК используются для сопоставления с текущими данными;
- Модуль 2: цифровой двойник предоставляет эталонные значения для сравнения и анализа;
- Модуль 4: план ТО и доступность оборудования проверяются перед выполнением контроля;
- Модуль 5: передача аналитических результатов в экспертную систему и сопровождение заключений.

### **5. Интерфейс и пользовательские функции**

- ввод и редактирование данных контроля через формы и шаблоны;
- автоматическое сравнение параметров с нормами и визуальная индикация отклонений;

- фильтрация по дате, агрегату, критичности, типу контроля;
- генерация отчёта о техническом состоянии с выводом в PDF/Excel;
- отображение графика изменения параметров с возможностью анализа тренда;
- связь с карточкой цифрового двойника и просмотр архивов контроля.

## 6. Технические требования

Модуль реализуется в среде Microsoft Access с использованием связанных таблиц, форм, встроенных фильтров, макросов и VBA. Обеспечивается ведение истории изменений, защита от удаления данных без прав, резервное копирование, контроль целостности данных. Модуль должен работать автономно, но быть полностью интегрирован с ИБД и другими его модулями.

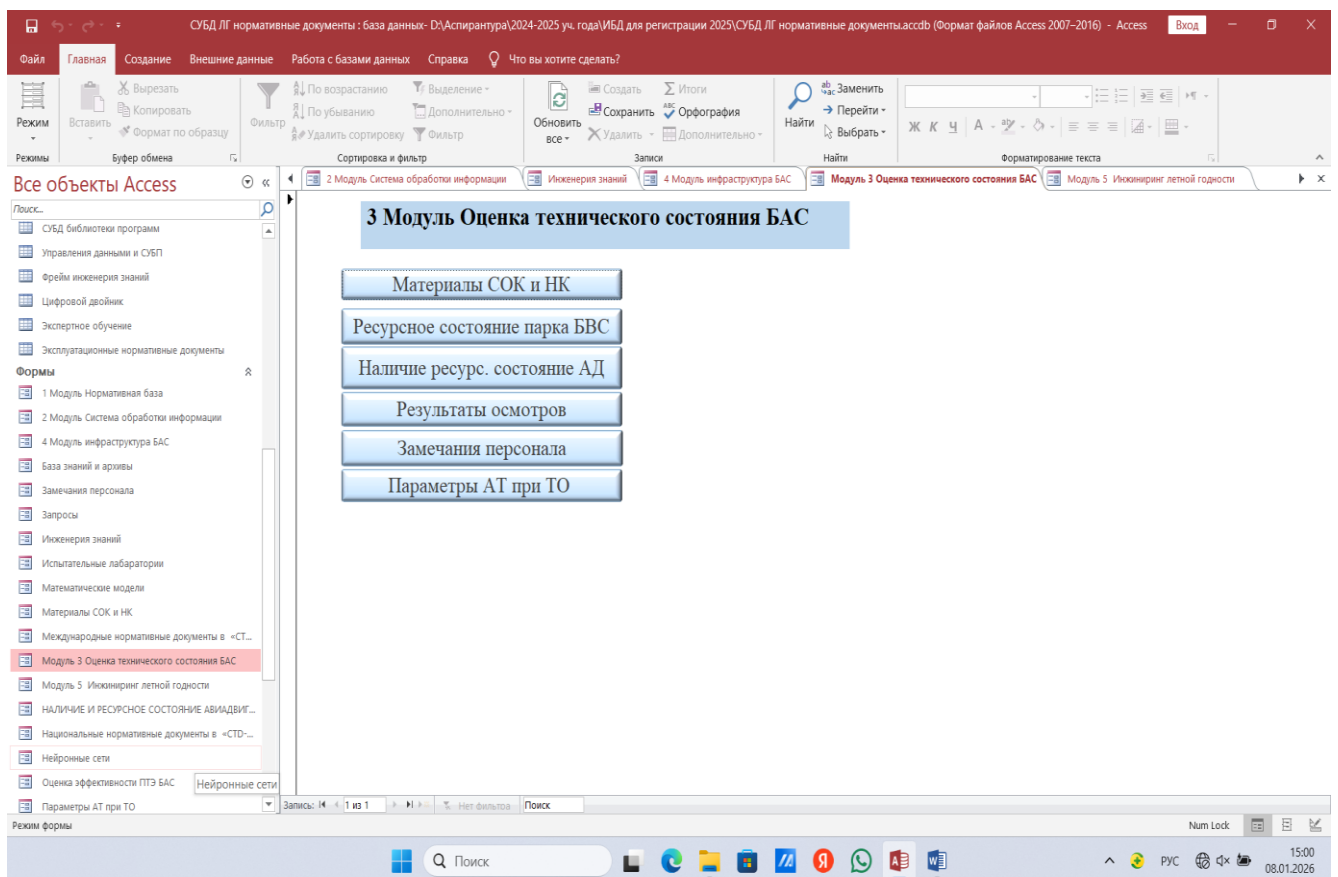


Рисунок 2.13 – Форма модуля 3 «Оценка технического состояния БАС»

нормативные документы : база данных- C:\Users\ASUS ExpertBook\AppData\Local\Temp\adfe0267-a26e-43f9-8f8b-bd09e0696366\_нд.zip.366\nормативные документы.accdb (Формат файлов Access 2007-2016) (то... Ввод

Главная Создание Внешние данные Работа с базами данных Справка Что вы хотите сделать?

Режим Вставить Вырезать Копировать Вставить Формат по образцу Буфер обмена Фильтр По возрастанию По убыванию Удалить сортировку Фильтр Сортировка и фильтр Обновить все - Удалить Дополнительно - Записи Найти Перейти - Выбрать - Ж К Ц А - Форматирование текста

ТОЛЬКО ЧТЕНИЕ БД открыта для чтения. Данные изменяются с помощью связанных таблиц. Для изменения структуры сохраните копию БД. Сохранить как...

Все объекты Access

Формы

1 Модуль 3 Оценка технического состояния БАС

НАЛИЧИЕ И РЕСУРСНОЕ СОСТОЯНИЕ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

№ п/п	<input type="text"/>	час ППР 9	<input type="text"/>
Тип и серия 1	PW127J	цикл ППР 10	<input type="text"/>
Заводской номер 2	PCE-EA0093	Остаток ресурса 11-12	<input type="text"/>
Дата изготовления 3	27.12.07	час ОР 11	4353
Страна производства	<input type="text"/>	цикл ОР 12	12687
Сухая масса,кг	<input type="text"/>	Регистр № БВС (или место нахождения) 13	<input type="text"/>
Тяга на взлеты	<input type="text"/>	Примечание 14	<input type="text"/>
Количество ремонтов 4	-		
Дата последнего ремонта 5	-		
Завод последнего ремонта 6	-		
Наработка СНЭ 7-8	<input type="text"/>		
час СНЭ 7	2647		
цикл СНЭ 8	2313		

Найти запись  
Добавить запись  
Сохранить запись  
Удалить запись

Записи: 14 из 38

24°C Mostly cloudy 12:57 19.07.2025

Рисунок 2.14 – Форма «Наличие и ресурсное состояние авиационных двигателей»

нормативные документы : база данных- C:\Users\ASUS ExpertBook\AppData\Local\Temp\adfe0267-a26e-43f9-8f8b-bd09e0696366\_нд.zip.366\nормативные документы.accdb (Формат файлов Access 2007-2016) (то... Ввод

Главная Создание Внешние данные Работа с базами данных Справка Что вы хотите сделать?

Режим Вставить Вырезать Копировать Вставить Формат по образцу Буфер обмена Фильтр По возрастанию По убыванию Удалить сортировку Фильтр Сортировка и фильтр Обновить все - Удалить Дополнительно - Записи Найти Перейти - Выбрать - Ж К Ц А - Форматирование текста

ТОЛЬКО ЧТЕНИЕ БД открыта для чтения. Данные изменяются с помощью связанных таблиц. Для изменения структуры сохраните копию БД. Сохранить как...

Все объекты Access

Формы

Материалы СОК и НК

№ п/п	<input type="text"/>
Наименование документа	Результаты НК двигателя BSI_CFM56-3 BSI REPORT pos 1 esn 721870 (1)
год издания	2016
документ	

Записи: 14 из 6

24°C Mostly cloudy 12:59 19.07.2025

Рисунок 2.15 – Форма «Материалы СОК и НК»

## Модуль 4. «Инфраструктура БАС»

### 1. Назначение и цели модуля

Модуль 4 предназначен для учета, анализа инфраструктуры, задействованной в ТО, хранении, транспортировке и ремонте БАС (рисунок 2.16). Он обеспечивает документированную привязку используемых производственных мощностей, испытательных стендов, лабораторий и технологического оборудования к эксплуатационным процедурам и нормативным требованиям. Также модуль позволяет учитывать условия выполнения работ, доступность зон, опасные и специальные условия (огнеопасность, сварка и т.п.).

### 2. Основные функции модуля:

- формирование справочника производственных площадок, ангаров, лабораторий;
- учёт оборудования, ЗИП, верстаков, испытательных установок;
- хранение данных по условиям доступа (допуски, температурные, вентиляционные и др.);
- связь инфраструктуры с конкретными процедурами ТО, видами контроля БАС;
- регистрация ограничений на использование зон (ТО, сварка, электроустановки, изготовление изделий из композитных материалов);
- отслеживание занятости зон, календарного планирования работ и маршрутов ТО;
- формирование карты распределения ресурсов по объектам.

### 3. Структура таблиц и связей

Предлагаемые ключевые таблицы модуля:

- инфраструктура\_объектов (ID, Название, Тип, Локация, Ответственный, Доступность, Категория\_работ);
- оборудование ЗИП (ID, Название, Привязка\_к\_зоне, Назначение, Состояние);
- условия работ (ID, Объект\_ID, Тип\_условия, Значение, Комментарий);

- распределение зон (ID, Дата, Зона, Назначение, Исполнитель, Занятость);
- связь с ТО (ID, Зона\_ID, Вид\_ТО, Требуемое\_оборудование).

### Условия, ограничения.

## 4. Связи с другими модулями ИБД

- Модуль 1: нормативные требования к условиям ТО, производственным помещениям, допускам персонала.
- Модуль 3: привязка процедур оценки ТС и НК к зонам и средствам контроля.
- Модуль 5: передача информации о среде выполнения работ в систему оценки рисков и качества.
- Модуль 2: интеграция данных о местах и параметрах контроля в архив технического анализа.

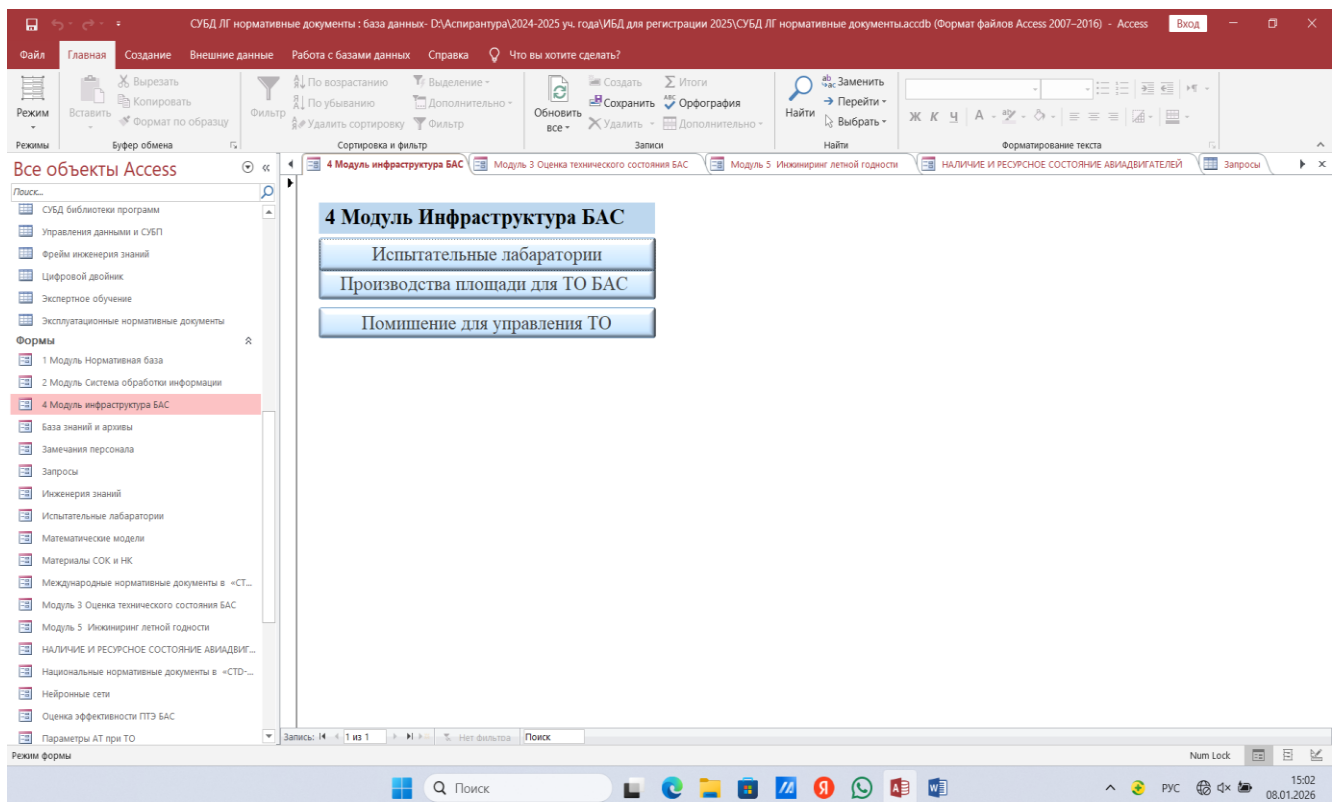


Рисунок 2.16 – Форма модуля 4 «Инфраструктура BAS»

## 5. Интерфейс и пользовательские функции:

- формы регистрации объектов инфраструктуры и привязки к видам работ;

- интерактивная карта занятости зон по датам и задачам ТО;
- автоматическая проверка на соответствие условий выполнения ТО и технологических операций;
- отчеты о наличии и состоянии оборудования и ЗИП;
- фильтрация по типу зоны, виду работы, уровню допуска;
- история использования зон и учёт нагрузок по месяцам.

## **6. Технические требования**

Рекомендуется предусмотреть резервное копирование, поддержку справочников оборудования, и модульные фильтры по типу объекта.

### **Модуль 5. «Инжиниринг лётной годности»**

#### **1. Назначение и цели модуля**

Модуль 5 предназначен для сопровождения инженерных решений, оценки эффективности программ ПТЭ и модернизаций, ведения экспертиз, управления знаниями и соответствием требованиям нормативной документации. Он обеспечивает целостность процессов инженерной поддержки ЛГ, в том числе контроль за качеством, безопасностью и документированием решений. Также модуль служит связующим звеном между аналитическими, нормативными и эксплуатационными элементами ИБД.

#### **2. Основные функции модуля (рисунок 2.17, 2.18, 2.19):**

- оценка эффективности внедрённых мероприятий по ЛГ (включая нейросетевой анализ, ПТЭ);
- формирование и хранение инженерных заключений, отчётов по ПТЭ и сопровождения решений;
- управление системами менеджмента качества (СМК), СУБП и внутренним аудитом;
- ведение реестра экспертов и участников инженерных комиссий;
- привязка экспертных решений к нормативной базе и результатам анализа ТС БВС;

- анализ рисков и рекомендаций по предупреждающим и корректирующим действиям;
- организация и контроль инженерного обучения и повышения квалификации персонала.

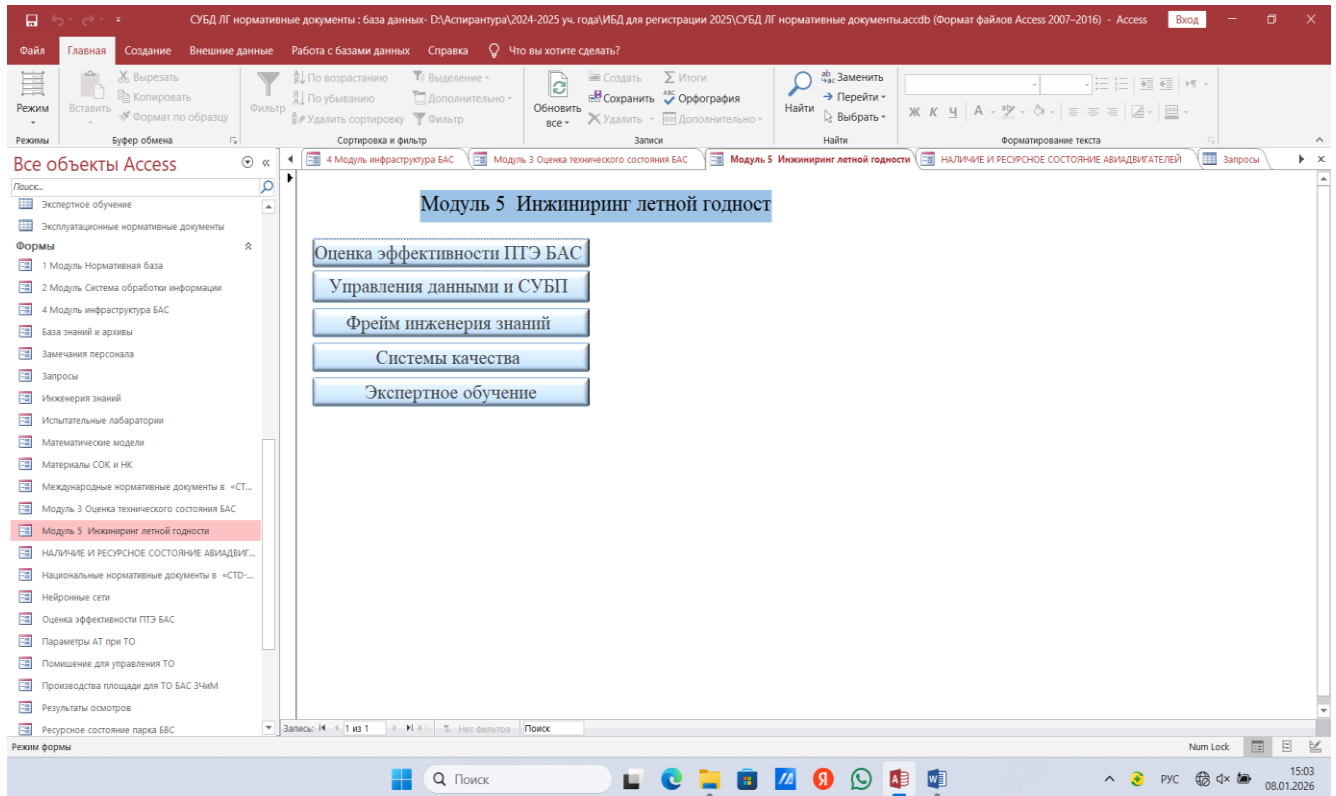


Рисунок 2.17 – Форма модуля 5 «Инжиниринг летной годности»

### 3. Структура таблиц и связей

Ключевые таблицы модуля:

- инженерные заключения (ID, Название, Автор, Дата, Основание, Результат, Привязка к ТС БВС)
- программы ПТЭ (ID, Название, Версия, Эффективность, Агрегат, Период\_наблюдения, Комментарий);
- эксперты и комиссии (ID, ФИО, Должность, Сертификаты, Участие в работах, Рейтинг);
- мероприятия по ЛГ (ID, Дата, Тип мероприятия, Цель, Результат, Ответственные);

- анализ рисков (ID, Объект, Тип риска, Вероятность, Последствия, Уровень, Рекомендации);
- обучение персонала (ID, Сотрудник, Курс, Дата обучения, Аттестация, Связь с ПТЭ);

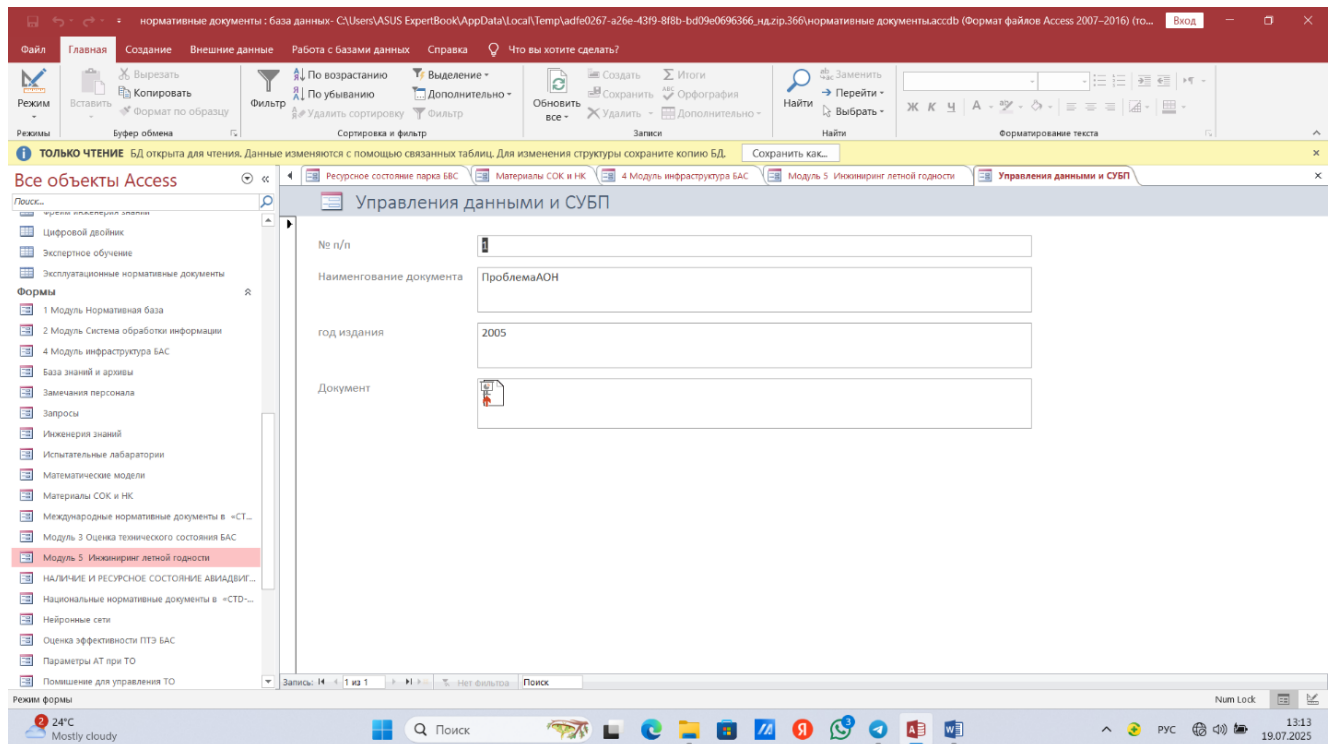


Рисунок 2.18 – Форма «Управление данными и СУБП»

#### 4. Связи с другими модулями ИБД

- Модуль 1: нормативные документы используются как регламентирующая основа инженерных решений и ПТЭ.
- Модуль 2: данные цифровых моделей и нейросетей передаются для анализа эффективности.
- Модуль 3: результаты оценки ТС служат основой для формирования инженерных заключений.
- Модуль 4: условия выполнения ТО и оснащённость проверяются при анализе рисков и экспертиз.
- Модуль 5 агрегирует данные со всех модулей, формируя комплексную оценку состояния, соответствия и устойчивости процессов ПЛГ.

## 5. Интерфейс и пользовательские функции СУБД

- регистрация, просмотр и редактирование инженерных заключений и решений;
- формирование отчётов по эффективности программ ТО и ПТЭ;
- управление составом и доступом инженерных комиссий;
- формирование графиков обучения и отслеживание квалификации специалистов по эксплуатации БАС;
- отчётность по рискам, аудиту, корректирующим мероприятиям;
- фильтрация по типу работ, агрегату, дате, результату;
- связь с результатами анализа ТС и цифровыми моделями.

## 6. Технические требования

При работе с СУБД должна обеспечиваться защита инженерной информации, контроль версий заключений и их верификация. Поддерживается экспорт заключений в PDF/Word, логика действий пользователей и разграничение прав доступа. Интерфейс должен быть удобен для инженеров, аудиторов и специалистов по ПЛГ.

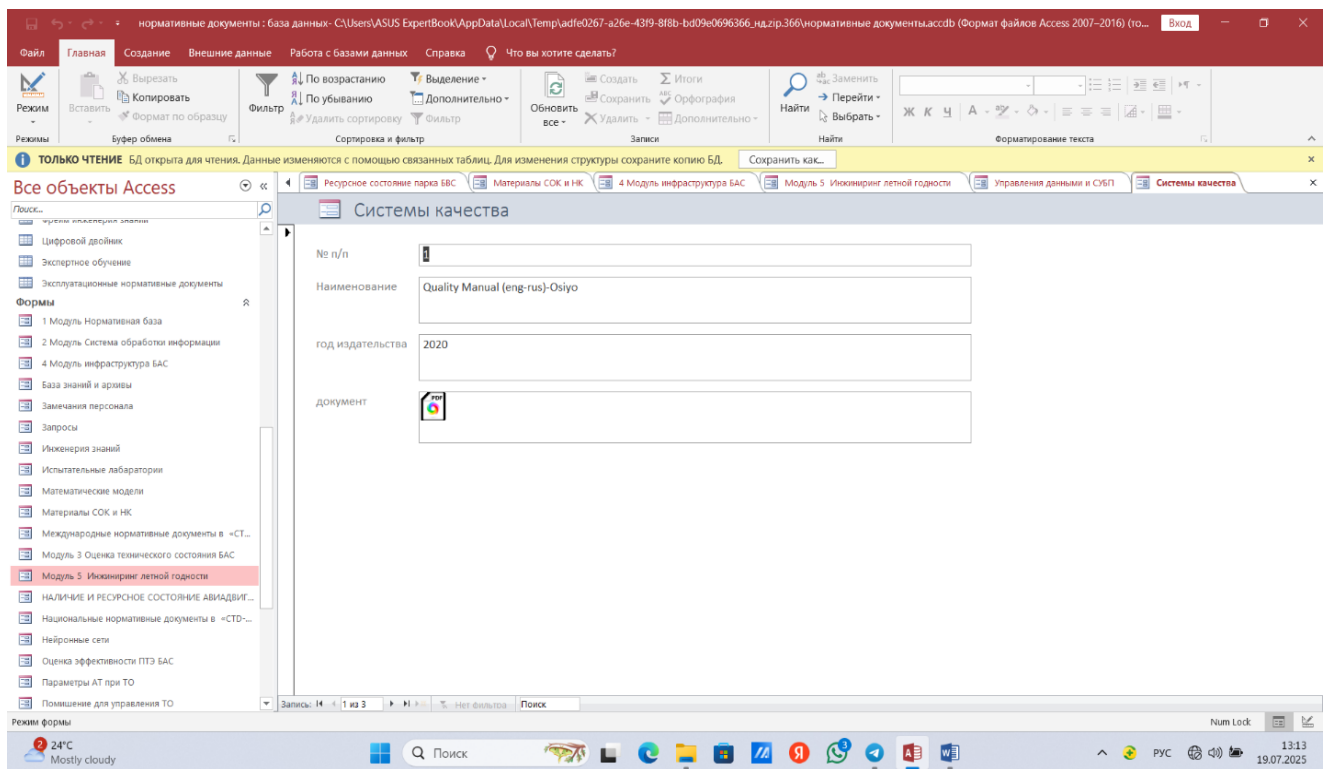


Рисунок 2.19 – Форма «Системы качества»

## План поэтапной реализации СУБД

### Этап 1. Проектирование базы данных

- определён перечень таблиц и связей (ER-модель);
- разработана навигационная структура интерфейса (панель навигации).

### Этап 2. Разработка интерфейса

- созданы формы СУБД;
- настроены пользовательские кнопки и фильтры.

### Этап 3. Внедрение логики

- разработаны VBA-скрипты для расчётов (прогноз ресурса, сравнение EGT (Exhaust Gas Temperature));
- созданы запросы на выборку: отклонения, остаток ресурса, нарушения НПА.

### Этап 4. Интеграция с внешними данными

- импорт CSV-отчётов и Excel-моделей расчётов;
- ссылки на PDF-документы и CAD-файлы.

### Этап 5. Тестирование и отладка

- проведена проверка на типовых сценариях: плановое ТО, выявление отклонения, обновление НПА;
- зафиксированы ошибки и устранены.

### Этап 6. Внедрение и обучение персонала

- разработаны инструкции по использованию;
- обучение инженерно-технический персонал (ИТП), инженеров ПЛГ.

### Типовые сценарии использования СУБД

#### Сценарий 1: Предиктивная диагностика ГТД по EGT (Exhaust Gas Temperature)

1. Инженер вводит/загружает данные о работе двигателя в модуль 2.
2. Нейросеть (модуль 2) анализирует параметры и выявляет тенденцию снижения дельта-Т (температура выходящих газов).
3. Данные передаются в модуль 3 для регистрации отклонения.

4. Инженер в модуле 5 формирует заключение о необходимости досрочного ТО.

### **Сценарий 2: Обновление нормативного документа**

1. В модуль 1 загружается актуальная редакция НПА.
2. Система автоматически определяет модели БВС, на которые влияет обновление.
3. Модуль 5 формирует оповещение ответственным инженерам и рекомендации по переутверждению инструкций ТО.

### **Сценарий 3: Планирование работ по инфраструктуре для ТО БАС**

1. Запланирована операция НК для планера модели X.
2. В модуле 4 проверяется доступность зоны и наличие дефектоскопа.
3. После подтверждения инфраструктурной готовности операция проводится, результат передается в модуль 3.

### **Интеграционные поля и связи между модулями**

Для обеспечения связности между модулями информационного банка данных применяются следующие идентификаторы и ключевые поля (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Интеграционные поля и связи между модулями

<b>Ключевое поле</b>	<b>Назначение</b>	<b>Используется в модулях</b>
ID_модели_БВС	Уникальный идентификатор модели беспилотного ВС	М1, М2, М3, М5
ID_НПА	Идентификатор нормативного документа	М1, М2, М3, М5
ID_агрегата	Идентификатор агрегата или компонента, привязанный к модели	М2, М3, М5
ID_зоны_ТО	Идентификатор производственной зоны или инфраструктурного объекта	М3, М4
ID_контроля	Идентификатор контрольной операции	М3, М5
ID_вывода/заключения	Связь между оценкой состояния и инженерным решением	М3, М5

Реализация и формирование информационных баз данных в целях обеспечения ПЛГ БАС требует загрузку НПА, хранение и анализ цифровых двойников (3D-моделей), математических моделей, нейросетевых алгоритмов и данных эксплуатации инженерных решений, результатов оценки эффективности программ ПТЭ и модернизаций, анализ инфраструктуры. Эти задачи решены в 3 и 4 главах диссертации.

## **2.5 Выводы по второй главе**

1. Разработана концептуальная модель управления лётной годностью БАС.
2. Рассмотрены информационные технологии, используемые в управлении процессами жизненного цикла БАС и документационном обеспечении.
3. Создана ИБД обеспечения и поддержания ЛГ БАС:
  - размешено в базе данных более 70 международных и национальных нормативных документов в том числе эксплуатационных;
  - установлены сценарии использования СУБД;
  - определены основные функции и назначение модулей для поэтапной реализации базы данных.

### **Глава 3. Разработка методики оценки эффективности системы ТЭ БАС на основе интегральной математической модели**

#### **3.1 Выбор и обоснование показателей эффективности системы ТЭ БВС**

В целях эффективного управления процессами и процедурами ПЛГ БАС необходимо включить в разработанную ИБД ППО на основе интегральной математической модели.

Для определения эффективности функционирования парка БВС в процессе выполнения задач лётной деятельности необходимо сформировать совокупность таких показателей, которые позволили бы дать не только полную и однозначную количественную оценку выполнения авиационным предприятием задач по эффективному функционированию, но и оценку степени влияния параметров ТС АТ на эффективность системы ТЭ и ПЛГ современного БВС.

Проведенные исследования [3, 46, 47, 48, 50] и опыт функционирования авиационных организаций в настоящее время требует решения следующих задач:

- совершенствование системы подготовки авиационного персонала, в том числе взаимодействие инженеров по ПЛГ БВС и системой ТЭ БВС;
- определение рациональной системы ТЭ парка БВС в условиях структурного преобразования гражданской авиации;
- улучшение научно-технического сопровождения ТЭ, обеспечения и ПЛГ БВС;
- разработка и внедрение методик оценки работоспособности и ТС БВС, в том числе с использованием ИТ (с учётом СОК, НК, осмотров АТ и т.д.);
- внедрение аддитивных технологий для изготовления, модернизации, выполнения ТО БВС;
- совершенствование методик по оценке финансовых затрат на ЗЧМ с учетом эксплуатации изделий АТ по состоянию.

Исследование эффективности функционирования сложной системы

необходимо начать с анализа ее целевого предназначения [75, 76, 77, 78,79].

Для установления необходимой ясности и однозначности формулировок опишем цели в терминах характеристик рассматриваемой системы. Чтобы добиться этого, проведем декомпозицию исходной цели на совокупность более частных, но более конкретных подцелей [80].

Полнота набора целей предполагает их достаточность для достижения исходной цели. Для ее обеспечения в набор целей нижнего уровня включаются цели, характеризующие различные стороны подготовки авиационных организаций. Из рассмотрения исключаются неизмеримые цели или, если это возможно, разделение целей производится до уровня, обеспечивающего их измеримость. Число уровней зависит от степени детализации, которая требуется для получения полного не избыточного набора измеримых целей.

Для количественной оценки качества различных решений необходимо сформировать целевую функцию системы, то есть, необходимо, прежде всего, правильно определить цель функционирования исследуемой системы. Степень соответствия исследуемой системы своему целевому назначению будем называть эффективностью ее функционирования [81].

Формулирование цели на содержательном (качественном) уровне позволяет судить лишь об общем направлении работ, в котором следует вести исследование по формированию рациональной системы ТЭ, составляющей которой является инженерно-авиационное обеспечение (ИАО) безопасности и регулярности полетов [82]. К основным задачам ИАО следует отнести обеспечение исправности парка ВС, оформление ЭД, обеспечение БП.

Полный набор целей адекватно должен отражать содержание исходной цели, причем исключение из него любой цели приводит к потере свойств полноты, поэтому он является минимальным по числу входящих в него целей [75]. Следует заметить, что цели нижнего уровня иерархии должны в полной мере характеризовать различные стороны процесса функционирования исследуемой системы. В этом случае, это обеспечит возможность сравнивать различные варианты организации исследуемой системы по степени предпочтительности и

осуществлять поиск рациональных вариантов.

Цель  $\text{Ц}_1$  определяет направления исследований, но является безразмерной и поэтому требует декомпозиции на подцели (таблица 3.1).

В качестве объекта исследования в разрабатываемой математической модели ПТЭ БВС рассматривается комплексная система ТЭ парка БВС авиационного предприятия, которая является подсистемой в структуре гражданской авиации в целом.

Для этого составлена матрица системы ТЭ парка БВС авиационного предприятия, основной целью которой является повышение эффективности системы ТЭ ( $\text{Ц}_1$ ).

Таблица 3.1 – Цели и показатели эффективности системы ТЭ парка БВС

	Цели										Показатели				
	$\text{Ц}_1$	$\text{Ц}_2$	$\text{Ц}_3$	$\text{Ц}_4$	$\text{Ц}_5$	$\text{Ц}_6$	$\text{Ц}_7$	$\text{Ц}_8$	$\text{Ц}_9$	$\text{Ц}_{10}$	$\text{К}_1$	$\text{К}_2$	$\text{К}_3$	$\text{К}_4$	$\text{К}_5$
$\text{Ц}_1$															
$\text{Ц}_2$															
$\text{Ц}_3$															
$\text{Ц}_4$															
$\text{Ц}_5$															
$\text{Ц}_6$															
$\text{Ц}_7$															
$\text{Ц}_8$															
$\text{Ц}_9$															
$\text{Ц}_{10}$															

Формулировка исходной цели ( $\text{Ц}_1$ ) носит общий характер и для получения количественной оценки проведена декомпозиция исходной цели на совокупность более частных количественных измеряемых подцелей.

Цель  $\text{Ц}_2$  характеризует выполнения планов налета авиационного предприятия. Цель  $\text{Ц}_2$  можно представить частными целями  $\text{Ц}_5$ ,  $\text{Ц}_6$ ,  $\text{Ц}_7$ ,  $\text{Ц}_8$ ,  $\text{Ц}_9$ ,  $\text{Ц}_{10}$  и которую можно измерить эффективностью выполнения плана налета.  $\text{Ц}_5$  характеризует фактический налет авиапредприятия.

Цель  $\text{Ц}_3$  определяет совершенство ТО АТ. Цель  $\text{Ц}_3$  разбивается на следующие частные цели:

- $\text{Ц}_6$  – определяет исправность парка БВС;
- $\text{Ц}_7$  – суммарная продолжительность работ по ТО парка БВС;

-  $\text{Ц}_8$  – суммарные трудозатраты на ТО парка БВС.

Цель  $\text{Ц}_4$  характеризует повышение экономичности системы ТЭ и ЛГ БВС.

Цель  $\text{Ц}_4$  разделяется на  $\text{Ц}_9$  и  $\text{Ц}_{10}$ , где:

- цель  $\text{Ц}_9$  определяет суммарные затраты на ТО;

- цель  $\text{Ц}_{10}$  характеризует стоимость ЗЧМ.

Таким образом, процесс декомпозиции можно считать завершенным, а все цели ( $\text{Ц}_2... \text{Ц}_{10}$ ) низших уровней образуют необходимый и достаточный набор, конкретизирующий цель  $\text{Ц}_1$ .

Таким образом, задача поиска рациональной системы ТЭ АТ при выполнении авиационными организациями задач ТЭ с самого начала должна ставиться и решаться как задача многокритериальная, в которой учет всех критериев целесообразно производить одновременно.

В этих условиях весьма важной проблемой является выбор критериев, позволяющих определить такие параметры ТЭ АТ, которые могут обеспечивать высокую эффективность выполнения авиационными организациями поставленных перед ними задач.

Согласно матрице измеримых целей рассмотрим формирование показателей эффективности системы ТЭ БВС.

В результате декомпозиции получен набор показателей  $K_1-K_5$ .

Выполнение плана налёта авиапредприятия оценивается показателя  $K_1$ :

$$K_1^i = \frac{\sum_{i=1} T_i^\phi}{T_i^{\text{пл}}}, \quad (3.1)$$

где  $\sum_{i=1} T_i^\phi$  – фактический налет организации за  $i$ -й месяц;

$T_i^{\text{пл}}$  – планируемый налет организации за  $i$ -й месяц.

Критерий  $K_1$  безразмерный. Если  $K_1 \geq 1$ , то план налета выполняется полностью или перевыполняется.

Важным элементом выполнения поставленных задач перед эксплуатантом является определение возможностей ИАО по выполнению планов налёта.

Показатель  $K_2$  характеризует уровень исправности парка БВС:

$$K_2 = \frac{\sum M_{БВС}^{учёт} - П_H}{\sum M_{БВС}^{учёт}}, \quad (3.2)$$

где  $\sum M_{БВС}^{учёт}$  – суммарная продолжительность нахождения всех штатных БВС на учёте в авиационной организации в течение данного периода, ч.;

$П_H$  – суммарный простой штатных БВС в неисправном состоянии за данный период по всем причинам, ч.

$$П_H = П_{УЭО} + П_{ОУЭО} + П_{ПТО} + П_{АВД} + П_{ОАВД} + П_{КВР}, \quad (3.3)$$

где  $П_{УЭО}$  – простои БВС при устранении эксплуатационных отказов (УЭО);

$П_{ОУЭО}$  – простои БВС в ожидании УЭО;

$П_{ПТО}$  – простои БВС на ПТО;

$П_{АВД}$  – простои БВС по причине замены АвД;

$П_{ОАВД}$  – простои БВС в ожидании замены АвД;

$П_{КВР}$  – простои БВС на КВР.

Показатель  $K_2$  безразмерный и, чем выше его значение, тем выше исправность АТ. В идеальном случае  $П_H=0$ , а  $K_2=1$ .

Показатели  $K_3$ ,  $K_4$  характеризуют эффективность функционирования ИАС:

$$K_3^i = \frac{t_{ТО}}{T_i^{\phi}}, \quad (3.4)$$

где  $t_{ТО}$  продолжительность работ по ТО на БВС, ч.

$$t_{ТО} = t_{ОТО} + t_{ПТО} + t_{КВР}, \quad (3.5)$$

где  $t_{ТО}$  – продолжительность работ на БВС по ТО;

$t_{ОТО}$  – продолжительность работ на БВС по ОТО;

$t_{ПТО}$  – продолжительность работ на БВС по ПТО;

$t_{КВР}$  – продолжительность работ КВР на БВС.

Под продолжительностью и трудоемкостью работ по ТО БВС в общем случае для авиационных организаций будем понимать следующие работы:

- предполетная подготовка;
- подготовка к повторному полету;
- послеполетная подготовка;
- работы по техническому состоянию (КВР) для БВС;
- периодические работы;
- замена агрегатов;
- устранение дефектов;
- замена двигателей;
- сервисные бюллетени;
- работы по ДЛГ.

$K_3$  – характеризует удельную продолжительность работ на БВС организации.

$K_4$  – показатель, который характеризует отношение суммарных потребных трудозатрат по выполнению всех видов работ по ТО к налёту за этот же период.

$$K_4^i = \frac{Q_{ТО} + Q_p}{T_i^{\phi}}, \quad (3.6)$$

где  $Q_{ТО}$  – трудозатраты на работы по ТО на парке БВС, чел.ч.;

$Q_p$  – трудозатраты на выполнение ремонта БВС, чел.ч.

$K_4$  – характеризует удельную трудоемкость работ на БВС. Чем меньше  $K_4$ , тем более эффективно используется ресурс БВС, тем более развиты автоматизированные средства анализа и оценки ТС АТ, тем меньше выполняется работ по ТО на БВС.

Суммарные потребные трудозатраты ИТС на выполнение всех видов работ по ТО БВС представим следующим выражением:

$$Q_{ТО} = Q_{ОТО} + Q_{ПТО} + Q_{КВР}, \quad (3.7)$$

где  $Q_{ОТО}$  – трудозатраты на работы по ОТО в авиационных организациях, чел.ч.;

$Q_{ПТО}$  – трудозатраты на работы по ПТО чел.ч.;

$Q_{КВР}$  - трудозатраты на выполнение КВР БВС, чел.ч.

Составляющие трудозатрат на работы по ПТО определим следующие трудозатраты:

- на работы по техническому состоянию (КВР) для БВС;
- на замену двигателей;
- на замену агрегатов БВС;
- на ремонт БВС;
- на устранение отказов, в том числе отложенных по ПМО;
- на работы по указаниям.

Также включим трудозатраты на вспомогательные и внеплановые работы для авиационных организаций, которые включают следующие трудозатраты:

- на вспомогательные работы;
- на организационные работы;
- на внеплановые работы.

Таким образом, показатели  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$  отражают эффективность функционирования системы ТЭ БВС.

Другим не менее важным элементом выполнения поставленных задач перед авиационной организацией является определение стоимости выполненных работ по ТЭ БВС.

Экономическую эффективность системы ТЭ БВС можно оценить показателем  $K_5$ :

$$K_5^i = \frac{C_{ТО} + C_p + C_{зчм}}{T_i^\phi}, \quad (3.8)$$

где  $C_{ТО}$  – стоимость ТО парка БВС, руб.;

$C_p$  – стоимость ремонта БВС, руб.;

$C_{зчм}$  – стоимость ЗЧМ, руб.

$K_5$  – характеризует удельные затраты на ТЭ и закупку ЗЧМ.

Таким образом, показатели  $K_1 \dots K_5$  измеримы, они отражают физический смысл и цели ТЭ, ИАО, эксплуатационное совершенство БВС.

Предложенная комплексная оценка рассматриваемых показателей, позволяет достаточно полно оценить эффективность выполнения задач лётной деятельности авиационными организациями с учетом рационального формирования системы ТЭ парка БВС за планируемый период.

В условиях ограниченного финансирования возникает необходимость поиска рационального варианта ТЭ, в том числе обеспечивающего максимальную исправность парка БВС  $K_2 \rightarrow \max\{X_i\}$  при ограничениях, накладываемых на остальные показатели.

### 3.2 Моделирование системы ТЭ БВС

Проведение поисковых исследований по функционированию авиационной организации базируется на применении различных методов математического моделирования [6, 83, 84, 85, 86, 87, 88]

Зачастую при моделировании сложных слабоформализуемых систем используется системный подход, заключающийся в применении разных методов: Монте-Карло, математической логики, полумарковских процессов и других [6, 80, 89].

В процессе исследования разработана схема модели ТЭ парка БВС (рисунок 3.1), в которой сформированы пять модулей (блоков).

В блоке 1 исходные данные задаются характеристическими функциями.

Характеристические функции эксплуатационно-технических параметров:

- планируемый годовой налет авиационной организации.

Характеристические функции состояния БВС:

- продолжительность выполнения периодических работ на БВС;
- продолжительность выполнения ОТО на БВС;
- продолжительность УЭО на БВС;
- количество обнаруженных отказов БВС на ПТО.

Характеристические функции состояния МТО:

- доля удовлетворения заявок ЗЧМ БВС;
- время доставки ЗЧМ.

В блоке 2 производится оценка значимых параметров ЛГ БВС.

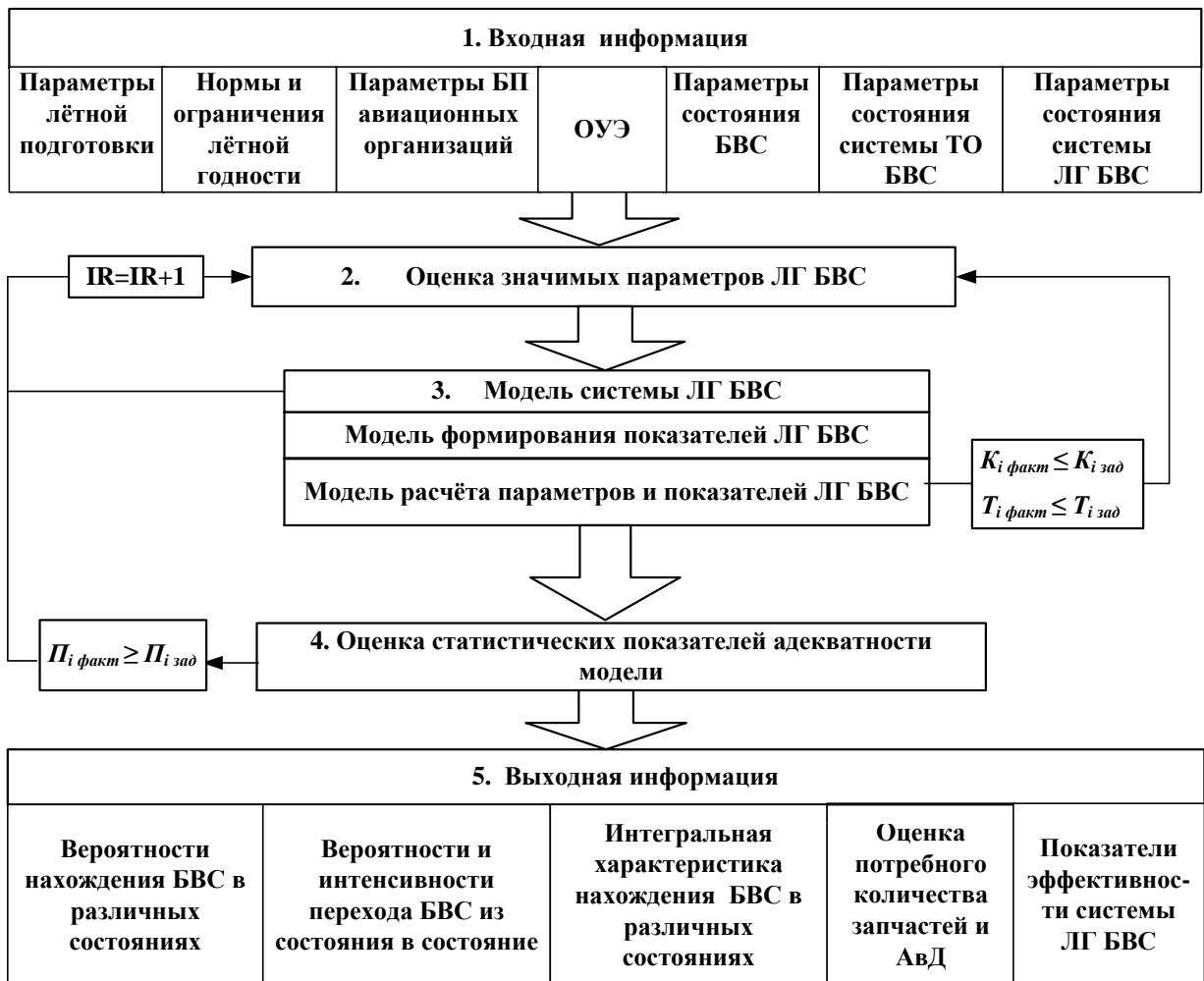


Рисунок 3.1 – Схема модели ТЭ парка БВС

Блок 3 представлен вычислительными процедурами по оценке показателей эффективности системы ТЭ парка БВС:

- вероятностями перехода из состояния в состояние;
- интенсивностями перехода из состояния в состояние;
- вероятностями нахождения БВС в различных состояниях ТЭ.

Блок 4 предназначен для оценки статистических показателей адекватности модели.

Вычислительные процедуры в данной модели базируются на различных методах математического моделирования [75, 77, 90, 91, 92, 93].

Блок 5 предназначен для вывода и хранения результатов расчетов.

Оценка характеристик ИАС и МТО, реализованная в данном алгоритме, проводилась с использованием известных методик [94, 95] с учетом специфики данного исследования.

Разработанная комплексная модель реализована на персональном компьютере с помощью среды разработки Visual Studio C/C++ [96, 97, 98, 99].

### **3.3 Математическая модель системы ТЭ парка БВС при выполнении авиационной организацией задач лётной деятельности**

Имитация нахождения БВС в различных состояниях при выполнении авиационными организациями задач лётной деятельности относится к классу сложных слабоформализуемых задач [99, 100].

Решение таких задач основано на большом количестве логических условий (переключателей), формировании и фиксации случайных параметров при известных законах их изменения.

Достоверность полученных результатов нахождения АТ в каждом из исследуемых состояний достигается многократной имитацией (прогонами) для выбранных моментов времени.

В основу моделирующего алгоритма системы ТЭ БВС положены следующие математические методы: полумарковские процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем, метод статистических испытаний (Монте–Карло) и логико-комбинаторного анализа [101, 102].

Эти методы позволяют с требуемой точностью 5-10% отразить все особенности поведения реального процесса.

Для реализации научно обоснованного подхода к оценке состояний БВС была разработана топологическая модель системы ТЭ в виде графа состояний, в которых находится БВС (рисунок 3.2). Этот граф позволяет проследить в динамике последовательность и частоту попадания БВС в различные состояния.

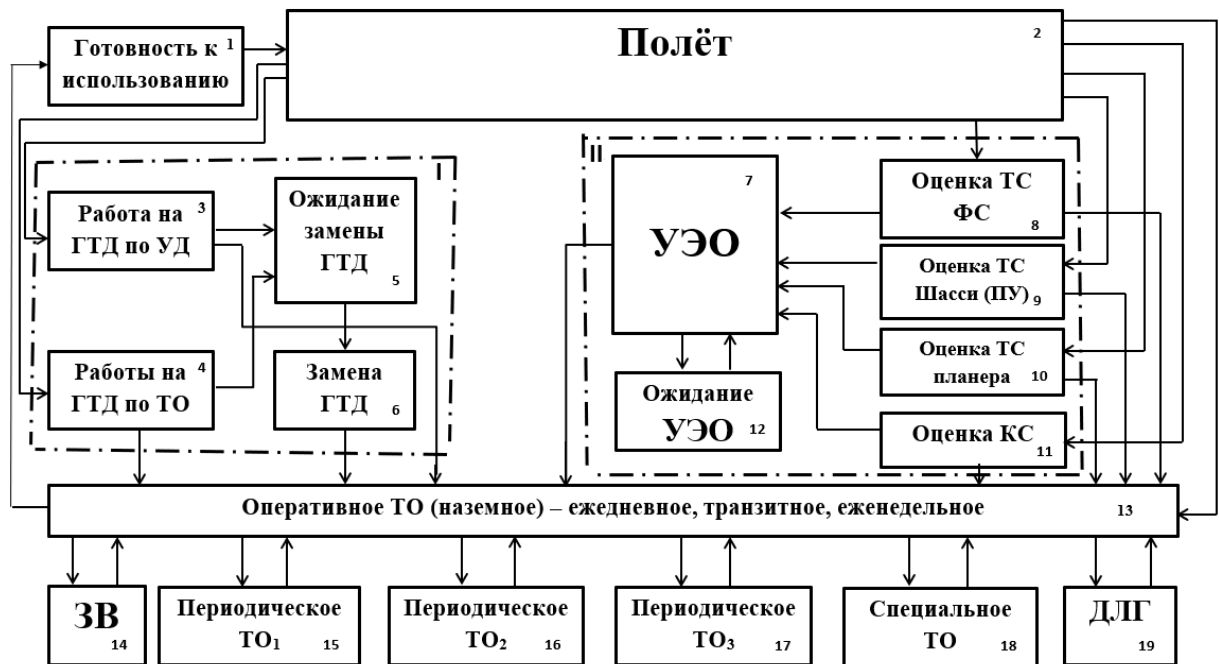


Рисунок 3.2 – Граф состояний процесса ТЭ БВС

Известно, что полумарковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем можно при достаточно малом промежутке времени  $\Delta t$  между шагами приближенно рассматривать как марковскую цепь, то есть процесс с дискретными состояниями и дискретным временем, изменения состояний которого происходят в моменты  $t = 0, t = \Delta t, t = 2\Delta t, \dots$ , определяемые заданным шагом работы ЭВМ [103].

Обозначим через  $a_{ij}$  интенсивности, а через  $P_{ij}$  соответственно вероятности перехода из одного состояния в другое.  $a_{ij}$  характеризует время перехода из одного состояния в другое в единицу времени, а  $P_{ij}$  – с какой вероятностью осуществляется переход из одного состояния в другое.

Переменные  $t_i$  и  $t_j$  означают время нахождения исследуемой системы в состояниях  $i$  и  $j$ :

$$a_{ij} = \frac{1}{t_i}; \quad a_{ji} = \frac{1}{t_j}. \quad (3.9)$$

Математический аппарат, который описывает поведение данной модели, представляет собой систему дифференциальных уравнений Колмогорова (таблица 3.2).

Система дифференциальных уравнений решалась методом Рунге - Кутты при этом в начальный момент времени ( $t = 0$ ) вероятности нахождения БВС в состояниях  $P_1=0,2$ ,  $P_2=0,5$ ,  $P_{13}=0,3$ , а остальные вероятности равны нулю.

Для любого момента времени  $t$  должно выполняться нормировочное условие:

$$\sum_{i=1}^{19} P_i(t) = 1 \quad (t \geq 0). \quad (3.10)$$

Это следует из того, что в любой момент  $t$  события, представленные на данном графе, составляют полную группу несовместных событий замкнутой системы.

Число БВС, находящихся в каждом состоянии в любой момент времени, находится по формуле:

$$M_{iБВС} = P_i \cdot M_{БВС}^{учёт}, \quad (3.11)$$

где  $P_i$  – вероятность нахождения БВС в  $i$ -м состоянии;

$M_{БВС}^{учёт}$  – списочная численность БВС.

Таблица 3.2 – Система дифференциальных уравнений Колмогорова

№ п/н	Система дифференциальных уравнений Колмогорова
1	$\frac{dP_1}{dt} = P_{13} \cdot a_{131} \cdot p_{131} - P_1 \cdot a_{12} \cdot p_{12}$
2	$\frac{dP_2}{dt} = P_1 \cdot a_{12} \cdot p_{12} - P_2 \cdot a_{23} \cdot p_{23} - P_2 \cdot a_{24} \cdot p_{24} - P_2 \cdot a_{28} \cdot p_{28} - P_2 \cdot a_{29} \cdot p_{29} - P_2 \cdot a_{210} \cdot p_{210} -$ $- P_2 \cdot a_{211} \cdot p_{211} - P_2 \cdot a_{213} \cdot p_{213}$
3	$\frac{dP_3}{dt} = P_2 \cdot a_{23} \cdot p_{23} - P_3 \cdot a_{35} \cdot p_{35} - P_3 \cdot a_{313} \cdot p_{313}$
4	$\frac{dP_4}{dt} = P_2 \cdot a_{24} \cdot p_{24} - P_4 \cdot a_{45} \cdot p_{45} - P_4 \cdot a_{413} \cdot p_{413}$
5	$\frac{dP_5}{dt} = P_3 \cdot a_{35} \cdot p_{35} - P_5 \cdot a_{56} \cdot p_{56}$
6	$\frac{dP_6}{dt} = P_5 \cdot a_{56} \cdot p_{56} + P_{13} \cdot a_{136} \cdot p_{136} - P_6 \cdot a_{613} \cdot p_{613}$
7	$\frac{dP_7}{dt} = P_8 \cdot a_{87} \cdot p_{87} + P_9 \cdot a_{97} \cdot p_{97} + P_{10} \cdot a_{107} \cdot p_{107} + P_{11} \cdot a_{117} \cdot p_{117} + P_{12} \cdot a_{127} \cdot p_{127} +$ $+ P_{13} \cdot a_{137} \cdot p_{137} - P_7 \cdot a_{712} \cdot p_{712} - P_7 \cdot a_{713} \cdot p_{713}$
8	$\frac{dP_8}{dt} = P_2 \cdot a_{28} \cdot p_{28} - P_8 \cdot a_{87} \cdot p_{87} - P_8 \cdot a_{813} \cdot p_{813}$
9	$\frac{dP_9}{dt} = P_2 \cdot a_{29} \cdot p_{29} - P_9 \cdot a_{97} \cdot p_{97} - P_9 \cdot a_{913} \cdot p_{913}$
10	$\frac{dP_{10}}{dt} = P_2 \cdot a_{210} \cdot p_{210} - P_{10} \cdot a_{107} \cdot p_{107} - P_{10} \cdot a_{1013} \cdot p_{1013}$
11	$\frac{dP_{11}}{dt} = P_2 \cdot a_{211} \cdot p_{211} - P_{11} \cdot a_{117} \cdot p_{117} - P_{11} \cdot a_{1113} \cdot p_{1113}$
12	$\frac{dP_{12}}{dt} = P_7 \cdot a_{712} \cdot p_{712} + P_{13} \cdot a_{1312} \cdot p_{1312} - P_{12} \cdot a_{127} \cdot p_{127}$
13	$\frac{dP_{13}}{dt} = P_2 \cdot a_{213} \cdot p_{213} + P_7 \cdot a_{713} \cdot p_{713} + P_8 \cdot a_{813} \cdot p_{813} + P_9 \cdot a_{913} \cdot p_{913} + P_{10} \cdot a_{1013} \cdot p_{1013} +$ $+ P_{11} \cdot a_{1113} \cdot p_{1113} + P_{14} \cdot a_{1413} \cdot p_{1413} + P_{15} \cdot a_{1513} \cdot p_{1513} + P_{16} \cdot a_{1613} \cdot p_{1613} + P_{17} \cdot a_{1713} \cdot p_{1713} +$ $+ P_{18} \cdot a_{1813} \cdot p_{1813} + P_{19} \cdot a_{1913} \cdot p_{1913} - P_{13} \cdot a_{131} \cdot p_{131} - P_{13} \cdot a_{136} \cdot p_{136} - P_{13} \cdot a_{137} \cdot p_{137} -$ $- P_{13} \cdot a_{1314} \cdot p_{1314} - P_{13} \cdot a_{1315} \cdot p_{1315} - P_{13} \cdot a_{1316} \cdot p_{1316} - P_{13} \cdot a_{1317} \cdot p_{1317} - P_{13} \cdot a_{1318} \cdot p_{1318} -$ $- P_{13} \cdot a_{1319} \cdot p_{1319}$
14	$\frac{dP_{14}}{dt} = P_{13} \cdot a_{1314} \cdot p_{1314} - P_{14} \cdot a_{1413} \cdot p_{1413}$
15	$\frac{dP_{15}}{dt} = P_{13} \cdot a_{1315} \cdot p_{1315} - P_{15} \cdot a_{1513} \cdot p_{1513}$
16	$\frac{dP_{16}}{dt} = P_{13} \cdot a_{1316} \cdot p_{1316} - P_{16} \cdot a_{1613} \cdot p_{1613}$
17	$\frac{dP_{17}}{dt} = P_{13} \cdot a_{1317} \cdot p_{1317} - P_{17} \cdot a_{1713} \cdot p_{1713}$

## Продолжение таблицы 3.2

18	$\frac{dP_{18}}{dt} = P_{13} \cdot a_{1318} \cdot p_{1318} - P_{18} \cdot a_{1813} \cdot p_{1813}$
19	$\frac{dP_{19}}{dt} = P_{13} \cdot a_{1319} \cdot p_{1319} - P_{19} \cdot a_{1913} \cdot p_{1913}$

Интенсивности и вероятности перехода, приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Расчетные формулы вероятностей и интенсивностей перехода

Вероятности перехода	Интенсивности перехода
$p_{12} = 1$	$a_{12} = \frac{1}{t_1}$
$p_{23} = 1 - e^{-\frac{t_{ИСП}}{t_{уд.АвД}}}$	$a_{23} = a_{24} = a_{28} = a_{29} = a_{210} = a_{211} = a_{213} = \frac{1}{t_{ИСП}}$
$p_{24} = 1 - e^{-\frac{t_{II}}{T_{АвДТО}}}$	
$p_{28} = 1 - e^{-\frac{t_u}{t_{ТСФС}}}$	
$p_{29} = 1 - e^{-\frac{t_u}{t_{ТСШ}}}$	
$p_{210} = 1 - e^{-\frac{t_u}{t_{ТСПн}}}$	
$p_{211} = 1 - e^{-\frac{t_u}{t_{КС}}}$	
$p_{213} = 1 - (p_{23} + p_{24} + p_{28} + p_{29} + p_{210} + p_{211})$	
$p_{35} = 1 - e^{-t_{ож.АвД}}$	$a_{35} = \frac{1}{t_{уд.АвД}}$
$p_{313} = 1 - p_{35}$	$a_{313} = \frac{1}{t_{уд.АвД}}$
$p_{45} = 1 - e^{-t_{ож.АвД}}$	$a_{45} = \frac{1}{t_{ТО.АвД}}$
$p_{413} = 1 - p_{45}$	$a_{413} = \frac{1}{t_{ТО.АвД}}$
$p_{56} = 1 - e^{-t_{ож. зам.АвД}}$	$a_{56} = \frac{1}{t_{ож. АвД}}$
$p_{613} = 1 - e^{-t_{зам.АвД}}$	$a_{613} = \frac{1}{t_{зам. АвД}}$
$p_{136} = 1 - e^{-t_{ПАвД}}$	$a_{136} = \frac{1}{t_{ОТО}}$
$p_{713} = 1 - p_{712}$	$a_{713} = \frac{1}{t_{УЭО}}$

## Продолжение таблицы 3.3

$p_{712} = 1 - e^{-t_{ож.УЭО}}$	$a_{712} = \frac{1}{t_{УЭО}}$
$p_{127} = 1 - e^{-t_{ож.УЭО}}$	$a_{712} = \frac{1}{t_{ож.УЭО}}$
$p_{87} = 1 - e^{-\frac{t_{ТСФС}}{\omega_{ФС}}}$	$a_{813} = \frac{1}{t_{ТСФС}}$
$p_{813} = 1 - p_{87}$	
$p_{97} = 1 - e^{-\frac{t_{ТСШ}}{\omega_{Ш}}}$	$a_{97} = \frac{1}{t_{ТСШ}}$
$p_{913} = 1 - p_{97}$	$a_{913} = \frac{1}{t_{ТСШ}}$
$p_{107} = 1 - e^{-\frac{t_{ТСП}}{\omega_{П}}}$	$a_{107} = \frac{1}{t_{ТСП}}$
$p_{1013} = 1 - p_{107}$	$a_{1013} = \frac{1}{t_{ТСП}}$
$p_{117} = 1 - e^{-\frac{t_{КС}}{\omega_{КС}}}$	$a_{117} = \frac{1}{t_{КС}}$
$p_{1113} = 1 - p_{117}$	$a_{1113} = \frac{1}{t_{КС}}$
$p_{1314} = 1 - e^{-\frac{n_{36}}{n_{П}}}$	$a_{1314} = \frac{1}{t_{ОГО}}$
$p_{1413} = 1$	$a_{1413} = \frac{1}{t_{36}}$
$p_{1315} = 1 - e^{-\frac{t_{ОГО}}{\tau_{ПГО1}}}$	$a_{1317} = \frac{1}{t_{ОГО}}$
$p_{1513} = 1$	$a_{1513} = \frac{1}{t_{ПГО1}}$
$p_{1316} = 1 - e^{-\frac{t_{ОГО}}{\tau_{ПГО2}}}$	$a_{1316} = \frac{1}{t_{ОГО}}$
$p_{1613} = 1$	$a_{1613} = \frac{1}{t_{ПГО2}}$
$p_{1317} = 1 - e^{-\frac{t_{ОГО}}{\tau_{ПГО3}}}$	$a_{1317} = \frac{1}{t_{ОГО}}$
$p_{1713} = 1$	$a_{1713} = \frac{1}{t_{ПГО3}}$
$p_{1318} = 1 - e^{-n_{ентО}}$	$a_{1318} = \frac{1}{t_{ОГО}}$

## Продолжение таблицы 3.3

$p_{1813} = 1$	$a_{1813} = \frac{1}{t_{\text{сн.ТО}}}$
$p_{1319} = 1 - e^{-n_{\text{длг}}}$	$a_{1319} = \frac{1}{t_{\text{ОТО}}}$
$p_{1913} = 1$	$a_{1913} = \frac{1}{t_{\text{длг}}}$
$p_{131} = 1 - (p_{1315} + p_{1314} + p_{1316} + p_{1317} + p_{1318} + p_{1319} + p_{137} + p_{136})$	$a_{131} = \frac{1}{t_{\text{ОТО}}}$

В таблице 3.4 приведены обозначения параметров по вычислению вероятностей и интенсивностей перехода (детерминированные параметры обозначены «+», а стохастические «-»).

Таблица 3.4 – Обозначения параметров по вычислению вероятностей и интенсивностей перехода

Наименование	Обозначение	Параметр	Размерность
Время выполнения полетного задания	$t_{\text{П}}$	-	ч.
Ожидание замены АвД	$t_{\text{ож.АвД}}$	-	ч.
Средняя продолжительность выполнения бюллетеней	$t_{\text{пр.вып.бюллет.}}$	-	ч.
Среднее время выполнения КВР	$t_{\text{КВР}}$	-	ч.
Среднее время УЭО	$t_{\text{УЭО}}$	-	ч.
Среднее время ожидания УЭО	$t_{\text{ож.УЭО}}$	-	ч.
Затраты на КВР	$C_{\text{КВР}}$	-	руб.
Затраты на ЗЧИМ	$C_{\text{ЗЧИМ}}$	-	руб.
Налет на один отказ в полете	$t_{\text{отк. П}}$	-	ч
Списочная численность БВС	$Ч_{\text{С}}$	+	шт.
Планируемый период	$t_{\text{ПП}}$	+	год.
Налет на одну неисправность	$t_{\text{С}}$	+	ч.
Время работ на АвД по УД	$t_{\text{АвД УД}}$	+	ч.
Время замены АвД БВС	$t_{\text{зам.АвД}}$	+	ч.

Продолжение таблицы 3.4

Среднее время поставки АвД	$t_{\text{пост.АвД}}$	+	ч.
Время выполнения работ на БВС по КВР	$t_{\text{БВС КВР}}$	+	ч.
Время выполнения ОТО	$t_{\text{ОТО}}$	+	ч.
Средняя продолжительность выполнения ПТО1	$t_{\text{ПТО1}}$	+	ч.
Средняя продолжительность выполнения ПТО2	$t_{\text{ПТО2}}$	+	ч.
Средняя продолжительность выполнения ПТО3	$t_{\text{ПТО3}}$	+	ч.
Средняя продолжительность выполнения доработок	$t_{\text{Д}}$	+	ч.
Средняя продолжительность выполнения работ на АвД по ТО	$t_{\text{АвД ТО}}$	+	ч.
Среднее время оценки ТС ФС	$t_{\text{оц.ТС ФС}}$	-	ч.
Среднее время оценки ТС шасси	$t_{\text{оц.ТС Ш}}$	-	ч.
Среднее время оценки ТС планера	$t_{\text{оц.ТС П}}$	-	ч.
Среднее время оценки ТС коррозионное состояние	$t_{\text{оц.КС}}$	-	ч.
Задержки вылета	$t_{\text{ЗВ}}$	-	ч.
Среднее время выполнения специального ТО	$t_{\text{спе.ТО}}$	-	ч.
Среднее время выполнения ДЛГ	$t_{\text{ДЛГ}}$	-	ч.
Параметр потока отказов ФС БВС	$\omega_{\text{о ФС}}$	-	-
Параметр потока отказов планера БВС	$\omega_{\text{о П}}$	-	-

Продолжение таблицы 3.4

Параметр потока отказов шасси БВС	$\omega_{o\text{ Ш}}$	-	-
Параметр потока отказов коррозионного состояния БВС	$\omega_{o\text{ КС}}$	-	1/ч

Прежде чем приступать к построению модели для выявления законов распределения проанализированы наблюдаемые значения, в частности, продолжительность полёта среднемагистральных самолетов отечественных авиакомпаний. Данные получены из открытых источников за второе полугодие 2023 г., объём выборки составил  $>1200$  событий. В данном случае рекомендуется использовать  $\beta$ -распределение случайной величины [2].

Экспоненциальное (показательное) распределение, часто встречаемое в различных моделях отказов, в условиях представленной модели подходит для описания вероятностей переходов  $p_{2i} (i=8...11)$ . Согласно [104] отказ технического объекта является случайным событием, а поток отказов в устоявшемся режиме эксплуатации обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последствия. Показательное распределение также можно использовать для расчёта продолжительности восстановления изделий АТ, времени между проверками ТС оборудования функциональных систем ВС и для других случаев [2].

### 3.4 Применение методов факторного и регрессионного анализа для комплексного исследования эффективности системы ТЭ парка БВС

Для определения степени значимости исследуемых факторов, необходимо получить зависимости выбранных показателей ( $K_1...K_5$ ) от совокупности этих факторов.

Многофакторный регрессионный анализ позволяет с достаточной точностью установить аналитическую зависимость исследуемых показателей от выбранной совокупности основных факторов.

Если обозначить зависимые переменные через  $Y (y_1, y_2, \dots, y_k)$  – выходных критериев), где  $k$  – число рассматриваемых показателей, а независимые через  $X (x_1, x_2, \dots, x_p)$  – входных факторов), где  $p$  – число факторов, и предположить, что переменные количественны, непрерывны и измеримы, то уравнение поверхности отклика можно записать в следующем виде:

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_p). \quad (3.12)$$

Для решения данного уравнения разработано достаточно большое число методов факторного и регрессионного анализа [89, 105], позволяющих установить конкретное выражение, описывающее зависимость (3.12), а также определить степень влияния независимых переменных на исследуемую зависимую величину. Применение конкретного метода зависит от цели его использования и имеющейся информации о характере поведения функции в исследуемой области факторного пространства.

При проведении экспериментов записывают значения функции отклика ( $Y$ ) и всех факторов, от которых она зависит ( $x_j$ ). В результате получаем матрицу результатов наблюдений:

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccccc} Y_1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1p} \\ Y_2 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_i & x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_n & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{np} \end{array} \right|, \end{array} \quad (3.13)$$

где  $n$  – количество опытов;

$p$  – число факторов;

$x_{ij}$  – значение  $j$ -го фактора для  $i$ -го опыта;

$Y_i$  – значение функции отклика для  $i$ -го опыта.

Задача множественного регрессионного анализа состоит в построении такого уравнения плоскости в  $(p + 1)$ -мерном пространстве, отклонения результатов наблюдений  $y_i$  от которого были бы минимальными. Или, другими словами, следует вычислить значения коэффициентов регрессии  $b_0, b_j$  в полиноме:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \varepsilon_j, \quad (3.14)$$

что равносильно минимизации выражения [85]:

$$\sum_{i=1}^k (y_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^k [y_i - (b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_j x_{ij} + \dots + b_p x_{ip})]^2, \quad (3.15)$$

где  $Y_i$  – вычисляемые, предсказанные значения исследуемой характеристики.

Обычно зависимость (3.12) представляется в общем полиномиальном виде:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_j x_i + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots, \quad (3.16)$$

где  $b_0$  – свободный член полинома;

$b_j$  – коэффициент разложения  $j = \overline{i, k}$ ;

$x_j$  – исследуемый параметр.

Коэффициенты  $b_j$  являются постоянными в уравнении (3.16), их значения требуется определить в результате постановки пассивного эксперимента. Теоретически точность аппроксимации возрастает с повышением степени полинома, однако, практически для полиномов высоких степеней при проведении матричных операций на ЭВМ накапливаются столь значительные погрешности округления, что решение не всегда становится возможным. На практике [75, 89, 105] обычно ограничиваются построением полинома первого или второго порядка.

Там же отмечено, что минимально необходимое количество точек факторного пространства (опытов) для определения коэффициентов должно быть в 5-6 раз больше количества исследуемых факторов.

Методы обработки экспериментальных данных и планирования эксперимента имеют непосредственное отношение к методу Монте-Карло [106].

В соответствии с этим методом, составляется матрица планирования эксперимента. Далее столбцы в матрице занимают случайными числами, равномерно распределенными от  $-1$  до  $+1$ , а каждая строчка матрицы соответствует определенной точке факторного пространства. Данная матрица имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \dots & \xi_{1p} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \dots & \xi_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{n1} & \xi_{n2} & \dots & \xi_{np} \end{vmatrix}, \quad (3.17)$$

где  $\xi_{ij}$  – значение  $j$ -ой переменной в  $i$ -той точке факторного пространства в кодированном виде.

Матрица получается с помощью датчика случайных чисел, равномерно распределенных от  $-1$  до  $+1$ .

Переход от кодированной матрицы к переменному натуральному значению осуществляется по формуле:

$$x_{ij} = \xi_{ij} \Delta x_j + x_{0j}, \quad (3.18)$$

где  $\Delta x_j$  – интервал варьирования переменной;

$x_{0j}$  – основной уровень переменной.

Для каждой  $j$ -ой переменной в матрице планирования определяется максимальное  $\xi_{\max} = \max(\xi_{ij})$  и минимальное значения  $\xi_{\min} = \min(\xi_{ij})$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

После этого вычисляются:

$$\Delta x_j = \frac{x_{j \max} - x_{j \min}}{\xi_{j \max} - \xi_{j \min}}, \quad (3.19)$$

$$x_{0j} = \frac{x_{j \max} \xi_{j \max} - x_{j \min} \xi_{j \min}}{\xi_{j \max} - \xi_{j \min}}. \quad (3.20)$$

Для оценки степени влияния рассматриваемых факторов, большое значение имеет способ получения коэффициентов регрессии  $b_j$ . Переменные представляются в стандартизированном виде. Форма перевода имеет вид:

$$x = \frac{x - x_{cp}}{\sigma_x}, \quad (3.21)$$

где  $x$  – значение фактора в натуральном виде;

$x_{cp}$  – среднее значение фактора;

$\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение.

Значение коэффициентов парной корреляции определяется по формуле:

$$\tau_{ij} = \frac{\sum_{i,j=1}^n (x_i - x_{i-p})(x_j - x_{j-p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-p})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - x_{j-p})^2}}, \quad (3.22)$$

где  $x_{i-p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $n$  – число точек факторного пространства (число опытов),

$p$  – число факторов.

С целью представления полинома в натуральном масштабе, то есть в виде (3.15), производится преобразование:

$$b_j = \beta_j - \frac{\sigma_y}{\sigma_x}, \quad (3.23)$$

$$b_0 = \bar{Y} - \sum_{j=1}^p b_j x_{j-p}, \quad (3.24)$$

где  $\bar{Y}$  – среднее значение зависимой переменной;

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – среднеквадратичные отклонения входных и выходных переменных.

Для проверки значимости уравнения регрессии в целом с использованием  $F$ -критерия Фишера, общую дисперсию  $\overline{S_y^2}$  сравнивают с остаточной дисперсией  $\overline{S_{y_{ост}}^2}$ , которая представляет собой показатель ошибки предсказания уравнением регрессии результатов опытов. Качество предсказания определяют, сравнивая  $\overline{S_y^2}$  с  $\overline{S_{y_{ост}}^2}$ . Другими словами,  $F$ -критерий Фишера показывает, во сколько раз уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее  $Y$ .

Остаточную дисперсию вычисляют по формуле:

$$\overline{S_{y_{ост}}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p - 1}, \quad (3.25)$$

где  $\hat{Y}_i$  – значение функции отклика для  $i$ -го опыта;

$Y_i$  – вычисляемое по регрессионной модели значение функции отклика для  $i$ -ой точки факторного пространства, которую затем сравнивают с дисперсией среднего  $\overline{S_y^2}$

$n$  – число наблюдений (опытов);

$p$  – число факторов.

При этом, дисперсия среднего равна:

$$\overline{S_y^2} = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (3.26)$$

где  $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$  – среднее значение функции отклика.

Тогда, с учётом (3.25) и (3.26),  $F$ -критерий Фишера равен:

$$\hat{F} = \frac{\overline{S_y^2}}{S_{y_{\text{оцт}}}^2}, \quad (3.27)$$

с числом степеней свободы в числителе –  $\nu_1 = n - 1$  и в знаменателе –  $\nu_2 = n - p - 1$ . Считается, что уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше среднего, если  $\hat{F}$  достигает или превышает границу значимости при выбранном уровне значимости (обычно принимают  $p = 1 - q = 5\%$ ).

Для изучения тесноты связи между функцией отклика  $Y$  и несколькими факторами  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_p$  также используют коэффициент множественной корреляции  $R$  и среднеквадратичное относительное отклонение.

$R$  всегда положителен и изменяется от 0 до 1. Чем больше  $R$ , тем лучше данная модель предсказывает опытные данные.

$R$  можно найти по формуле [107]:

$$R = \sqrt{\frac{1 - S_{y_{\text{оцт}}}^2}{\overline{S_y^2}}} \quad (3.28)$$

или вычислить величину:

$$R' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3.29)$$

связанную с  $R$  соотношением:

$$R = \sqrt{1 - \frac{n-1}{n-p-1}(1 - (R')^2)}. \quad (3.30)$$

Значимость коэффициента множественной корреляции проверяют по  $t$ -критерию Стьюдента:

$$\hat{t}_R = \frac{R}{S_R} \geq t_{(n-p-1)}^T, \quad (3.31)$$

где  $\overline{S_R}$  - среднеквадратичная погрешность коэффициента множественной корреляции:

$$\overline{S_R} = \frac{(1-R^2)}{\sqrt{n-p-1}}, \quad (3.32)$$

значимость  $R$  можно проверить так же и по  $F$ -критерию Фишера:

$$\overline{F_R} = \frac{R^2(n-p-1)}{(1-R^2)p}. \quad (3.33)$$

Полученное значение  $\overline{F_R}$  сравнивают с табличным  $F^T$  при выбранном уровне значимости и числах степеней свободы  $\nu_1 = n - p - 1$  и  $\nu_2 = p$ . Если расчетное значение  $\overline{F_R}$  превышает табличное  $F^T$ , то гипотезу о равенстве коэффициента множественной корреляции нулю отвергают и связь считают статистически значимой.

Оценить относительную значимость факторов по влиянию на результирующий параметр можно по коэффициенту доминанты (взвешенный коэффициент), определяемому из соотношения [99]:

$$\Theta = \left| \frac{\beta_i}{\beta_{\max}} \right|, \quad (3.34)$$

где  $\beta_{\max}$  и  $\beta_i$  - максимальный и  $i$ -тый коэффициенты регрессии стандартизованного вида, соответственно.

Коэффициенты полинома являются частными производными функции отклика по соответствующим переменным. О характере влияния факторов говорят

знаки коэффициентов. Знак плюс свидетельствует о том, что с увеличением значения данного фактора величина зависимого параметра растет, а при знаке минус – убывает.

Блок-схема модели экспериментально-статистической оценки показателей системы ИАО на основе методов многофакторного и регрессионного анализа представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Блок - схема модели экспериментально–статистической оценки показателей системы ТЭ БВС

Таким образом, применяя методы планирования многофакторного и регрессионного анализа, можно получить нужные модели зависимости показателей эффективности ИАО от выбранных факторов.

Выбор факторов, влияющих на ИАО, в данной научной работе осуществляется исходя из современной концепции применения БВС [63] (штатной численности, норм налета и др.) и перевода ее на прогрессивные стратегии ТЭ, с целью сокращения экономических затрат на эксплуатацию БВС, а также требований нормативных документов [39, 40, 108, 109].

В связи с вышеизложенным, существует необходимость проведения анализа влияния параметров лётной деятельности, параметров ТС БВС, сил и средств ИАС получить их аналитические зависимости и оценить их влияние на показатели  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ .

Перечень выбранных параметров и уровни варьирования представлены в таблице 3.5. Полученная матрица планирования экспериментов приведена в Приложении Б.

Строки в матрице заполнялись значениями факторов, а столбцы соответствуют различным опытам. Число опытов определяется количеством исследуемых факторов и определяется по [75]. В данном исследовании для выбранных 12, следовательно, необходимо провести не менее 60 опытов.

В Приложении Б. приведены расчетные (по модели) значения показателей  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  и  $K_5$ , соответственно, для каждого опыта.

Таблица 3.5 – Варьируемые параметры для матрицы планирования.

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Размерность	Значение параметра	
				min	max
1	Планируемый годовой налет	$T_{пл}$	час.	10000	36000
2	Планируемый период	$T_{пл\ пер}$	мес.	1	12
3	Коэффициент исправности АТ на начало моделирования	$Ис^0$	-	0.2	1.0

Продолжение таблицы 3.5

4	Время доставки ЗЧИМ	$t_{\text{ож ЗЧИМ}}$	час.	72	168
5	Время доставки АвД	$t_{\text{ож АвД}}$	час.	48	240
6	Среднее время выполнения КВР (бюллетени промышленности)	$t_{\text{квр}}$	час.	60	240
7	Средняя продолжительность выполнения работ по ПТО	$t_{\text{пто}}$	час.	60	130
8	Средняя продолжительность выполнения работ по ОТО	$t_{\text{ото}}$	час.	2	4
9	Продолжительность выполнения работ по всем видом ТО	$t_{\text{то}}$	час.	1100	3000
10	Параметр потока отказов ФС БВС	$\omega_{\text{о ФС}}$	1/ч	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
11	Параметр потока отказов планера БВС	$\omega_{\text{о П}}$	-	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$
12	Параметр потока отказов шасси БВС	$\omega_{\text{о Ш}}$	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
13	Параметр потока отказов коррозионного состояния БВС	$\omega_{\text{о КС}}$	-	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Выбор вида зависимости проводился с помощью критериев адекватности по выражениям (3.35–3.36).

В работе найдены коэффициенты регрессии, уравнение в стандартизованном виде для каждого уравнения показателей  $K_1 \dots K_5$  которые представлены в Приложении В.

На рисунках 3.4–3.8 представлены результаты оценки значимости влияния на  $K_1 \dots K_5$  (по коэффициентам регрессии стандартизованного вида) различных параметров лётной деятельности и ТС парка БВС.

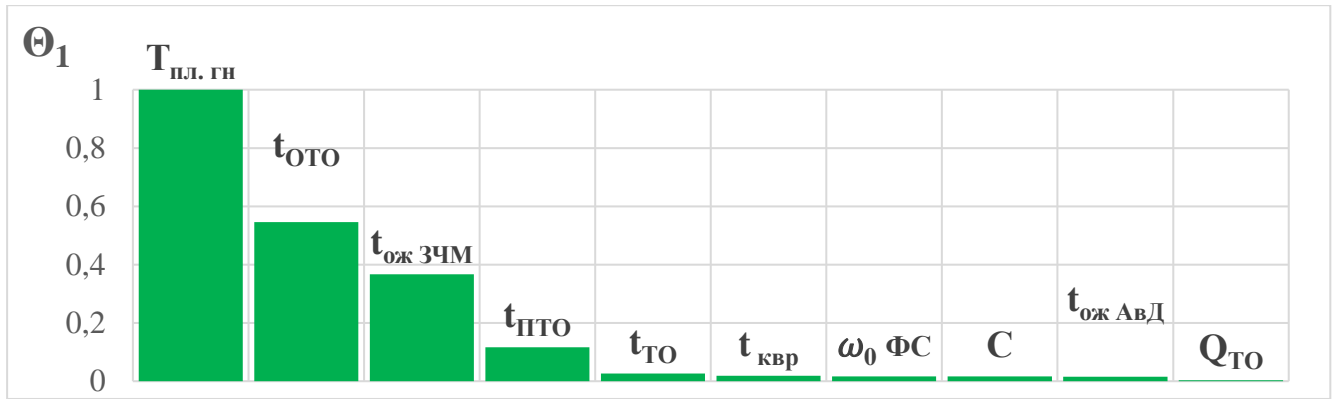


Рисунок 3.4 – Влияние параметров ТЭ и технического состояния парка БЭС на показатель  $K_1$

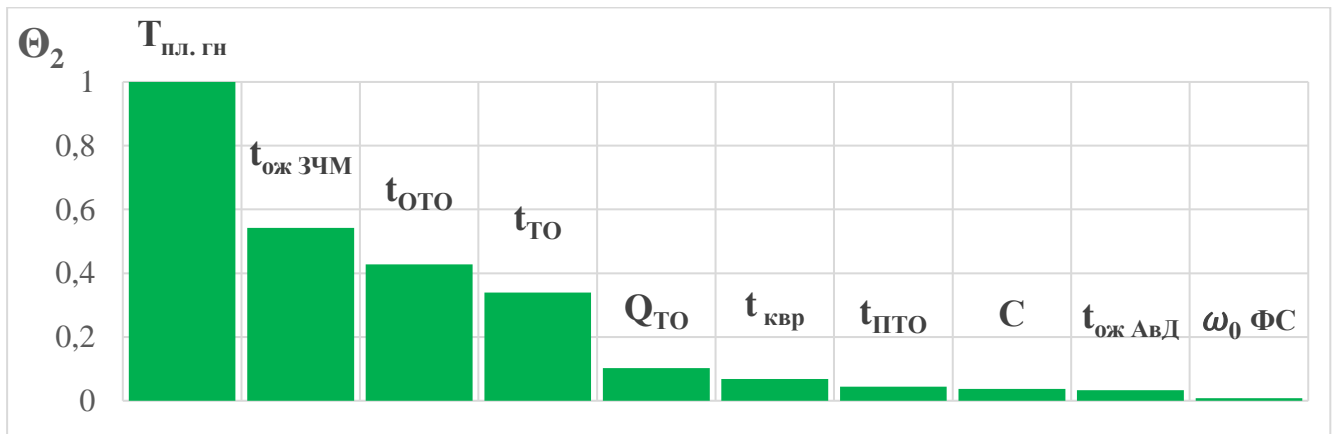


Рисунок 3.5 – Влияние параметров ТЭ и технического состояния парка БЭС на показатель  $K_2$

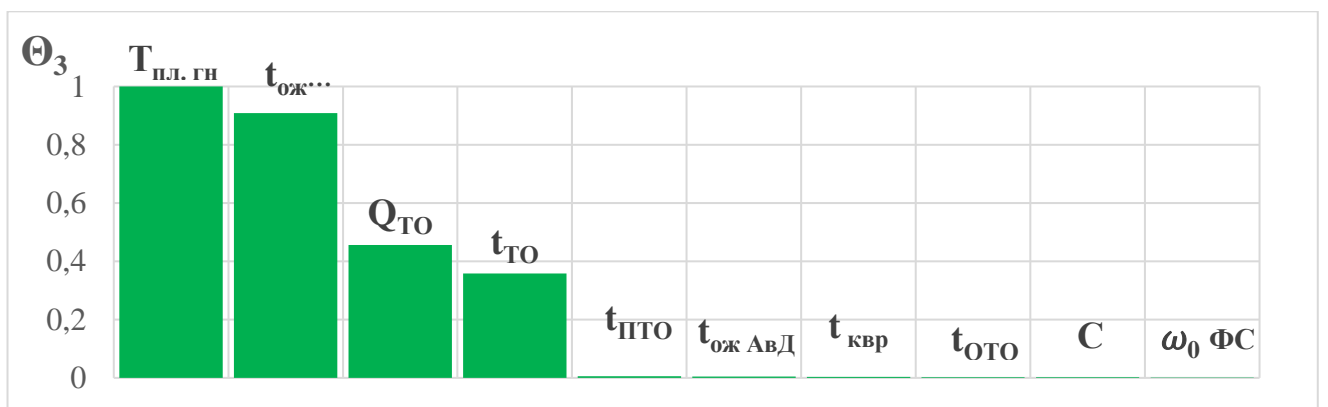


Рисунок 3.6 – Влияние параметров ТЭ и технического состояния парка БЭС на показатель  $K_3$

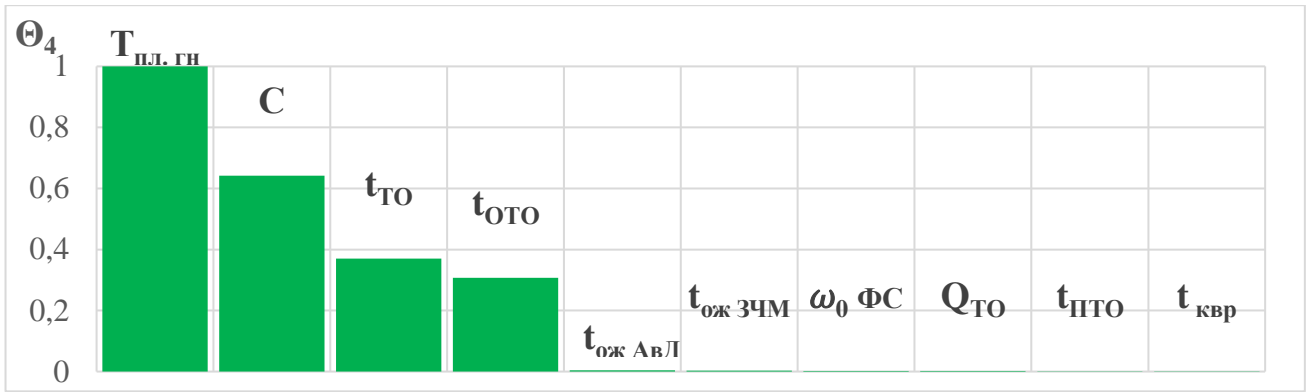


Рисунок 3.7 – Влияние параметров ТЭ и технического состояния парка БВС на показатель  $K_4$

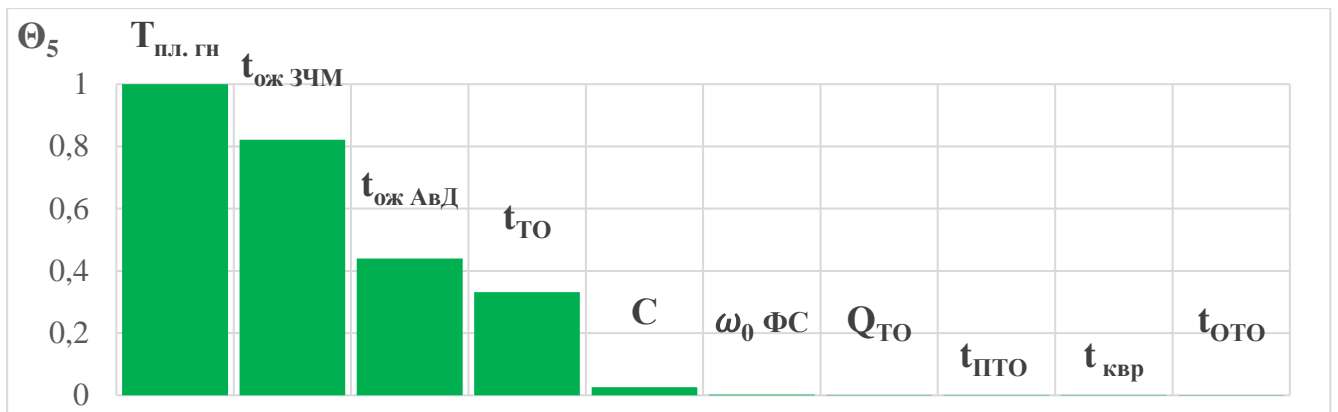


Рисунок 3.8 – Влияние параметров ТЭ и технического состояния парка БВС на показатель  $K_5$

Анализируя рисунки 3.4 - 3.8 можно сделать выводы о влиянии параметров лётной деятельности и ИАО на показатели  $K_1 \dots K_5$ .

Значимыми факторами, влияющими на показатель выполнения плана лётной подготовки ( $K_1$ ), являются:

- планируемый годовой налет;
- продолжительность всех видов ТО АТ;
- трудоёмкость всех видов ТО АТ;
- стоимость ЗЧМ.

Главными же факторами, влияющими на исправность парка авиационных БВС ( $K_2$ ), являются:

- продолжительность выполнения всех видов ТО;
- планируемый годовой налет;
- время ожидания ЗЧМ;
- стоимость ЗЧМ.

Значимыми факторами, влияющими на удельную продолжительность ТО БВС ( $K_3$ ), являются:

- планируемый налёт парка БВС;
- продолжительность выполнения всех видов ТО;
- трудоёмкость выполнения всех видов ТО.

Значимыми факторами, влияющими на удельные трудозатраты ТО БВС ( $K_4$ ), являются:

- планируемый налёт парка БВС;
- продолжительность выполнения всех видов ТО;
- стоимость ЗЧМ.

Основными факторами, влияющими на стоимость ТЭ БВС ( $K_5$ ), являются:

- планируемый налёт парка БВС;
- продолжительность выполнения всех видов ТО;
- стоимость ЗЧМ.

Наиболее значимыми и определяющими факторами, влияющими на эффективность системы ТЭ БВС являются:

- планируемый налёт парка БВС;
- продолжительность и трудоёмкость выполнения всех видов ТО;
- стоимость ЗЧМ.

Таким образом, представленные факторы оказывают различное влияние на выбранные показатели системы ТЭ БВС, которые необходимо учитывать при формировании рационального варианта для различных норм налета и других параметров лётной эксплуатации.

### 3.5 Оценка достоверности и исследование свойств модели системы ТЭ парка БВС в авиационных организациях

Любая модель изделия, процесса, продукции отражает характерные свойства оригинала и, в связи с этим возможны ошибки, несоответствия.

Неточности при моделировании обусловлены следующими основными причинами [91]:

- упрощением исходного моделирующего алгоритма относительно реальных условий;
- неточной дискретной реализацией рабочего алгоритма, в том числе, с применением интерполяционных приемов представления исходной и выходной информации;
- погрешностями, обусловленными ограниченным объемом статистического материала.

В соответствии с вышеизложенным, необходимо провести оценку адекватности модели [88, 103, 110]. Адекватность созданной имитационной модели ТЭ БВС может оцениваться рядом критериев и показателей: непротиворечивостью полученных результатов законам физики, математики, теории вероятностей (сума вероятностей всех состояний равна 1, коэффициент исправности АТ изменяется от 0 до 1 и т.д.); подтверждением результатов эксперимента и реального объекта (сравнением с проверенными и апробированными моделями).

Для одних и тех же условий должно быть выполнено  $N^p$  расчётов основных показателей с заданной точностью по известным методикам [111] и  $N^m=N^p$  прогонов по разработанной модели. По выборкам вычисляется оценка математического ожидания  $\bar{M}_i^m$  по апробированной модели и  $\bar{M}_i^p$  по разработанной модели. Оценка дисперсии  $D(M_i^m)$  производится по апробированной модели и  $D(M_i^p)$  по разработанной модели:

$$\bar{M}_i^M = \frac{1}{N^M} \sum_{K=1}^{N^M} M_{iK}^M, \quad D(M_i^M) = \frac{1}{N^M - 1} \sum_{K=1}^{N^M} (M_{iK}^M - \bar{M}_i^M)^2, \quad (3.35)$$

$$\bar{M}_i^{\mathcal{O}} = \frac{1}{N^{\mathcal{O}}} \sum_{K=1}^{N^{\mathcal{O}}} M_{iK}^{\mathcal{O}}, \quad D(M_i^{\mathcal{O}}) = \frac{1}{N^{\mathcal{O}} - 1} \sum_{K=1}^{N^{\mathcal{O}}} (M_{iK}^{\mathcal{O}} - \bar{M}_i^{\mathcal{O}})^2, \quad (3.36)$$

где  $M_{iK}^M$  математическое ожидание  $i$ -того значения показателя  $K$  по апробированной модели и  $M_{iK}^{\mathcal{O}}$  математическое ожидание  $i$ -того значения показателя  $K$  по разработанной модели.

Основой проверки гипотезы является разность  $E_i = M_i^M - M_i^{\mathcal{O}}$ , оценка дисперсии которой будет вычисляться по формуле:

$$D(E_i) = \frac{(N^M - 1) D(M_i^M) + (N^{\mathcal{O}} - 1) D(M_i^{\mathcal{O}})}{N^M + N^{\mathcal{O}} - 2}, \quad (3.37)$$

где величины  $E_i$  и  $D(E_i)$  являются статически независимыми,  $D(M_i^M)$  - дисперсия по полученным результатам по апробированной модели,  $D(M_i^{\mathcal{O}})$  - дисперсия по полученным результатам по разработанной модели, поэтому можно использовать  $t$ -статистику:

$$t_i = (\bar{M}_i^M - \bar{M}_i^{\mathcal{O}}) \sqrt{\frac{N^M \cdot N^{\mathcal{O}}}{D(E_i) (N^M + N^{\mathcal{O}})}}. \quad (3.38)$$

Используя таблицы распределения  $t$ -статистики [81, 112, 113, 114, 115], приняв  $\alpha=0.05$  и степень свободы 10, найдем критические значения  $t$ -статистики ( $t_{кр}$ ). Результаты оценки достоверности сведены в таблице 3.6. Сравнение параметров достоверности, полученных для разработанной модели и представленной модели [11], дает удовлетворительную сходимость. Различие в полученных значениях расчетных показателей составляет 3...6%.

Таблица 3.6 – Результаты оценки достоверности модели

$\Pi_i$	$M_i$	$D(M_i)$	$D(E_i)$	$t_i$	$t_{кр}$
$K_1^p$	0,99	0,077	0,06	1.45	1.67
$K_1^M$	0.596	0.049	0.02	1.67	1.77
$K_2^p$	0.85	0.03	0.015	1.85	1.95
$K_2^M$	0.83	0.023	0.021	1.84	2.02
$K_3^p$	0,76	0.015	0.010	1.02	1.77
$K_3^M$	5.94	0.04	0.026	1.47	1.70

Кроме того, в таблице 3.7 представлены результаты точности показателей полученной модели.

Таблица 3.7 – Оценка точности разработанной модели

Параметры	Показатели налёта	Исправность парка БВС на начало моделирования
	$T_{ф}, ч$	$I_c, \%$
По апробированной модели	29780	0,65
Модельный эксперимент	27 993	0,61
Погрешность, %	6,0	6,2

Из таблицы 3.6 видно, что погрешность не превышает 6,5%, что удовлетворяет требованиям точности при имитационном моделировании [101].

Для исследования свойств модели необходимо выполнить следующие процедуры:

- оценка устойчивости работы модели;
- исследование чувствительности модели, то есть зависимости изменения  $Y$  от изменения  $X$ .

На рисунке 3.9 показаны результаты оценки устойчивости модели.

В данной работе рассматривались пять откликов модели  $K_1 \dots K_5$ . Из рисунка 3.9 видно, что при заданной точности ( $d_n=0,04$ ) для получения результатов на данной модели достаточно 17...40 реализаций моделирования процесса ТЭ БВС.

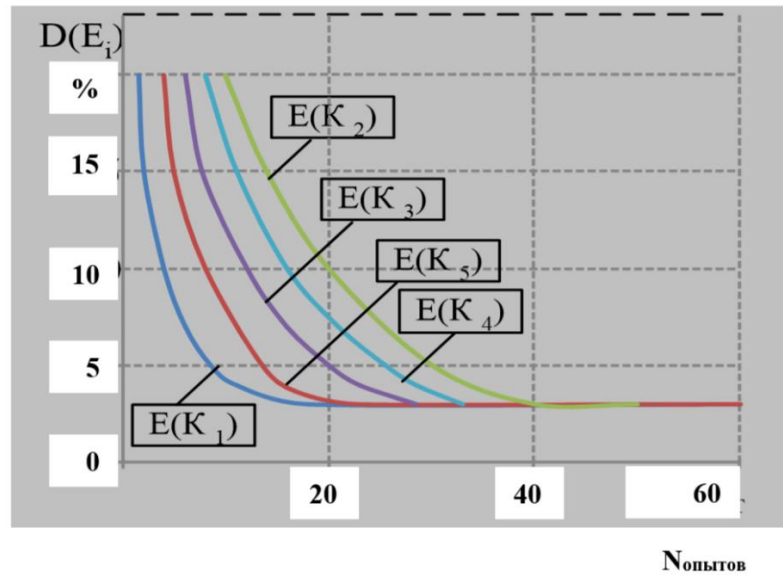


Рисунок 3.9 – Оценка устойчивости математической модели

Кроме того, одной из важных процедур в имитационном моделировании является проведение анализа чувствительности модели.

При определении чувствительности модели выбирается центральная точка значение параметра. Каждое расчетное значение  $X$  выбранного параметра будет отклоняться от центральной точки: от  $\min X_q$  до  $\max X_q$ . Далее вычисляется приращение  $q$ -й компоненты вектора параметров модели [116]:

$$\delta X_q = \frac{(\max X_q - \min X_q) \cdot 2}{(\max X_q + \min X_q)} \cdot 100\%, \quad (3.39)$$

которое и будет приращением вектора  $X$  при изменении только одной компоненты  $q$ . Находится приращение  $n$ -й компоненты вектора отклика:

$$\delta Y_n = \frac{(\max Y_n - \min Y_n) \cdot 2}{(\max Y_n + \min Y_n)} \cdot 100\%. \quad (3.40)$$

Чувствительность модели по  $q$ -й компоненте вектора параметров  $X$  определяется парой значений  $(\delta X_q^0, \delta Y_q)$ . Эта пара чисел показывает, на сколько процентов может измениться отклик модели при увеличении  $q$ -й компоненты параметров на  $\delta X_q^0$  процентов. Затем подобным образом поступают с остальными компонентами вектора параметров  $X$ .

Чувствительность модели оценивалась по пяти параметрам (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Результаты оценки чувствительности модели

Параметр	Значения		Критерии				
	min	max	$\delta_{K1}$	$\delta_{K2}$	$\delta_{K3}$	$\delta_{K4}$	$\delta_{K5}$
$T_{пл}$	3000	36000	25	1,8	0,06	8,3	7,6
$t_{квр}$	50	240	1	1,06	1,03	1,3	3
$t_{ТО}$	1100	3000	1,4	1,2	1,01	1,3	7,5
$t_{ож\ зчИМ}$	72	120	7	1,1	1,02	1,01	4,5
$t_{ПТО}$	50	125	1,3	1,2	1,06	1,18	1,7

Таким образом, полученные результаты оценки свойств модели говорят о возможности использования ее для проведения научных исследований эффективности системы ТЭ БВС в ходе выполнения авиационными организациями задач лётной деятельности.

Было выявлено, что оценка эффективности ИАО представляет собой многокритериальную задачу, для решения которой была определена совокупность показателей эффективности выполнения планов лётной деятельности, эффективности использования парка БВС.

### 3.6 Исследование влияния эксплуатационных факторов и МТО на эффективность системы ТЭ БВС

Исследуя с помощью, разработанной имитационной модели процесс функционирования системы ТЭ парка БВС, можно установить поведение интересующей нас величины (выходных параметров  $Y$ ) при изменении влияющих на них входных параметров  $X=(x_1, \dots, x_n)$ .

Входные параметры  $X$  условно можно разделить на три группы:

1 группа – задачи лётной эксплуатации и условия их выполнения.

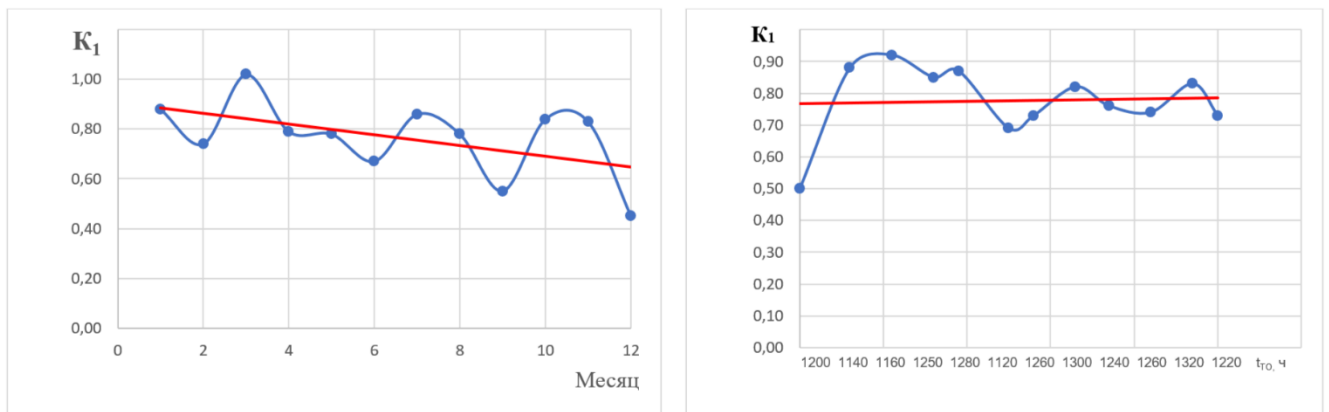
2 группа – параметры ТЭ БВС (трудозатраты, время выполнения всех видов работ и др. параметры).

3 группа – состояние парка БВС.

Таким образом, для выбранных параметров (характеристических функций) БВС проведем исследования эффективности системы ТЭ.

На рисунке 3.10 (а, б) представлены зависимости показателя  $K_1$  в течение календарного срока эксплуатации и влияние продолжительности ТО БВС на  $K_1$ . Из рисунка видно, что при принятых параметрах сценария ТЭ БВС, на показатель  $K_1$  в большей степени влияет планируемый налёт и продолжительность ТО (Приложение Б). Планируемый налёт выполняется в третьем месяце, в остальных случаях несколько ниже планируемого.

В начальный период эксплуатации (рисунок 3.10.б)  $K_1 = 0,5$  в связи с вводом в строй новый АТ. Далее, изменение показателя выполнения налета изменяется от 0,7 до 0,9, что обусловлено ОУЭ, поставками ЗЧМ и др.



—  $K_1$  с учетом стохастических параметров — линия тренда  $K_1$

а)

б)

Рисунок 3.10 – Распределение  $K_1$  а) в течение календарного срока эксплуатации  
б) зависимость  $K_1$  от продолжительности всех видов ТО БВС

Аппроксимация  $K_1$  в течение календарного срока эксплуатации и в зависимости от продолжительности ТО на рисунке 3.10 выполнена по уравнениям  $y = -0,0216x + 0,9065$  и  $y = 8E-07x + 0,7666$  соответственно.

Следует заметить, что эффективность выполнения задач эксплуатации БВС эксплуатантами напрямую зависит от исправности парка АТ. Продолжительность всех видов ТО оказывает значительное влияние на исправность парка БВС.

Характер изменения показателя  $K_2$  (рисунок 3.11 (а, б)) за планируемый период, от 75 до 90% (рис 3.11 а), зависит от продолжительности и трудоёмкости всех видов ТО (рис 3.11 б), поставки ЗЧМ и др. Если продолжительность всех видов ТО составляет 1120 часов, исправность достигает 86% (для выбранного парка БВС в диссертации).

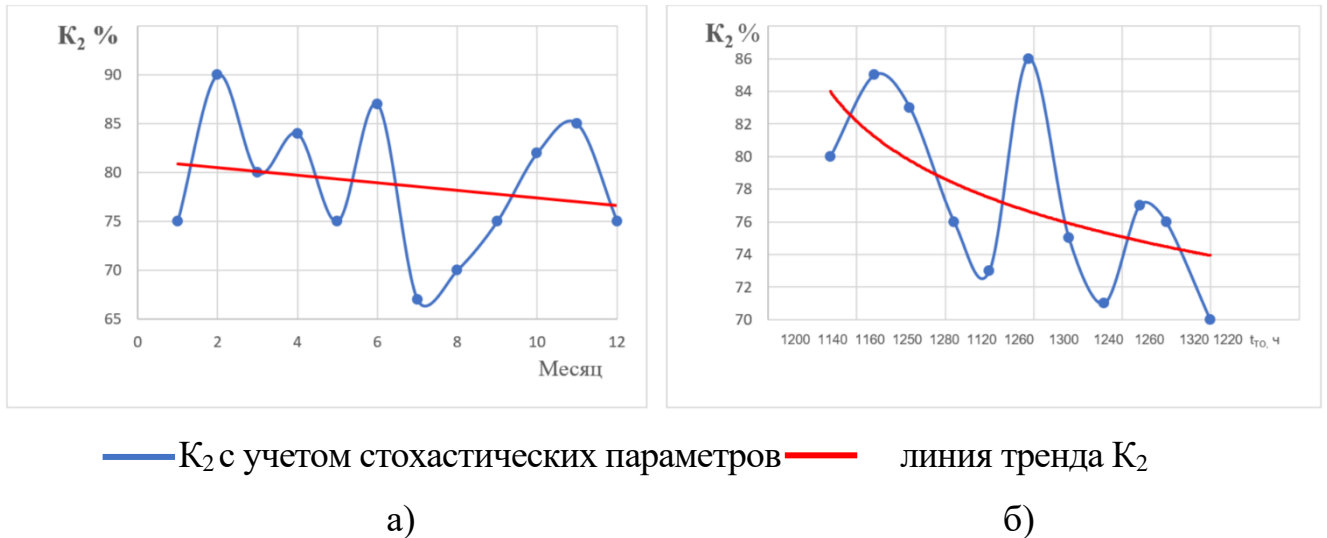
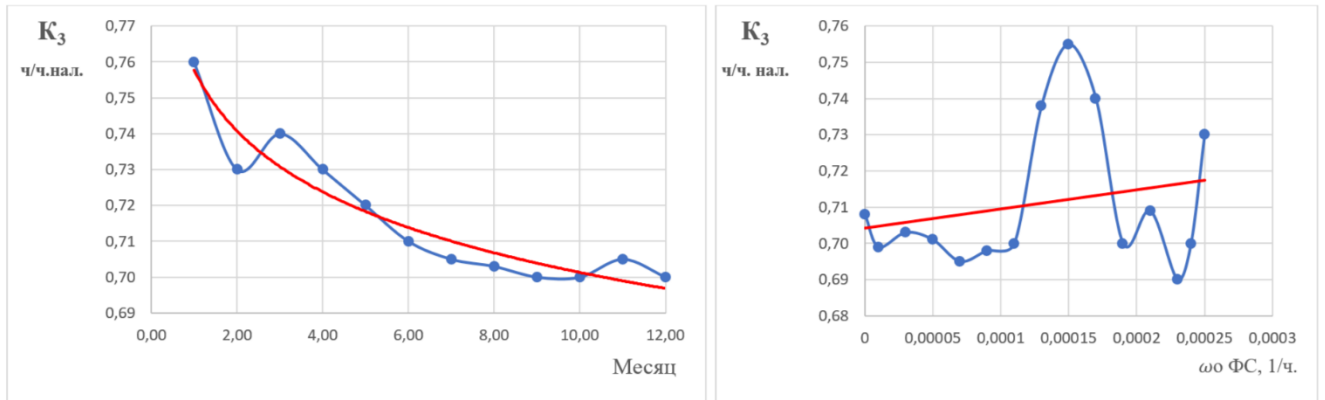


Рисунок 3.11 – Распределение  $K_2$  а) в течение календарного срока эксплуатации б) зависимость  $K_2$  от продолжительности всех видов ТО БВС

Аппроксимация  $K_2$  в течение календарного срока эксплуатации и в зависимости от продолжительности ТО на рисунке 3.11 выполнена по уравнениям  $y = -0,3881x + 81,273$  и  $y = -5,114\ln(x) + 125,73$  соответственно.

В общем случае при увеличении продолжительности всех видов ТО возрастает и коэффициент  $K_3$ . Однако при принятом сценарии ТЭ БВС удельная продолжительность работ по ТО в течение года снижается от 0,76 до 0,70 (рисунок 3.12 а) в связи с достижением заданного уровня режимов ТО, надёжности ФС БВС. Параметр потока отказов (рисунок 3.12 б) ФС БВС не оказывает существенного влияния на коэффициент  $K_3$  в диапазоне  $\omega_{o\text{ ФС}}$  от  $2,5 \cdot 10^{-5}$  до  $2,5 \cdot 10^{-3}$ .

Аппроксимация  $K_3$  в течение календарного срока эксплуатации и в зависимости от влияния фактора  $\omega_{o\text{ ФС}}$  на рисунке 3.12 выполнена по уравнениям  $y = -0,024\ln(x) + 0,7577$  и  $y = 52,286x + 0,7043$  соответственно.



—  $K_3$  с учетом стохастических параметров — линия тренда  $K_3$

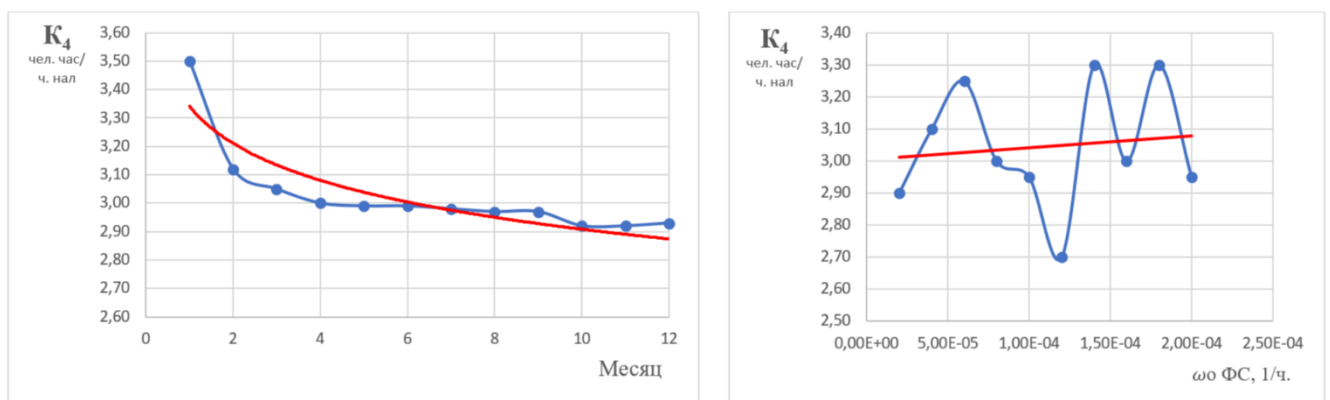
а)

б)

Рисунок 3.12 – Распределение  $K_3$  а) в течение календарного срока эксплуатации  
б) зависимость  $K_3$  от параметра потока отказов ФС БВС

В процессе ТЭ парка БВС в течение года снижается не только удельная продолжительность ТО (рисунок 3.12 а), но и удельная трудоёмкость с 3,0 до 2,9 чел. час/час налета (рисунок 3.13 а).

При выполнении исследований, случайным образом (с помощью генератора случайных чисел) были получены значения параметра потока отказов ФС и выполнены расчеты по оценке влияния фактора  $\omega_o$  ФС на удельную трудоёмкость (рисунок 3.13 б). Из графика видно, что  $K_4$  изменяется от 2,7 до 3,30 чел. час/час налета при изменении  $\omega_o$  ФС  $2,5 \cdot 10^{-5}$  до  $1,0 \cdot 10^{-4}$ .



—  $K_4$  с учетом стохастических параметров — линия тренда  $K_4$

а)

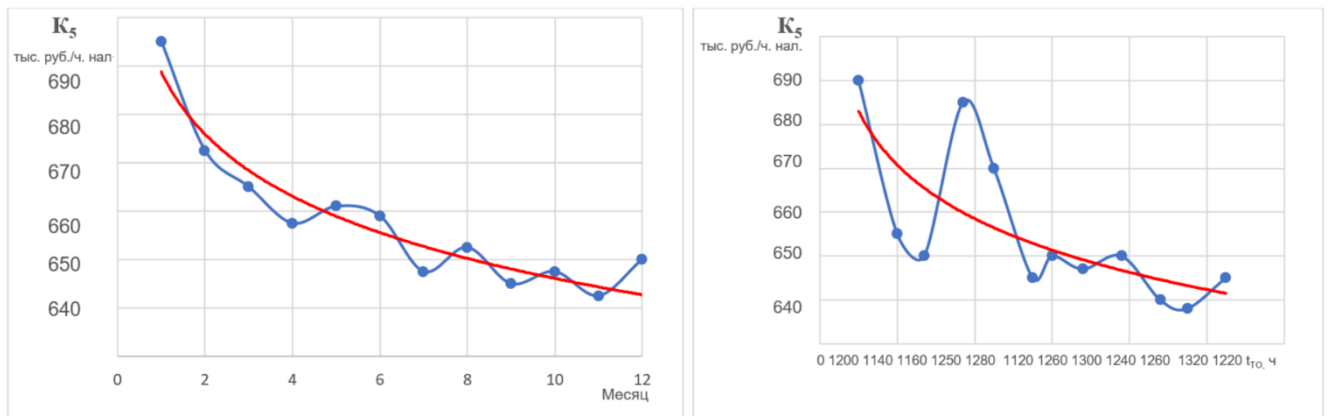
б)

Рисунок 3.13 – Распределение  $K_4$  а) в течение календарного срока эксплуатации  
б) зависимость  $K_4$  от параметра потока отказов ФС БВС

Аппроксимация  $K_4$  в течение календарного срока эксплуатации и в зависимости от влияния фактора  $\omega_{o\text{ФС}}$  на рисунке 3.13 выполнена по уравнениям  $y = -0,188\ln(x) + 3,3409$  и  $y = 378,79x + 3,0033$  соответственно.

Анализируя экономическую составляющую системы ТЭ парка БВС, можно сделать вывод, что в первоначальный период эксплуатации БВС, разработчиком АТ, как правило, устанавливается небольшая периодичность выполнения работ, повышенный контроль ТС ФС и БВС в целом. В диссертации, для выявления зависимости влияния финансовых затрат на ТЭ, заданы расходы в размере 2 млн. 100 тыс. рублей в месяц на парк БВС.

Поэтому в первый год эксплуатации происходит снижение затрат и удельных затрат от 690 до 640, тыс. рублей/налет парка в месяц (рисунок 3.14 а, б).



—  $K_5$  с учетом стохастических параметров — линия тренда  $K_5$

а)

б)

Рисунок 3.14 – Распределение  $K_5$  а) в течение календарного срока эксплуатации  
б) снижение трудозатрат на ТЭ БВС в первый год эксплуатации

Аппроксимация  $K_5$  в течение календарного срока эксплуатации и в зависимости от продолжительности ТО на рисунке 3.14 (б) выполнена по уравнениям  $y = -37,02\ln(x) + 2077,5$  и  $y = -17,63\ln(x) + 2145,3$  соответственно.

### 3.7 Выводы по третьей главе

1. Разработана имитационная модель ТЭ БВС при выполнении авиационными организациями лётной деятельности, которая позволяет:

- оценивать фактическое выполнение плана налета парка ВС;
- определять и прогнозировать исправность парка БВС;
- прогнозировать нахождение парка БВС авиационных организаций в различных состояниях в зависимости от начальных условий;
- определять удельные продолжительность и трудоёмкость ТО БВС;
- определить влияние эксплуатационных расходов на ТЭ парка БВС.

2. Проведена оценка значимости факторов, влияющих на эффективность системы ТЭ с применением методов теории планирования эксперимента. В период проведения исследований выявлено, что наиболее значимыми параметрам являются:

- планируемый годовой налет;
- продолжительность и трудоёмкость всех видов ТО АТ;
- стоимость ЗЧМ.

3. Результаты оценки точности, чувствительности и устойчивости модели дают основания использовать данную программу для исследования эффективности системы ТЭ БВС.

4. Результаты исследования позволили установить максимальные значения коэффициентов  $K_3$  и  $K_4$  не более 0,7 и 3,0 соответственно. Данные значения коэффициентов рекомендуется использовать при разработке БВС и для корректировки системы ТО в процессе эксплуатации.

## Глава 4. Разработка и верификация научно–методического обеспечения и ПЛГ БАС на основе информационных технологий

### 4.1. Информационные технологии по обеспечению и ПЛГ БАС

При формировании и совершенствовании процессов и процедур технической эксплуатации, ПЛГ БАС могут применяться различные виды и методы научно–методического обеспечения:

- технологии и средства моделирования, испытания и количественного измерения характеристик БВС (имитационное моделирование, метод экспертных оценок, метод натурных испытаний, метод взлётно-посадочных фотокамер, метод интегрирования скоростей и перегрузок);
- программы для математических расчётов в научном программном обеспечении [117, 118];
- ППО для решения задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей [119];
- прикладное программное обеспечение для расчёта конструкции БАС [120];
- ППО для расчёта характеристик СТЭ БВС [1];
- информационно-управляющие системы [20, 122];
- цифровой двойник (прототип, экземпляр, агрегированный двойник);
- цифровая модель лётной годности БАС [123];
- технологии зондирования и комплексной обработки информации для БВС (в том числе технического зрения);
- СУБД.

Разрабатываемые физические, математические и компьютерные модели могут отражать различные характеристики свойства изделий. Объединяя различные виды моделей, информацию об изделиях в единую систему, можно получить новую сущность — цифровой двойник, который позволит всесторонне

описать объект исследования и системно подойти к разработке, производству и эксплуатации БАС [2].

На этапах разработки, производства БАС за счёт использования IT-технологий возможно сокращение продолжительности и количества циклов испытаний опытных образцов изделия. На данной стадии жизненного цикла АТ применение цифровых двойников позволяет обосновывать принятые решения за счет быстрой проверки изменений, вносимых в конструкцию изделия и его составных частей, в ходе цифровых (виртуальных) испытаний, и анализировать влияние изменений показателей одних составных частей на другие. Кроме того, с помощью цифрового двойника возможно определить критические зоны и оптимальное количество датчиков, которое необходимо разместить на изделии для получения объективных данных с целью обеспечения ТЭ и модернизации изделия.

Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях ЖЦ изделия, изменяясь на каждой стадии. Наполнение и функциональность цифрового двойника зависит от стадии ЖЦ изделия.

Внедрение цифровых технологий, в том числе цифровых двойников), на стадии эксплуатации изделия позволяет:

- при применении (использовании) изделия по назначению – автоматизировать и выполнять обоснованное планирование применения изделия в зависимости от его функциональных свойств и ТС;

- при наличии компетенций в организации по ТО БАС по модернизации БВС (разработчик и изготовитель) быстро и качественно, с учётом требований БП, выполнять модификации БАС;

- во время ТЭ принимать обоснованные решения о режимах ТО изделия.

Лётная годность БАС является сложной и многоуровневой задачей, требующей взаимодействия специалистов, автоматизированных систем и ИТ. Системный подход к ПЛГ обеспечивает повышение безопасности эксплуатации и снижение затрат на ТО в долгосрочной перспективе.

## 4.2 Верификация информационной базы данных ПЛГ БАС

Созданная информационная система обеспечения и ПЛГ БАС имеет пять модулей, взаимодействующих между собой и представляющую в конечном итоге цифрового помощника для специалиста по ЛГ БАС, для лица принимающего решение (ЛПР) [12] (рисунок 4.1).

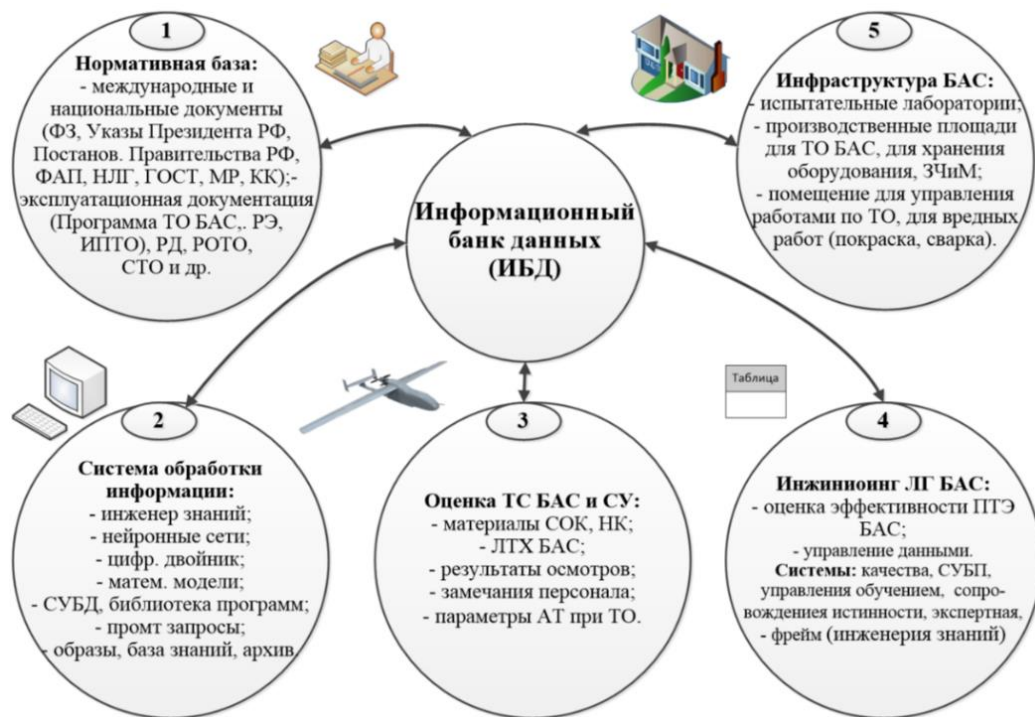


Рисунок 4.1 Блок – схема информационной системы ЛГ БАС

Разработанная СУБД позволяет соединить в единую систему НПА по обеспечению ЛГ БАС, различные виды апробированного ППО, результаты оценки ТС АТ, систему ПЛГ БАС, факторы, влияющие на качество ПЛГ.

В модуле «Нормативная база» (рисунок 4.2) хранятся актуализированные Приложения ИКАО, Федеральные законы России, ФАП, НЛГ, РЭ, информация по планированию ТО (ИПТО).

Эти документы используются для актуализации и формирования локальных нормативных актов, таких как РОТО, стандарты организаций. Основой для разработки и совершенствования таких документов являются эталонные

экземпляры, разработанные подготовленными, обладающими нужными компетенциями, экспертами.

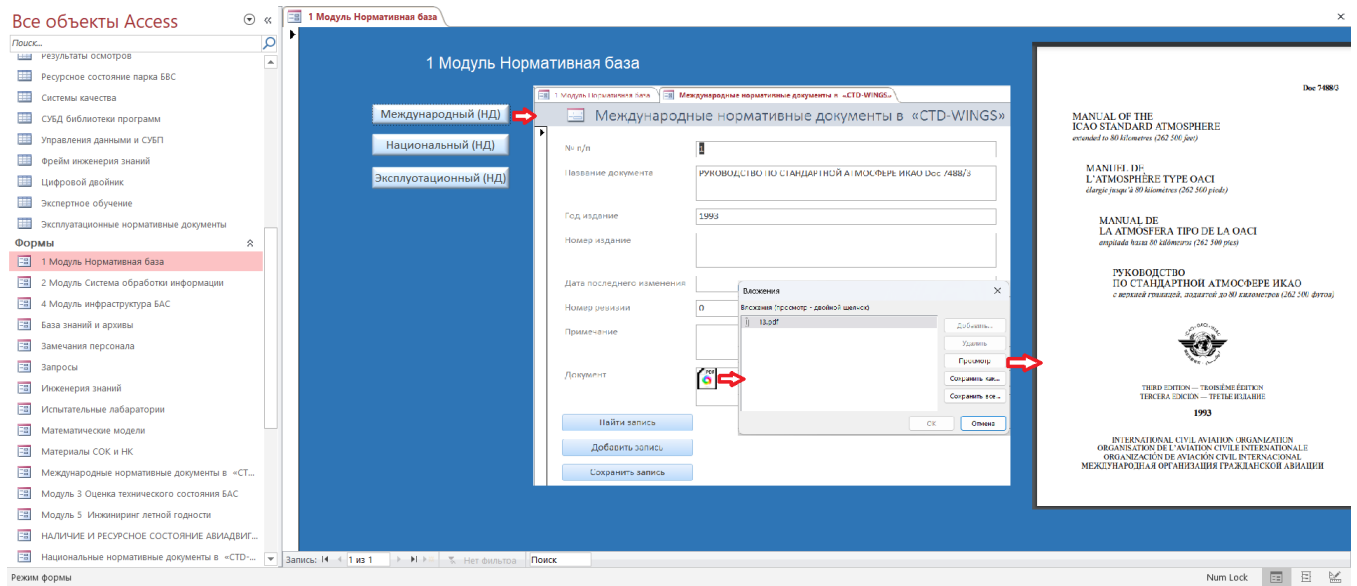


Рисунок 4.2 – Вид главной кнопочной формы модуля НПА СУБД

Модуль «Система обработки информации» (рисунок 4.3) позволяет формировать запросы по расчету требуемых информационных объектов с помощью нейросетей, актуализированного, апробированного ППО.

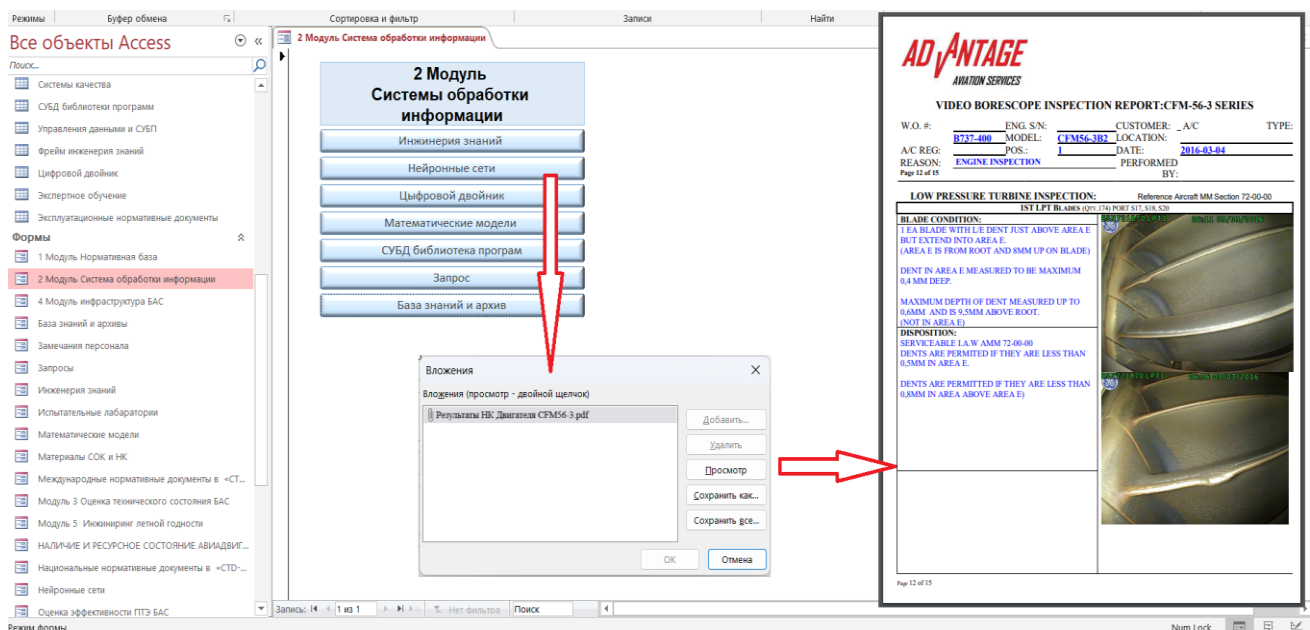


Рисунок 4.3 – Вид кнопочной формы модуля системы обработки информации в СУБД

На основе материалов СОК и НК, ресурсного состояния парка БВС, наличия ресурса АД, результатов осмотра, параметров АТ при ТО модуль «Оценка технического состояния БАС» (рисунок 4.3) позволяет оценивать ТС БВС, планировать ТО, формировать пакет задач по выполнению работ.

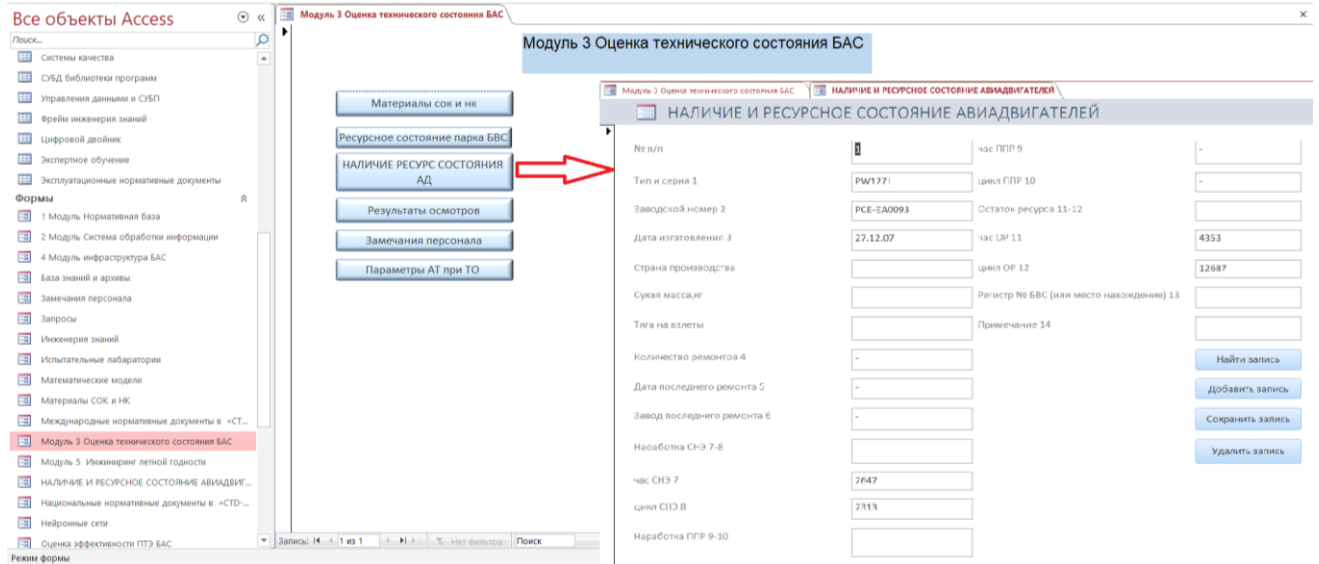


Рисунок 4.4 – Вид кнопочной формы модуля оценки ТС БАС в СУБД

Блок «Инфраструктура БАС» (рисунок 4.4) предназначен не только для оценки существующих производственных и вспомогательных помещений, но и для их совершенствования на основе опыта эксплуатации.

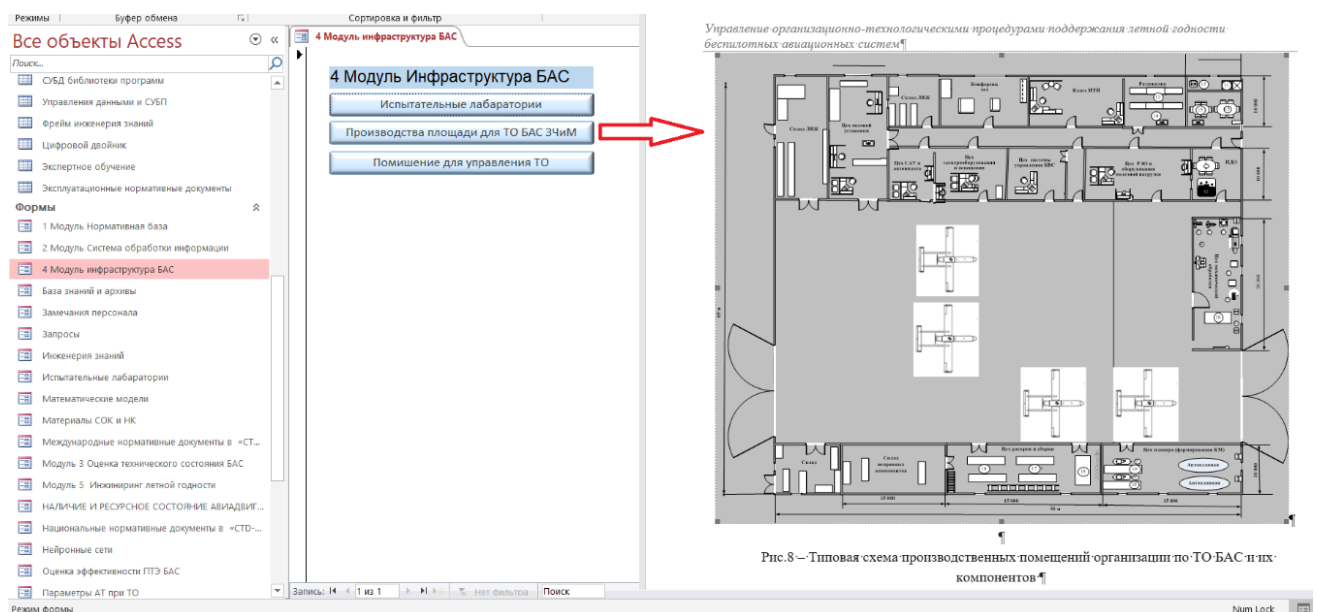


Рис. 8 – Типовая схема производственных помещений организации по ТО БАС и их компонентов

Рисунок 4.5 – Вид кнопочной формы модуля инфраструктуры БАС в СУБД

Разработанное в рамках данной диссертации ППО позволяет оценить качество ПТЭ БАС, спрогнозировать состояние парка (рисунок 4.5). Также СУБД делает возможным использовать знания экспертов для формализации и структурирования информации об исследуемых объектах.

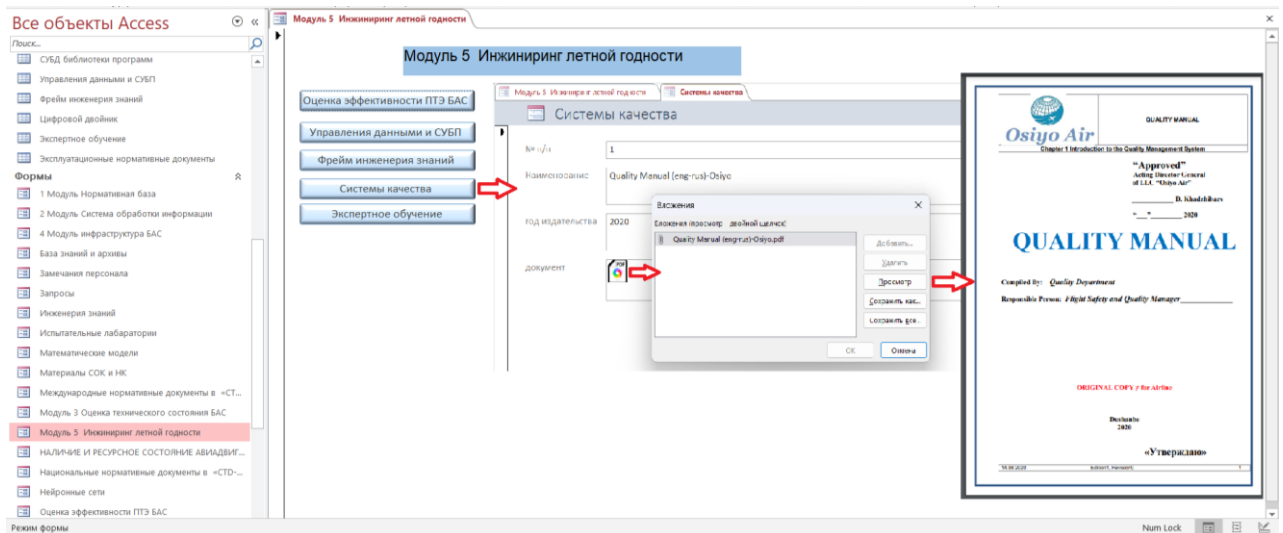


Рисунок 4.6 – Вид кнопочной формы модуля инжиниринга ЛГ БАС в СУБД

### 4.3 Разработка методики формирования рациональной системы ТЭ парка БАС с использованием ППО на основе интегральной математической модели

#### 4.3.1 Основные этапы создания эффективной системы ТЭ парка БАС

Главная задача системы ТЭ заключается в поддержании и восстановлении исправности и работоспособности АТ, которая должна эффективно функционировать при установленной схеме применения и ОУЭ.

Выполнение этих функций системой ТЭ должно обеспечиваться с минимальными трудовыми и материальными затратами, для более эффективного и

экономически выгодного использования АТ.

Методика формирования рациональной системы ТЭ парка БВС в ходе функционирования представлена в виде схемы на рисунке 4.7.

При проведении ИАО АТ, ИАС реализует мероприятия технического, а также других видов обеспечения.

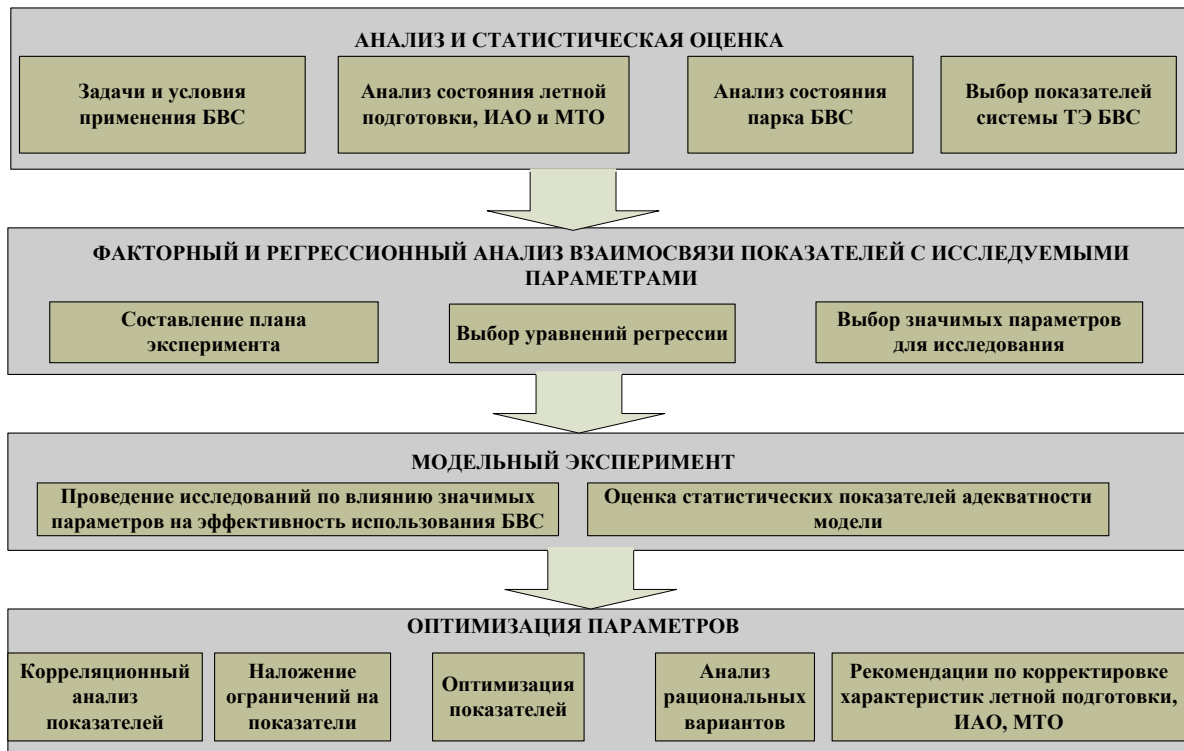


Рисунок 4.7 – Методика формирования рациональной системы ТЭ парка БВС

Заданные функции системы ТЭ БВС должны обеспечиваться с минимальными трудовыми и материальными затратами, для более эффективного и экономически выгодного использования БВС.

К основным этапам формирования рациональной системы ТЭ парка БВС следует отнести (рисунок 4.7):

#### I. Анализ и статистическая оценка.

1) Оценка задач и условий функционирования авиационного предприятия (формирование сценария ПЛГ, определение годового налета, МТО и др.).

2) Анализ состояния летной деятельности, инженерно-авиационного и МТО (определение плана летной деятельности, продолжительности подготовок ЛА к

полету и др.).

3) Анализ эксплуатационных характеристик БВС (средний налет на отказ и повреждение, налет на преждевременно снятый АвД и др.).

4) Анализ приспособленности конструкции БВС, его составных частей и изделий к выполнению ТЭ по состоянию.

## II. Факторный и регрессионный анализ.

1) Ввод результатов имитационного эксперимента в модель регрессионного анализа и получение регрессионных зависимостей.

2) Оценка значимости исследуемых факторов.

3) Выбор расширенной регрессионной модели для проведения оптимизации. Определение коэффициентов регрессионной модели.

## III. Модельный эксперимент

1) Подготовка исходных данных, обоснование уровней варьирования исследуемых параметров.

2) Составление и получение плана имитационного эксперимента.

3) Оценка показателей эффективности и экономичности системы ТЭ парка БВС для рассматриваемых вариантов (планируемого годового налета и доли наличия и распределения ЗЧМ, доли отхода агрегатов ФС и АвД на работы по состоянию и др.).

4) Выполнение необходимых расчетов по плану эксперимента.

## IV. Оптимизация параметров, характеризующих состояние системы ЛГ БВС.

1) Определение взаимозависимости показателей.

2) Наложение критериальных ограничений на показатели  $k_i$ .

3) Выбор модели оптимизации.

4) Оптимизация показателей  $k_i$  (случайный поиск).

5) Анализ рациональных параметров ТС парка БВС.

6) Анализ рациональных значений показателей, ИАО функционирования предприятия.

### 4.3.2 Выбор рациональных параметров системы ТЭ парка БВС

Для выбора рациональных параметров ИАО, определяющих наибольшую эффективность ИАО (по выбранным показателям) для различных значений планируемого годового налета, разработано достаточно большое количество методов линейной и нелинейной оптимизации [89, 92, 102, 124, 125]. Результатом выбора для каждого значения планируемого годового налета является вариант, позволяющий обеспечить экстремум выбранного критерия.

При оптимизации сложных организационно-технических систем целевая функция обычно является нелинейной относительно оптимизируемых параметров. Как правило, практический интерес представляет поиск критерия оптимизации в некоторой ограниченной области, задаваемой рядом соображений. При отсутствии ограничений задача оптимизации является безусловной и, как правило, ее решение не представляет интереса.

По данным [126, 127, 128], наиболее целесообразными методами оптимизации для проведения поисковых исследований в сложных организационно-технических системах широкое применение нашел метод случайного поиска с адаптацией по направлению. Поэтому для поиска рациональных вариантов системы ТЭ БВС применялся данный метод.

Это обусловлено следующими особенностями:

1. Глобальностью случайного поиска, которая позволяет решать многоэкстремальные задачи, возникающие при идентификации сложных систем.
2. Простотой адаптации случайного поиска, что дает возможность применять эффективные алгоритмы идентификации.
3. Эффективностью случайного поиска при оптимизации многомерных систем.
4. Наличием большого числа оптимизируемых входных параметров (более двух десятков).

Для дальнейшего проведения поисковых исследований по формированию рационального варианта параметров ИАО при функционировании авиационной

организации, необходимо провести оценку взаимозависимости выбранных показателей  $K_1, K_2, K_3, K_4$  и  $K_5$ .

По результатам расчета (Приложение А) по имитационной модели в таблице 4.1 представлены коэффициенты парной корреляции, которые говорят о том, что коэффициенты  $K_3$  и  $K_4$  являются независимыми.

Таблица 4.1 – Коэффициенты парной корреляции

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
$K_1$	1	0	0	0	0
$K_2$	0,16	1	0	0	0
$K_3$	0,09	0,29	1	0	0
$K_4$	0,12	0,11	-0,02	1	0
$K_5$	-0,16	0,12	-0,17	-0,22	1

Поиск рационального варианта параметров системы ТЭ парка БВС по разработанной в третьем разделе диссертации модели требует получения ее расширенного полиномиального аналога для оценки влияния исследуемых факторов на показатели системы ТЭ в абсолютном виде. При этом, полученные регрессионные модели представляются в общем виде:

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^p a_j \log x_j + \sum_{j=1}^{p-1} a_{j1} \log(x_j x_i) + \sum_{j=1}^p a_{jj} \log x_j^2, \quad (4.1)$$

где:  $a_0, a_j, a_{j1}, a_{jj}$  - коэффициенты регрессии.

Получены расширенные регрессионные модели взаимосвязи исследуемых показателей с выбранными для оптимизации факторами (таблица 4.1), которые используются для поиска их рациональных значений с помощью метода оптимизации – случайного поиска с адаптацией по направлению.

При использовании метода случайного поиска с адаптацией шага и плотности распределения случайных величин для задач условной оптимизации необходимо учитывать следующее обстоятельство. Как правило, в качестве

начальной точки всегда можно определить такое значение вектора  $\overline{\overline{X}}_i$ , при котором будет выполняться условие:

$$-1 \leq \overline{\overline{X}}_i \leq 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.2)$$

что соответствует выполнению ограничений, накладываемых на допустимые значения аргументов. Условие (4.2) легко выполняется, если каждой  $i$ -той переменной присвоить нулевое значение. Однако, когда, помимо условия (4.2), требуется соблюдение требования:

$$q^{(i)}(\overline{\overline{X}}_k) \in G, \quad (4.3)$$

то алгоритм может не сойтись к минимальному значению функции. Это обусловлено тем, что в некоторых случаях в начальной точке  $\overline{\overline{x}}_0^{(i)} \in G$  может оказаться, что:

$$q^{(i)}(\overline{\overline{X}}_k) \notin G. \quad (4.4)$$

Для устранения подобной трудности, т. е. для определения такой начальной точки поиска, в которой выполнялись одновременно условия (4.1), (4.2), формируется целевая функция вида:

$$\Phi = [x^{(n+j)} - q^{(j)}(\overline{\overline{X}})]^2, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4.5)$$

где  $n$ - количество независимых переменных;

$m$ - количество ограничиваемых функций.

Величина  $x^{(n+j)}$  может принимать значение из диапазона:

$$q_{\min}^{(i)} \leq x^{(n+j)} \leq q_{\max}^{(i)}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (4.6)$$

Таким образом, добавляется как бы «m» новых независимых переменных, которые, как и «n» исходных переменных, генерируются на каждом шаге поиска алгоритма оптимизации, но при условии выполнения требования (4.6) в то время, как значения функции  $q^{(j)}(\bar{X})$  вычисляются в соответствии с задаваемыми этим же алгоритмом величинами исходных независимых переменных.

Естественно, что в том случае, когда  $\Phi=0$ , вычисленная величина функции  $q^{(j)}(\bar{X})$  будет равна какому-либо значению этой же j-той функции из допустимой области G.

В процессе оптимизации были установлены критериальные ограничения выбранных показателей:

$$0,8 \leq K_1 \leq 1,2; K_2 \longrightarrow \max; 0,7 \leq K_3 \leq 0,72; 2,8 \leq K_4 \leq 3,1; K_5 \leq 690$$

Получены оптимальные значения исследуемых входных параметров  $\{X^*\}$ , перечень которых представлен в таблице 4.2. В таблице 4.2 представлены рациональные значения этих параметров для парка БВС при планируемом годовом налете до 36000 часов.

Таблица 4.2 – Рациональные значения параметров ТЭ БАС

Варианты расчета	Наименование параметра							
	$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ож\ АвД}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{то}$	$Q_{то}$
Вариант 1	3000,00	72,00	178,00	214,00	55,00	3,00	1190	24561,00
Вариант 2	9000,00	95,00	166,00	227,00	76,00	4,00	1240	16881,00
Вариант 3	15000,00	107,00	193,00	100,00	97,00	4,00	1120	37540,00

*Продолжение таблицы 4.2*

Варианты расчета	Наименование параметра				Показатели			
	C	$\omega_0\ ФС$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	
Вариант 1	103145,00	0,000025	1,19	74,26	0,70	2,90	640000	
Вариант 2	12087273,00	0,000047	1,03	84,63	0,72	2,84	650000	
Вариант 3	24294981,00	0,000163	0,82	80,97	0,70	3,06	655000	

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана методика формирования рациональной системы ТЭ БВС, позволяющая выбрать из большой совокупности возможных решений рациональный вариант.

С использованием разработанной методики проведен выбор рационального

варианта № 2 ТЭ для БАС с БВС самолётного типа, максимальной взлетной массой БВС более 30 кг, при годовом налете до 36000 часов для десяти БВС. Выбранные рациональные параметры ИАО позволяют прогнозировать исправность парка БВС в течение календарного года эксплуатации.

#### **4.4 Использование нейросети при обеспечении и ПЛГ БАС**

##### **4.4.1 Актуализация локальных НПА авиационных организаций**

Лётная годность БАС является сложной и многоуровневой задачей, требующей взаимодействия специалистов, автоматизированных систем и обновленных технологий. Системный подход к ПЛГ обеспечивает повышение безопасности эксплуатации и снижение затрат на обслуживание в долгосрочной перспективе.

В данном исследовании рассмотрен подход с применением нейросетей с целью совершенствования процессов ПЛГ БАС. Был смоделирован запрос (промт), который содержит задание на анализ всей загружаемой документации.

В ИБД включено более 70 российских и международных нормативных актов. Созданный ИБД использовался для актуализации локальных нормативных документов авиационной организации с помощью нейросети [2].

На основе промт – запросов выполнен анализ и актуализация Руководства по организации технического обслуживания эксплуатанта (РОТО) объемом 130 страниц (таблица 4.3, 4.4).

Таблица 4.3 – Промт-запросы специалиста по ПЛГ БАС и ответы нейросети



Запрос специалиста по ПЛГ БАС	Запрос специалиста по ПЛГ БАС
<p>Представь, что ты опытный авиационный инженер в сфере поддержания лётной годности гражданских воздушных судов и беспилотных воздушных судов. Прошу изучить актуальную нормативную документацию, которую загружаю в виде файлов. Изучи все файлы, проанализируй для использования последующих ответах.</p>	<p>Проанализируй, пожалуйста, актуальность и соответствие РОТО организации требованиям действующих нормативным документом. Выдай рекомендации по устранению несоответствий.</p>
<i>Ответ нейросети</i>	<i>Ответ нейросети</i>
<p><i>Отлично, звучит как отличная идея! Я готов работать в роли опытного авиационного инженера и с интересом изучу всю нормативную документацию, которую ты предоставишь. Просто загружай файлы, и я тщательно их проанализирую. После этого смогу использовать полученную информацию для ответов на любые твои вопросы, разработки мелодических материалов, подготовки отчетов и всего, что потребуется. Жду первый файл!</i></p>	<p> Да, смогу. Учитывая, что я уже полностью проанализировал обширный массив актуальной нормативной документации (включая ИКАО, ФАП, ГОСТ, модели ИКАО по БАС, стратегии, руководства, Аппех-ы, Дос-и, Сиг-ы, а также национальные правила по ПЛГ, ТО, сертификации, подготовке персонала и т. д.), готов:</p> <p> Проверить документ эксплуатанта на:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- соответствием международным и национальным нормативам;</li> <li>- наличие устаревших ссылок, формулировок, процедур;</li> <li>- правильность ссылок на стандарты, процедур, терминов;</li> <li>- полноту и корректность требования к ПЛГ, СУБП, ТО, БАС, СЛГ и т.д.</li> </ul> <p><input checked="" type="checkbox"/> Указать:</p> <p>Некорректные или устаревшие положения – с пояснением и обоснованием;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- правильные формулировки или актуальные ссылки, которые должны быть использованы;</li> <li>- при необходимости – дать рекомендации по приведению документа в соответствие с действующими нормами.</li> </ul>

Таблица 4.4 – Результаты анализа РОТО с помощью нейросети

Раздел, страница	Фрагмент документа	Комментарий	Рекомендация/Актуальное требование
Раздел 6.5, стр. 71–74	«Перед использованием проверьте актуальность документа на корпоративном портале...»	Указан только внутренний источник. Не соответствует ФАП-145, п. 44	Дополнить: «Актуализация производится в соответствии с процедурами, одобренными Росавиацией, и в рамках уведомлений ICAO/EASA/FAA.»
Раздел 6.6, стр. 75	«Бортжурналы ВС хранятся в течение 36 месяцев...»	Устаревший срок хранения. Не соответствует ФАП-145, п. 42–44	Установить срок хранения: до окончания эксплуатации +24 мес или до передачи новому владельцу
Весь документ	–	Нет упоминания о СУБП. Нарушение требований Annex 19 ИКАО, Doc 9859, ФАП-147	Включить раздел о внедрении и функционировании СУБП согласно Annex 19 и ФАП-147
Стр. 62	приказ ФАС РФ от 09.12.98 № 357	Устаревший приказ. Документ не действует.	Заменить ссылкой на ФАП-10 (актуальные нормативы по сертификации эксплуатантов и лётной годности).
Раздел 6.9, стр. 76	«...на документы по поддержанию лётной годности США, Европы оформляется подписка...»	Подписка не заменяет официальное внедрение. Нарушение ИКАО Doc 9760, Annex 6.	Добавить: «Использование допускается только после аккредитации и утверждения уполномоченным органом.»

#### 4.4.2 Использование нейросети для оценки технического состояния авиационных ГТД

В настоящее время достоверная информация о ТС БВС и их двигателях в открытых источниках отсутствует, поэтому использованы данные для пилотируемых ВС и их двигателей.

В ходе исследования, по полученным результатам неразрушающего контроля (НК) компрессора и газовой турбины (ГТ) двигателя CFM56-3 с помощью дефектоскопа «General Electric Go++ Olympus», сформулировано заключение и

рекомендации специалиста по НК. Кроме того, были сгенерированы запросы в нейросети, которая сформировала технический отчет по выявленным дефектам, состоянию и целостности деталей двигателя, его пригодности к эксплуатации, рекомендуемые действия и ссылки на Aircraft Maintenance Manual (АММ) и другие технические документы.

Результаты НК компрессора высокого давления (КВД) двигателя CFM56-3 представлены на рисунке. 4.8.

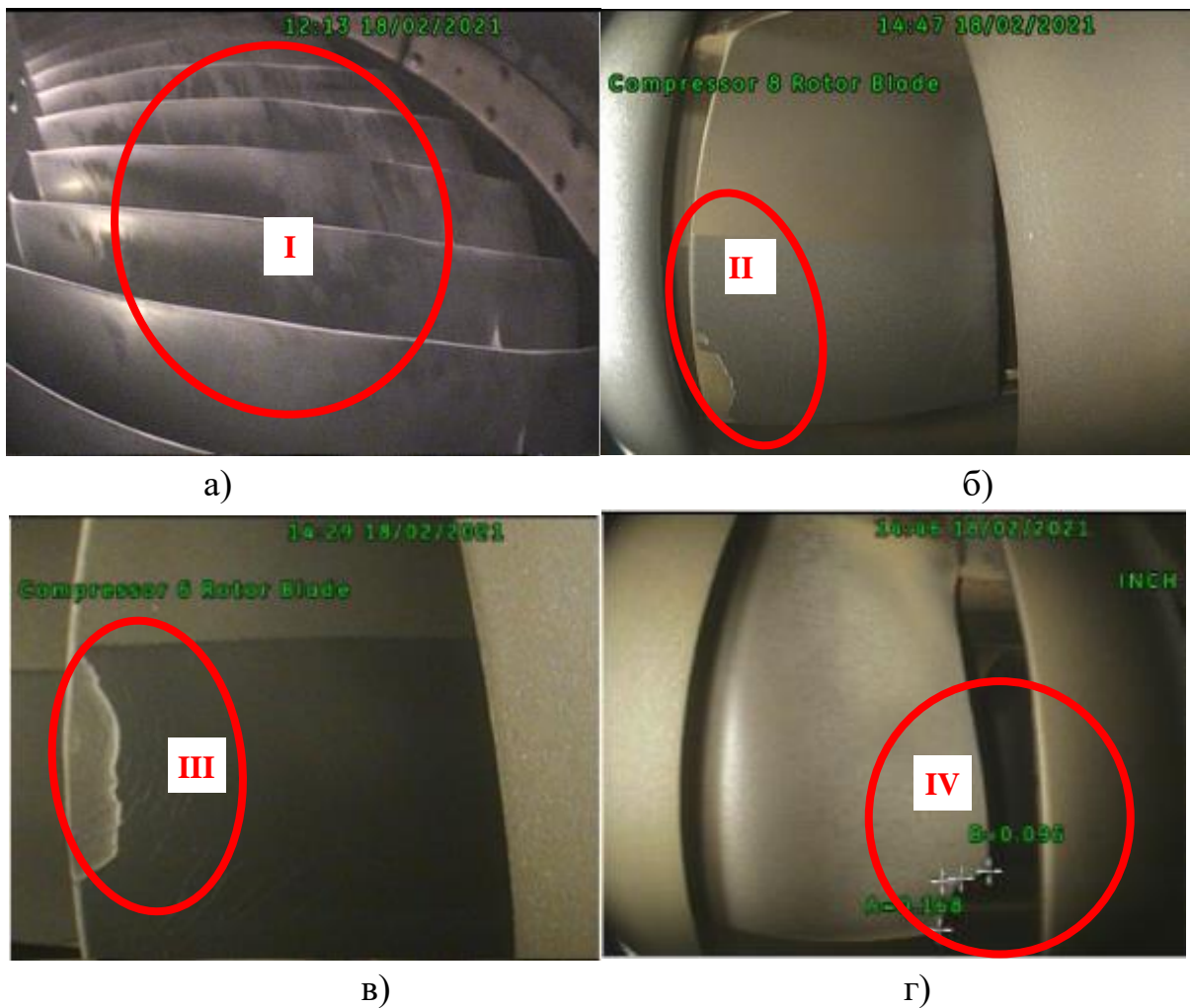


Рисунок 4.8 – Результаты контроля эндоскопом компрессора двигателя CFM56-3  
а) загрязнения на рабочих лопатках V ступени КВД (рис. 4.8 зона I); б) на 8 - й рабочей лопатке V ступени КВД нарушение защитного покрытия (рис. 4.8 зона II); в) на 6 - й рабочей лопатке V ступени КВД нарушение защитного покрытия (рис. 4.8 зона III); г) частичное разрушение рабочей лопатки КВД по задней кромке (0,168 x 0,096 дюйма) (рис. 4.8 зона IV)

Основные результаты оценки ТС двигателя, сделанные специалистом по НК и нейросетью, не различаются (совпадают).

В таблицах 4.5 и 4.6 представлены выводы и рекомендации по результатам контроля ТС КВД двигателя CFM56-3 специалистом по НК и сгенерированные нейросетью.

Таблица 4.5 – Выводы по результатам контроля технического состояния компрессора двигателя CFM56-3

Выводы по результатам контроля ТС компрессора специалистом по неразрушающему контролю	Выводы по результатам контроля ТС компрессора сгенерированные нейросетью
На рабочих лопатках V ступени КВД наблюдаются загрязнения (рис. 5 а)	–
На 8 - й рабочей лопатке V ступени КВД нарушение защитного покрытия (рис. 5 б)	Отмечена изменённая окраска поверхности, характерная для ударного повреждения или попадания постороннего объекта (FOD) (рис. 5 б)
На 6 - й рабочей лопатке V ступени КВД нарушение защитного покрытия (рис. 5 в)	Изменение окраски поверхности, характерная для ударного повреждения (рис. 5 в)
Частичное разрушение рабочей лопатки КВД по задней кромке (рис. 5 г)	Одна лопатка демонстрирует структурные повреждения, вероятно вызванные высокочастотной усталостью (НСФ) или ударным воздействием (рис. 5 г)

Таблица 4.6 – Рекомендации по результатам контроля технического состояния компрессора двигателя CFM56-3

Рекомендации по результатам контроля ТС компрессора специалиста по НК	Рекомендации по результатам контроля ТС компрессора сгенерированные нейросетью
Выполнить промывку проточной части компрессора двигателя	Провести НК и осмотр всех лопаток 5-й ступени компрессора
Заменить повреждённые лопатки КВД	Проанализировать журнал эксплуатации на предмет вибраций и записей о попадании посторонних объектов

В ходе работы по оценке ТС турбины низкого давления (ТНД) двигателя CFM56-3 использованы результаты дефектоскопического контроля (рисунок 4.9),

выводы и рекомендации специалиста по НК. Кроме того, в нейросеть «загружены» фотографии элементов турбины двигателя и получены, выводы и рекомендации сгенерированные нейросетью (Табл. 4.7 и 4.8)

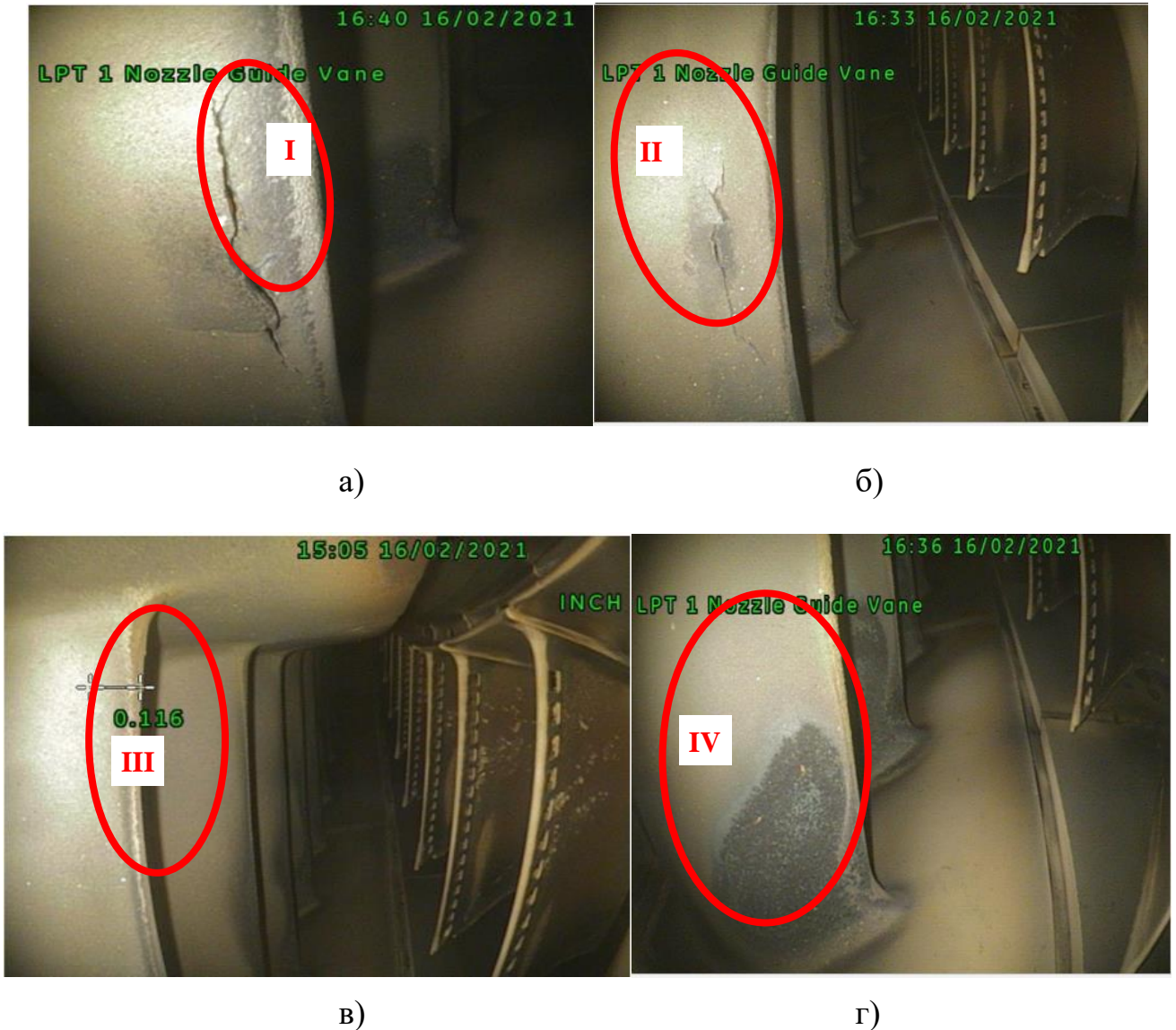


Рисунок 4.9 – Результаты контроля эндоскопом турбины двигателя CFM56-

3 а) трещина на лопатке СА 1-й ступени ТНД (зона I); б) трещина на лопатке СА 1-й ступени ТНД (зона II); в) эрозия на поверхности лопатки СА 1-й ступени ТНД: 0.116 дюйма (~2.95 мм) (зона III); г) наличие цветов побежалости, перегрев или на поверхности лопатки СА 1-й ступени ТНД СА (зона IV)

Таблица 4.7– Выводы по результатам контроля технического состояния ТНД двигателя CFM56-3

Выводы по результатам контроля ТС турбины специалистом по НК	Выводы по результатам контроля ТС турбины сгенерированные нейросетью
Наличие трещины на лопатке СА 1-й ступени ТНД (рис. 6 а)	Значительный продольный трещинообразный дефект на поверхности лопатки СА ГТ (рис. 6 а)
Наличие трещины на лопатке СА 1-й ступени ТНД (рис. 6 б)	Значительный продольный трещинообразный дефект на поверхности лопатки СА ГТ (рис. 6 б)
Эрозия на лопатке СА 1-й ступени ТНД (рис. 6 в)	Замеренное повреждение/эрозия на поверхности лопатки (0.116 дюйма (~2.95 мм) (рис. 6 в)
Наличие цветов побежалости, перегрев или на поверхности лопатки СА 1-й ступени ТНД СА (рис. 6 г)	Обширная зона изменения цвета и текстуры, возможно, перегрев или нагар на лопатке (рис. 6 г)

В процессе создания сущности «Цифровая модель ЛГ БАС» создан ряд промт – запросов для нейросетей с целью анализа работоспособности АТ. Нейросеть сформировала и определила состояние турбины двигателя, в том числе, предложила следующие выводы:

Таблица 4.8 – Рекомендации по результатам контроля технического состояния турбины двигателя CFM56-3

Рекомендации по результатам контроля ТС турбины специалиста по НК	Рекомендации по результатам контроля ТС турбины сгенерированные нейросетью
Отстранение двигателя от эксплуатации	Остановка эксплуатации двигателя
Требуется ремонт СА 1 -й ступени ТНД (рис. 6)	Общее состояние компонентов ТНД 1-й ступени (LPT Stage 1) требует ремонта или замены в соответствии с АММ (Aircraft Maintenance Manual).
Выполнить контроль состояния камеры сгорания и топливных форсунок двигателя	Проверка температуры и профиля потока газа в камере сгорания для выявления причины перегрева

Продолжение таблицы 4.8

Выполнить контроль состояния камеры сгорания и топливных форсунок двигателя	Проверка температуры и профиля потока газа в камере сгорания для выявления причины перегрева
Выполнить анализ температурных режимов двигателя по материалам объективного контроля	Проведение анализа причинно-следственной связи (РСФА) при повторяющихся трещина

В ходе исследования было рассчитаны трудоёмкость и продолжительность НК компрессора и турбины двигателя CFM56-3 (4.7, 4.8).

$$t_{\text{фак}} = t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}} \quad (4.7)$$

где  $t_{\text{фак}}$  - фактическое время выполнения работ,  $t_{\text{окон}}$  - время окончание работ,  $t_{\text{нач}}$  - время начало работ.

$$H_{\text{итог}} = H \cdot (1 + \kappa).$$

$$H_{\text{итог}} = \frac{t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}}}{60} \cdot (1 + \kappa), \quad (4.8)$$

где  $H$  – итоговое время выполнения НК с учётом оформления заключения,  $t_{\text{фак}}$ ,  $t_{\text{окон}}$ ,  $t_{\text{нач}}$  – время в минутах,  $\kappa = 0,25$  - поправочный коэффициент на подготовку, демонтаж, монтаж, отчётность.

Продолжительность оценки ТС проточной части двигателя специалистом по НК составило 3 часа 30 мин, включая оформление заключения. При использовании нейросети удалось сократить время выполнения работ до 3 часов, причём снизилась вероятность ошибки диагностирования. Следует отметить, что заключение нейросети имеет неточности и несоответствия (табл. 4.5, 4.6, 4.7, 4.8), что устраняется «обучением» нейросети

В процессе эксплуатации АТ для выдачи исчерпывающих рекомендаций цифровой моделью ЛГ БАС, необходимо включить в ИБД как можно большее количество вариантов решений той или иной проблемы, в том числе, при оценке ТС двигателя.

#### 4.4.3 Использование нейросети для оценки технического состояния ГТД по термодинамическим параметрам

Внедрение цифровых технологий (цифровых двойников) на стадии эксплуатации изделия позволит:

- при применении (использовании) изделия по назначению – автоматизировать и выполнять обоснованное планирование применения изделия в зависимости от его функциональных свойств и ТС;
- во время ТЭ принимать обоснованные решения о техническом обслуживании изделия.

Рассмотрим функционирование цифровой модели ЛГ БАС на примере оценки ТС турбореактивного двигателя (ТРД) БВС по параметрам, регистрируемых СОК.

По промт-запросам, формируемым в элементе «**Цифровая модель ЛГ БАС**» (рисунок 4.10) нейронные сети выдают информацию о работоспособности АТ. Одним из важнейших параметров ГТД, характеризующих ТС является температура выходящих газов, от которой в свою очередь зависит скорость истечения газового потока и тяга ТРД.

Скорость истечения газа из сопла внутреннего контура (для двухконтурных двигателей)

$$C_{Cl} = \varphi_{Cl} \cdot \sqrt{2c_{Pz.n} T_T^* \left(1 - \frac{1}{e_c}\right)}, \text{ м/с}, \quad (4.9)$$

где  $c_{Pz.n} = 1158,3 \text{ Дж/кг/К}$ ;  $\varphi_{Cl} = C_{Cl} / C_{Cl \text{ ид}}$  – заданное в исходных данных значение коэффициента скорости реактивного сопла внутреннего контура.

$$P_{уд} = \frac{P_{удI} + P_{удII}}{1 + m} \text{ Н/(кг/с)}, \quad (4.10)$$

где  $P_{удI}$  - удельная тяга внутреннего контура,  $P_{удII}$  - удельная тяга наружного контура

Зачастую температура выходящих газов измеряется за турбиной  $T_T^*$ . На некоторых ГТД температура измеряется между турбиной высокого давления (ТВД) и ТНД. Например, на маршевом перспективном двигателе российского производства ПД-14 температура выходящих газов измеряется за ТНД и составляет на взлётном режиме  $T_T^* \leq 660$  °С.

В ходе исследования, параметры ТРД CFM56, полученные во время полётов по маршруту, были размещены в нейронные сети, где были построены графики зависимости температуры выходящих газов по времени (рисунок 4.10). Такие же зависимости, для проверки адекватности работы нейросетей, были построены в программном обеспечении - Microsoft Excel (рисунок 4.10). Сравнение искомым значений построенными в Microsoft Excel и в нейросетях, позволило сделать вывод, что погрешность составляет не более 3 % (таблица 4.9).

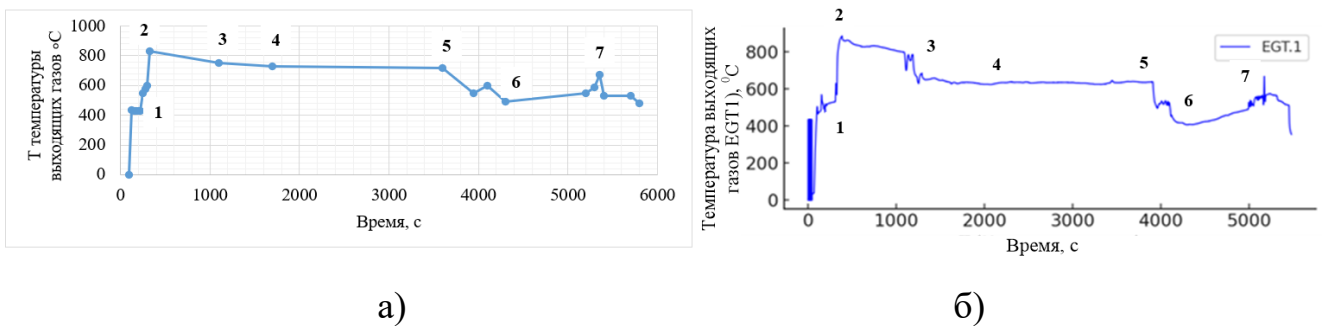


Рисунок 4.10 – Зависимость температуры выходящих газов построенные в Microsoft Excel (а) и нейросетью, (б)

Таблица 4.9 – Значения температуры выходящих газов

Идентификатор	Температура выходящих газов, °С						
	1	2	3	4	5	6	7
Номер точки на графиках	1	2	3	4	5	6	7
Значения из нейросети	435	830	760	660	651	478	680
Значения из Microsoft Excel	430	830	750	670	660	490	670
Погрешность, %	1,16	0,00	1,33	1,52	1,38	2,51	1,49

В процессе длительной эксплуатации БВС с ТРД в результате загрязнений проточной части компрессора, увеличения радиальных зазоров в компрессоре и турбине, других дефектов различных элементов ТРД, как правило, происходит увеличение температуры газа в турбине. Специалистами ПЛГ ВС проводится мониторинг запаса предельных значений температуры выходящих газов. В случае достижения предельных значений температуры выходящих газов двигатель подлежит отстранению от эксплуатации.

Для определения зависимости температуры выходящих газов ТРД от налёта с помощью нейросетей, авторы задались линейным законом распределения величин в выбранном диапазоне.

В этом случае линейная зависимость была определена нейросетями следующим образом

$$T = aH + b, \quad (4.11)$$

где  $T$  - температура выходящих газов, °С;  $H$  — налёт, час.;  $a$  – угловой коэффициент (изменение температуры на 1 час налёта);  $b$  - начальная температура при нулевом налёте.

Для определения коэффициентов  $a$  и  $b$  использовался метод наименьших квадратов:

$$a = \frac{N \sum (H_i T_i) - \sum H_i \sum T_i}{N \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2} \quad (4.12)$$

$$b = \frac{\sum T_i - a \sum H_i}{N}, \quad (4.13)$$

где  $N$  - количество измерений;  $H_i$  - налёт, час;  $T_i$  – температура выходящих газов.

В ходе проведённых расчётов были получены значения искомых коэффициентов:

$$a \approx 0,0053; \quad b \approx 850; \quad T = 0,0053H + 850.$$

По сформированному промт - запросу нейросети была построена зависимость температуры выходящих газов от времени (рисунок 4.11).

Для нашего случая максимально допустимая температура выходящих газов составляет 930 °С. Начальное значение температуры для контроля 850 °С. Из опыта эксплуатации следует, что при достижении контролируемого  $\Delta T_i \approx 30$  °С необходимо выполнить процедуры для увеличения запаса температуры. В данном исследовании предлагается для выдачи рекомендаций цифровой моделью ЛГ БАС, в ИБД включить как можно большее количество вариантов решений проблемы.

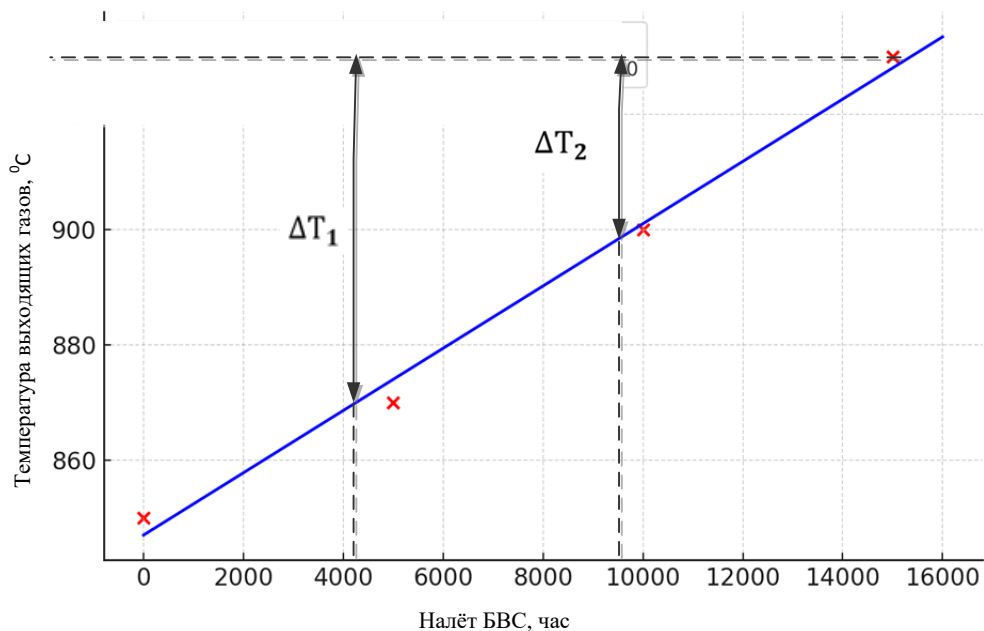


Рисунок – 4.11 Изменение температуры выходящих газов ТРД в зависимости от налёта

В качестве рекомендаций при оценке ТС ТРД по материалам СОК в цифровую модель ЛГ БАС (рисунок 4.10) следует включить следующие положения:

- запустить и опробовать двигатель с контролем параметров, проанализировать параметры, сделать вывод о соответствии требованиям РЭ;

- выполнить промывку газоздушного тракта двигателя. По мнению специалистов авиационной организации «С 7 ИНЖИНИРИНГ» регулярная промывка двигателя позволяет существенно увеличить его наработку до ухудшения характеристики EGT Margin (запас по температуре выходящих газов), при которой двигатель необходимо направлять в ремонт. При этом экономия топлива составляет 1%.

- произвести неразрушающий контроль элементов ГТД: осмотр лопаток компрессора, турбины и камеры сгорания, выполнить трибодиагностику;

- если не удаётся снизить температуру выходящих газов вышеперечисленными методами, следует уменьшить расход топлива и получить меньшие значения тяги. Эксплуатацию БВС следует продолжить с новыми (меньшими) значениями тяги.

#### **4.5 Совершенствование инфраструктуры ТО БАС**

Производственная инфраструктура играет ключевую роль в обеспечении летной годности БВС. Основная задача производственной инфраструктуры создание условий для эффективного выполнения ТО. На практике это достигается путем возведения производственных помещений и оснащения цехов современным оборудованием, разработки документации для выполнения работ, оптимальной организацией рабочего пространства, а также учета требований безопасности.

В рамках Национального проекта «Производительность труда», действующего до 2024 года, в авиакомпании «КрасАвиа» под управлением экспертов Федерального центра компетенций проходило обучение сотрудников предприятия и внедрение инструментов бережливого производства при обслуживании ВС [129]. Внедрение инструментов бережливого производства в процессе ТЭ ВС позволило авиакомпании уменьшить продолжительность и трудоёмкость ТО, а следовательно, снизить финансовые затраты.

С 2025 года в РФ действует национальный проект «Эффективная и конкурентная экономика» [130], в котором предусмотрено повышение производительности труда за счёт внедрения концепции бережливого производства (lean-методология), сводящие к минимуму издержки, повышающие производительность и способствующие эффективному управлению в условиях постоянных изменений.

Для внедрения современных технологий, таких как изготовление композитных материалов, 3D-печать в диссертации спроектированы производственные помещения для ТО БАС с учётом инструментов бережливого производства [131]. Кроме того, внедрение автоматизированных систем контроля позволяет значительно сократить время диагностики и повысить точность анализа состояния узлов и агрегатов.

Эффективная производственная инфраструктура включает не только оборудование и помещения, но и помещения для обучения персонала, который должен быть квалифицирован для работы с современными системами диагностики и ремонта. Разработка эксплуатационной документации для ТО БАС является важным элементом общего подхода к ПЛГ [132].

Для обеспечения условий производства компонентов и ТО БАС предлагается типовая схема цеха, включающая зоны механической обработки, раскроя композиционных материалов и сборки, а также места для отдыха персонала и хранения инструментов.

Производственная инфраструктура для ПЛГ БАС обычно состоит из нескольких основных компонентов:

1. Помещение: это может быть отдельное здание или часть большого производственного комплекса. Оно должно быть достаточно большим, чтобы вместить все необходимое оборудование и обеспечить безопасное пространство для работы.

2. В зависимости от типа и сложности обслуживаемых БАС оборудование может включать в себя средства для диагностики и тестирования, инструменты общего и специального применения для ТО, сварочное оборудование.

3. Запасные части: в цехе должны быть доступны запасные части для различных типов БАС, чтобы обеспечить быстрое и эффективное выполнение работ по ТО.

4. Персонал: в Организации по ТО БАС должны работать специалисты, обладающие необходимыми знаниями и навыками для диагностики и ТО.

5. Системы безопасности: в производственных помещениях для изготовления компонентов, ТО БАС должны быть установлены системы безопасности, такие как пожарная сигнализация, системы вентиляции, системы видеонаблюдения и контроля доступа, чтобы обеспечить безопасность персонала и оборудования.

6. Системы хранения: в Организации по ТО БАС должны быть организованы системы хранения для ЗЧМ, инструментов и оборудования, чтобы обеспечить их эффективное использование и предотвратить потерю или повреждение.

7. Документация: В Организации по ТО БАС должна быть доступна документация, включая руководства по эксплуатации и ремонту различных типов БАС, а также документация по безопасности и охране труда.

Производственные помещения должны размещаться на грунтах, способных выдерживать нагрузки от здания. Основания делятся на скальные и нескальные. Скальные грунты представляют собой плотные горные породы с прочными связями между частицами и высокой прочностью при сжатии ( $R_c \geq 5$  МПа) [130].

Примерная схема одного из вариантов размещения производственных помещений представлена на рисунке 4.12 и 4.13:

1) склад легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), 2) производственный цех для ТО двигателей и их компонентов, 3) кабинет руководителя, 4) отдел качество и БП, 5) конференц-зал, 6) класс ИТП (помещение для изучения нормативной и эксплуатационной документации) хранения пономерной документации [39], 7) раздевалка, 8) столовая, 9) туалет, 10) цех система автоматического управления (САУ) и автопилота, 11) цех электрооборудования и освещения, 12) цех системы управления БВС, 13) цех радиоэлектронное оборудование и оборудования полезной нагрузки, 14) Производственно-диспетчерский отдел (ПДО), 15) душ, 16) склад исправных компонентов, 17) инструментальная, 18) цех механической

обработки, 19) цех раскроя и сборки и 20) цех планера формирования композиционных материалов (КМ).

При выполнении ТО должны использоваться оборудование, инструменты и материалы, компоненты [39] рекомендованные разработчиком БВС. Разрешается использование иного оборудования и инструментов с характеристиками, эквивалентными указанным в документации разработчика ВС, их компонентов, при указании на необходимость проведения процедуры одобрения Организацией по ТО БВС альтернативного оборудования и инструментов в руководстве.

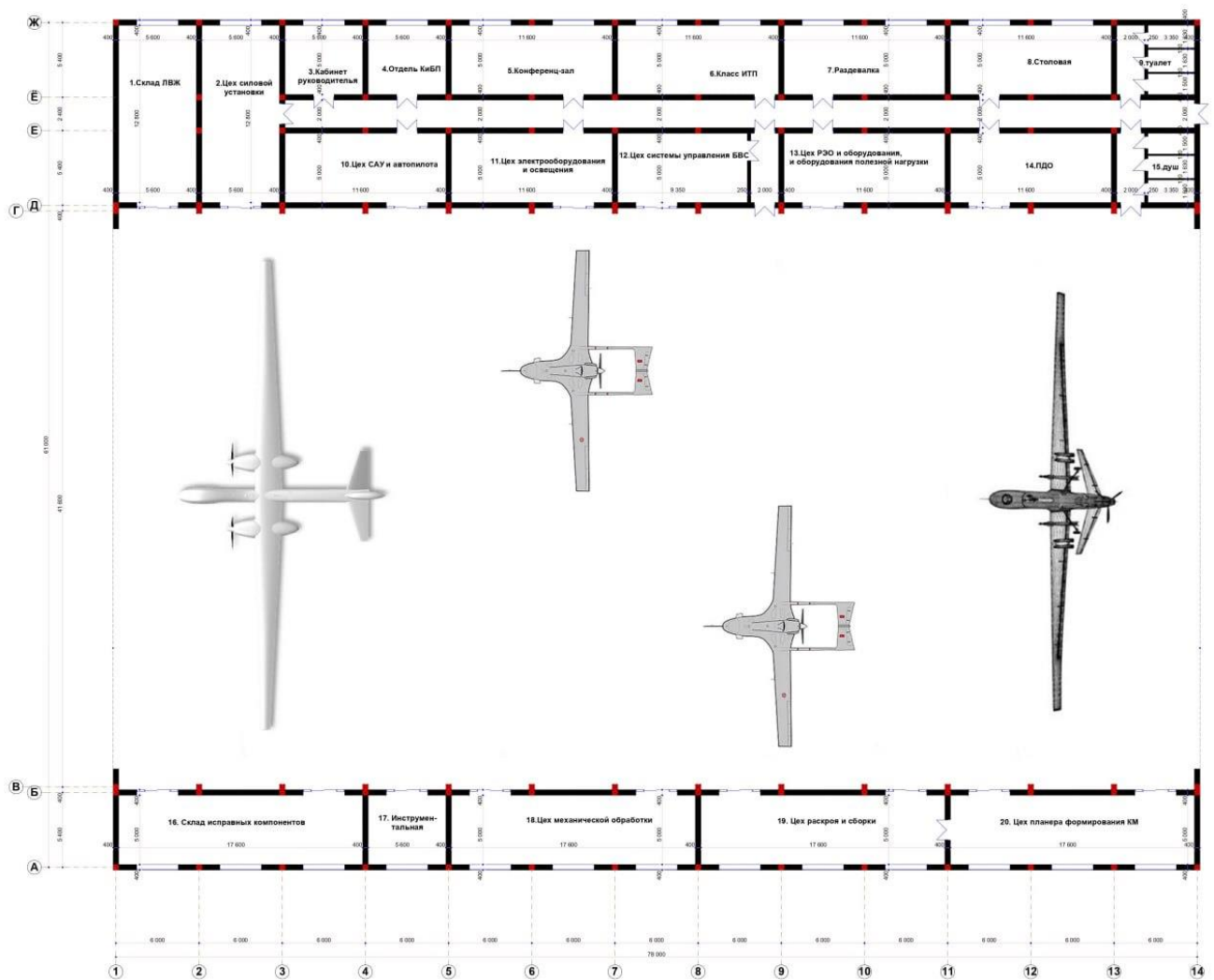


Рисунок 4.12 – Типовая схема производственных помещений и площадей  
Организации по ТО БВС

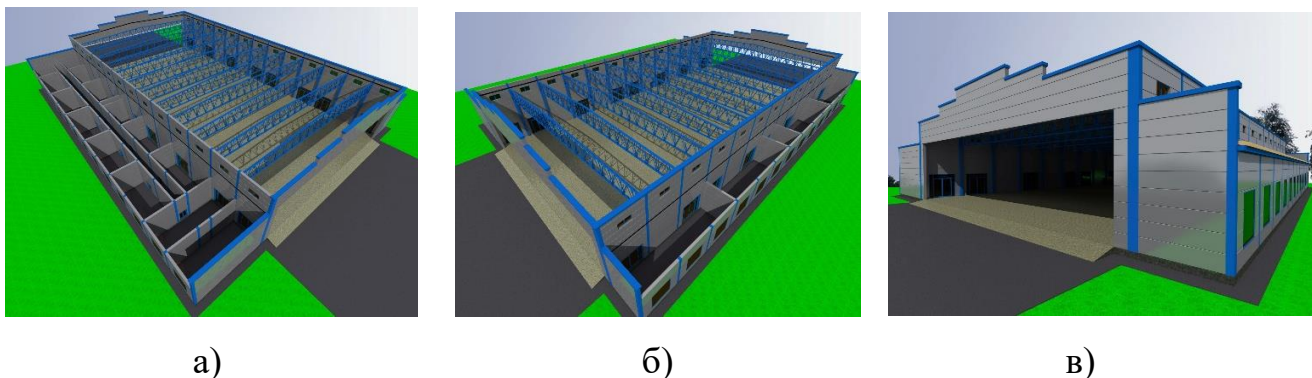


Рисунок 4.13 – Конструктивная схема производственных помещений  
Организации по ТО БВС: а) вид слева, б) вид справа в) общий вид спереди

В данной работе, предлагаются установить возможность осуществления доработок и совершенствования конструкции БАС Организациям по ТО, имеющим сертификат Разработчика и Изготовителя авиационной техники. Для этого, в том числе, требуется разработка процедур обеспечения и ПЛГ БАС, типовых организационных и технологических структур производственных цехов. Такое предложение разумно и обосновано развитием и внедрением аддитивных технологий изготовления деталей и узлов БАС.

Одним из действенных рычагов управления организационно – технологическими процедурами ПЛГ БАС является использование компьютерных технологий, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта.

Появление и развитие образцов БАС требует для их обслуживания применения современной инфраструктуры и оборудования [95].

Своевременное ТО БАС представляет собой совокупность мероприятий, направленных на обеспечение их лётной годности, а также на сокращение времени и повышение качества выполнения этих работ. Эффективное решение данных задач способствует развитию и совершенствованию инфраструктуры.

С целью обеспечения более эффективного ТО БАС и их компонентов в приложении Microsoft Visio создана типовая схема производственных помещений организации по ТО БАС, на основе требований руководящих документов [39].

При выполнении ТО пилотируемых ВС на открытых площадках продолжительность и трудоёмкость работ увеличивается на 10 – 15 %. Для БВС разумно использовать подобный подход.

#### 4.6 Выводы по четвертой главе

1. Выполнены процедуры верификации разработанных продуктов ИТ для ПЛГ БАС.
2. Предоставлены объективные данные о возможностях СУБД по ПЛГ БАС.
3. Разработана методика формирования рациональной системы ТЭ парка БВС с использованием разработанного ППО на основе интегральной математической модели.
4. Предложено использование ИТ при обеспечении и поддержании ЛГ БАС:
  - актуализированы с помощью нейросети локальные нормативно-правовые акты авиационных организаций;
  - результаты НК компрессора и турбины двигателя CFM56-3 сделанные специалистом и нейросетью в основном совпадают;
  - проведён успешный эксперимент по использованию нейросети для оценки ТС ГТД по термодинамическим параметрам.
5. Предложена типовая схема производственных помещений (площадей) и оборудования Организации по ТО БАС с учетом требований нормативно-правовой базы РФ, ИКАО, Европейского агентства по безопасности полетов (EASA) и требований по применению бережливого производства.

## Заключение

В ходе выполнения диссертации получены следующие результаты:

1. Определены основные принципы, требования по ПЛГ пилотируемых ВС, актуальность действующих зарубежных и российских НПА по ПЛГ БАС.

2. Проведен анализ структуры гражданской авиации Республики Таджикистан и выявлены основные недостатки по ПЛГ БАС.

3. Разработана концептуальная модель управления процессами обеспечения и ПЛГ БАС.

4. Разработана информационная база данных по управлению ПЛГ БАС, позволяющая структурировано хранить данные о процессах ПЛГ, предоставляя механизмы эффективного поиска и обработки.

5. Разработана «Программа расчёта показателей эффективности системы ТЭ БВС на основе интегральной математической модели», которая позволяет:

- оценивать фактическое выполнение плана налета эксплуатантами;
- определять и прогнозировать исправность парка БВС авиационных организаций;

- прогнозировать нахождение парка БВС авиационных организаций в различных состояниях в зависимости от начальных условий;

- определять удельные продолжительность и трудоёмкость ТО БВС.

Результаты исследования позволили установить максимальные значения коэффициентов  $K_3$  и  $K_4$  не более 0,72 и 3,1 соответственно для проектируемой системы ТЭ. Полученные значения коэффициентов рекомендуются использовать при нормировании максимальных значений удельных показателей для БВС с максимальной взлетной массой более 30кг;

- проводить экономическую оценку эксплуатационных расходов на ТЭ парка БВС авиационных организаций.

6. Проведена оценка значимости параметров, влияющих на эффективность системы ТЭ с применением методов теории планирования эксперимента.

7. Результаты оценки точности, чувствительности и устойчивости модели дают основания использовать данную программу для исследования эффективности системы ТЭ БВС.

8. Выполнена процедура верификации разработанных продуктов информационных технологий для ПЛГ БАС.

9. Предложена методика формирования рациональной системы ТЭ парка БВС с использованием разработанного ППО на основе интегральной математической модели.

10. Разработаны методы использования информационных технологий (оценка ТС ГТД пилотируемых ВС, актуализация локальных НПА авиационных организаций) и предложены рекомендации для эксплуатантов и авиационных предприятий по эффективной организации ТЭ БВС.

11. Обоснованы требования по построению инфраструктуры системы эксплуатации БАС и предложены рекомендации по организационно-техническому и технологическому сопровождению процессов обеспечения и ПЛГ с учетом требований нормативно-правовой базы РФ, ИКАО и EASA и концепции бережливого производства (lean-методологий).

Результаты диссертационного исследования позволят разработчикам, изготовителям, эксплуатантам, организациям по ТО БАС и научно-производственным центрам повысить эффективность процессов обеспечения и ПЛГ на основе разработанного научно-методического обеспечения.

## Список сокращений и условных обозначений

- АвД – авиационный двигатель
- АИ – авиационный инцидент
- АЛП – анализ логистической поддержки
- АП – авиационные правила
- АС – авиационное событие
- АТ – авиационная техника
- БАС – беспилотная авиационная система
- БВС – беспилотное воздушное судно
- БПЛА (БЛА) – беспилотные летательные аппараты
- БП – безопасность полетов
- ВС – воздушное судно
- ВТ – воздушный транспорт
- ВСУ – вспомогательная силовая установка
- ГА – гражданская авиация
- ГосНИИ ГА – Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
- ГОСТ – государственный стандарт
- ГТД – газотурбинный двигатель
- ДЛГ – директива лётной годности
- ЖЦ – жизненный цикл
- ЗИП –запасные часты, инструменты и принадлежности
- ЗЧиМ – запасные части и материалы
- ИИ – искусственный интеллект
- ИАО – инженерно-авиационное обеспечение
- ИАС – инженерно-авиационная служба
- ИБД – информационная база данных
- ИКАО (ICAO) – Международная организация гражданской авиации

ИЛП – интегрированная логистическая поддержка

ИПТО – информация для планирования технического обслуживания

ИТП – инженерно-технический персонал

ИТС – инженерно-технический состав

КВР – контрольно-восстановительные работы

КДСТ – карта данных сертификата типа

КК – контрольные карты

КМ – композиционные материалы

ЛП – летная подготовка

ЛПР – лицо принимающее решение

ЛТХ – летно-технические характеристики

МАК – Межгосударственный авиационный комитет

МАИ – Московский авиационный институт

МГТУ ГА – Московский государственный технический университет  
гражданской авиации

МР – методические рекомендации

МТО – материально – техническое обеспечение

НК – неразрушающий контроль

НЛГ – нормы летной годности

НПА – нормативно-правовые акты

ОТО – оперативное техническое обслуживание

ОУЭ – ожидаемые условия эксплуатации

ПЛГ – поддержание летной годности

ПМО – перечень минимального оборудования

ПРАПИ-98 – Правила расследования авиационных происшествий и  
инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации

ПТО – периодическое техническое обслуживание

ПТЭ – процесс технической эксплуатации

ППО – прикладное программное обеспечение

РД – руководящий документ

РЗЦ – руководство по центровке и загрузке РОТО – руководство по организации технического обслуживания

РПП – руководство по производству полётов

РФ – Российская Федерация

СМК – система менеджмента качества

СНГ – Содружество Независимых Государств

СОК – средства объективного контроля

СТО – средство технического обслуживания

СТЭ – система технической эксплуатации

СУБД – система управления базами данных

СУБП – система управления безопасностью полетов ( SMS - Safety management system)

ТО – техническое обслуживание

ТПМО – типовой перечень минимального оборудования

ТС – техническое состояние

ТУ – технические условия

ТЭ – техническая эксплуатация

УСАТ – Управление сертификации авиационной техники

ФАП – федеральные авиационные правила

ФЗ – федеральный закон

ЭД – эксплуатационный документ

ЭТХ – эксплуатационно – технические характеристики

ЦАГИ – центральный аэрогидродинамический институт

АММ – Aircraft Maintenance Manual (Руководство по ТО самолета)

FAA – Federal Aviation Administration (Федеральное агентство гражданской авиации США)

EASA – European Authority for aviation safety (Европейское агентство по безопасности полётов)

MSG – Maintenance Steering Group (Методика разработки программ ТО функциональных систем и конструкции воздушных судов).

### Список используемых источников

1. Самуленков Ю.И., Тоиров И.С., Грузд А.Д. Программа расчёта показателей эффективности системы технической эксплуатации беспилотных воздушных судов на основе интегральной математической модели. Свидетельство № 2025667575 от 07.07.2025 внесена в Реестр программ для ЭВМ Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент).
2. Тоиров И.С., Самуленков Ю.И. Управление организационно – технологическими процедурами поддержания лётной годности беспилотных авиационных систем // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 71–82.
3. Алексанян А.Р. Метод интегрированной логистической поддержки формирования процедур поддержания лётной годности воздушных судов [Текст] / А.Р. Алексанян, А.А. Ицкович, И.А. Файнбург // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. - № 205. – С. 22–27.
4. Бондарюк В.А. Система автоматического управления техническим обслуживанием и поддержанием лётной годности воздушных судов в ОАО «Аэрофлот – Российские авиалинии» [Текст] / В.А. Бондарюк – М.: ФГУП «ГосНИИ ГА», 2013. – 34 с.
5. Вайсберг И. Г. Совершенствование системы поддержания лётной годности воздушных судов гражданской авиации России: интервью с Михаилом Булановым [Текст] / И.Г. Вайсберг // Авиасоюз. – 2014. – Вып. 1 (49). – С. 4–8.
6. Самуленков Ю.И., Грузд А.Д., Тоиров И.С. Подход к построению математической модели системы поддержания лётной годности воздушных судов с учётом безопасности полётов. // Научный вестник ГосНИИГА. 2025. № 49 – С. 55-66.
7. Духновский Д.А. Разработка методики определения рационального размерно-весового облика беспилотного самолёта с электрической силовой установкой. МАИ 2024, автореферат диссертации 24 с.
8. Алешин Б.С., Суханов В.Л., Шibaев В.М., Городниченко В.И. Критерии продления лётной годности беспилотных авиационных систем на

испытательные и демонстрационные полеты // Ученые записки ЦАГИ. Том XLIV 2013 №5. – С. 94-101.

9. Бадеха В.А. Беспилотные авиационные системы. Современное состояние и опыт применения. Москва, Перо, 2014, 207 с.

10. Гафуров Д.С. Методы совершенствования системы поддержания лётной годности воздушных судов в условиях Республики Таджикистан с учётом международных требований по обеспечению безопасности полётов. МГТУ ГА 2014. 153 с.

11. Программа расчета характеристик системы технического обслуживания и ремонта авиационных ГТД в течение календарного срока службы. Самуленков Ю.И. Фонд алгоритмов и программ НВО ВУНЦ ВВС ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. номер № F-122 03.03.2010 г.

12. Самуленков Ю.И., Тоиров И.С., Демаков В.В. База данных управления лётной годностью беспилотных авиационных систем. Свидетельство № 2025623151 от 29.07.2025 внесена в Реестр для ЭВМ-База данных Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент).

13. Постановлении Правительства Российской Федерации от 28.10.2020 г. №1750 «Об утверждении перечня технологий, применяемых в рамках экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций» [Электронный ресурс] URL: <http://static.government.ru/media/files/....pdf> (дата обращения 23.04.2025г).

14. Иванов Ю.Л. Беспилотные летательные аппараты: состояние и тенденции развития. Москва, ЛА Варяг, 2004, 176 с.

15. Сухачев А.Б. Беспилотные летательные аппараты: состояние и перспективы развития. Вилкова Н.Н. Москва, МНИТИ, 2007. 60 с.

16. Кузнецов Г.А. Беспилотные летательные аппараты с поршневыми двигателями: история создания, применение и перспективы развития. Научное обозрение, 2010, № 3, с. 40–45.

17. Фетисов В.С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. Уфа, Фотон, 2014, 217 с.

18. Иванов М.С. Беспилотные летательные аппараты. Справочное пособие. ВУНЦ ВВС ВВА. Воронеж, Научная книга, 2015, 619 с.
19. Матусевич А.Н. Советские беспилотные самолеты-разведчики первого поколения. Москва, АСТ, Минск, Харвест, 2002, 48 с.
20. Ганин С.М., Карпенко А.В., Колногоров В.В., Петров Г.Ф. Беспилотные летательные аппараты. Санкт-Петербург, Невский бастион, 1999, 160 с.
21. Кудряков С.А. Беспилотные авиационные системы. Общие сведения и основы эксплуатации. Санкт-Петербург, Свое издательство, 2015, 121 с.
22. Павлушенко М.И., Евстафьев Г.М., Макаренко И.К. Национальная и глобальная безопасность. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. Москва, Права человека, 2005, 610 с.
23. Приказ ФАВТ (Росавиация) от 20.08.2025 N 613-П «Об утверждении Норм летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном самолетного типа (НЛГ БАС-СТ). Издание 2».
24. URL: <https://rcmonste.ru/blog/article/strany-lidery-po-proizvodstvu-dronov-kto-dominiruet-v-vozdruhe> (дата обращения 16.04.2025г).
25. Демаков В.В., Мелентьев М.Е., Машковцев Л.Н., Палагин Ф.А. Согласование характеристик силовой установки с турбореактивным двигателем и планера беспилотного воздушного судна. Сборник трудов XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. Иркутск, 2025. С. 237-246.
26. Руководства по технической эксплуатации самолета Ан 28, раздел 1, 2, 52, 53, 55, 56, 57. 1971г.
27. Ильюшин Ил-114 - пассажирский самолет. Фото, характеристики, отзывы. URL: <https://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/il-114.html> (дата обращения 17.11.2025г).
28. Инструкция по эксплуатации самолета Як-40 (Книга 2) раздел 1, 2, 3, 4, 5. 1971г.
29. Приложение 8 к Конвенции о международной гражданской авиации. Лётная годность воздушных судов. 13-е изд./ИКАО, июль 2022 г. 378 с.

30. Doc 9760 Руководство по лётной годности. Изд. 4-е. ИКАО, 2020г. 468 с.
31. Doc 10019. Руководство по дистанционно пилотируемым авиационным системам (ДПАС). Издание первое, 2015., 190с.
32. URL: <https://www.icao.int/safety/ua/Pages/default.aspx> (дата обращения 13.04.2025г).
33. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/Pages/ICAO-Model-UAS-Regulations.aspx> (дата обращения 13.04.2025г).
34. URL: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ICAO-Council-adopts-new-international-aviation-Standards-and-Recommended-Practices-for-remotely-piloted-aircraft-systems.aspx> (дата обращения 13.04.2025г).
35. Сошин В.М., Чекрыжев Н.В. Сертификация гражданских воздушных судов: Методические указания. «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» Самара – 2009г., 112 с.
36. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 N 60-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025).
37. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti?id=3775&version=print> (дата обращения 29 мая 2025г).
38. URL: [https://russiandrone.ru/news/rosaviatsiya\\_sertifitsirovat\\_bas\\_stanet\\_proshche/?ysclid=m9411a79r6170219923](https://russiandrone.ru/news/rosaviatsiya_sertifitsirovat_bas_stanet_proshche/?ysclid=m9411a79r6170219923) (дата обращения 23 мая 2025г).
39. ФАП 145 Федеральные авиационные правила «Техническое обслуживание подлежащих обязательной сертификации беспилотных авиационных систем и (или) их элементов, гражданских воздушных судов, авиационных двигателей, воздушных винтов, за исключением легких, сверхлегких гражданских воздушных судов, не осуществляющих коммерческих воздушных перевозок и авиационных работ. Часть 145». Утверждены приказом Минтранса России от 18.10.2024 № 367.
40. ФАП 148 Федеральные авиационные правила «Порядок подтверждения соответствия конструкции экземпляра гражданского воздушного судна утвержденной типовой конструкции гражданского воздушного судна, оформления сертификата летной годности, приостановления и возобновления его

действия, его аннулирования, а также порядок ведения реестра сертификатов летной годности" и об утверждении формы сертификата летной годности». Утверждены приказом Минтранса России от 05 мая 2025 г. № 148.

41. Федеральные авиационные правила «Сертификация АТ, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21». Утверждены приказом Минтранса России от 17 июня 2019 года № 184.

42. Федеральное агентство воздушного транспорта: сайт. – URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-ucet-bespiilotnyh-grajdanskih-vozdysnih-sudov/> (дата обращения: 16.01.2023).

43. Отчет о результатах проверки в рамках Механизм непрерывного мониторинга Универсальная программа ИКАО по проведению проверок организации контроля за обеспечением БПМНМ УППКБП системы гражданской авиации Республики Таджикистан (17–28 октября 2016 года).

44. Благодарщев И.В., Киселев М.А., Наумов Р.С., Шапкин В.С. Актуальные вопросы подготовки кадров в области беспилотных авиационных систем. Научный вестник МГТУ ГА. 2022; 25 (4): С 8-19.

45. Чинючин, Ю.М. Лётная годность воздушных судов в системе управления безопасностью полётов / Ю. М. Чинючин. – Вологда: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Инфра-Инженерия", 2024. – 188 с. – ISBN 978-5-9729-1836-2. – EDN PUVIBP.

46. Чинючин, Ю.М. Характеристика основных международных требований к системе подготовки авиационных специалистов для российских авиакомпаний [Текст] / Ю.М. Чинючин, В.П. Берлев, Д.К. Горбунова // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013. – № 197. – С. 90–93.

47. Чинючин, Ю.М. Инновационный центр сохранения летной годности [Текст] / Ю.М. Чинючин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011г. № 173. – С. 7–11.

48. Гипич Г.Н. Обеспечение и поддержание летной годности воздушных судов гражданской авиации (теория и практика). СПбГУ ГА. ФГУП «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова» Выполн. 2005 г. 42с.

49. Файнбург И.А. Научно-методическое обеспечение управления процессами поддержания летной годности воздушных судов. Автореферат. МГТУ ГА 2009. 19с.

50. Алексаян А.Р. Метод формирования процедур поддержания летной годности воздушных судов при технической эксплуатации. МГТУ ГА 2013. 23с.

51. Крапивин Ю.Б., Алькатуана Х.А., Страчук И.В. Использование нейронных сетей для поиска информации в сети INTERNET Вестник Брестского государственного технического университета №05, 2006. С. 60-63.

52. Власов С.О., Гладышев А.И., Богуславский А.А., Соколов С.М. Решение задачи обнаружения объекта с помощью нейросетовых технологий // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, №16, 2023. 27 с.

53. Далецкий С.С. Аналога-логический метод формирования и корректировки режимов технического обслуживания и ремонта воздушных судов гражданской авиации. ГосНИИГА Автореферат 2011. 19 с.

54. Борзова А.С. Методология модель-ориентированного прогнозирования и оптимизации системы подготовки кадров в области эксплуатации воздушного транспорта. Санкт-Петербург – 2018. 36 с.

55. Акчурин М.Р. Повышение эффективности управления авиапредприятием на основе совершенствования методов, средств и моделей управления авиационным персоналом. Москва – 2013., 16 с.

56. Булатова А.Е. Метод и алгоритмы выявления утомления специалистов авиационного персонала для повышения надежности их деятельности. Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева – 2024. 138 с.

57. Машошин О.Ф. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей с использованием информационного потенциала контролируемых параметров. МГТУ ГА 2005. 30 с.

58. Пунт Е.А. Метод диагностирования предаварийного теплового состояния электротехнических устройств воздушного судна на основе цифрового портрета. МГТУ ГА 2024. 166 с.

59. Старостин И.Е. Научные основы оценивания работоспособности перспективных авиационных химических источников электрической энергии для поддержания летной годности воздушных судов. МГТУ ГА 2021. 32 с.

60. Далецкий С.В. Формирование характеристик системы технической эксплуатации воздушных судов гражданской авиации. автореферат дис. доктора технических наук: МГТУ ГА. - Москва, 2002. - 38 с.

61. Ратникова Н.А. Теоретические основы, аппаратные средства и программно-математическое обеспечение информационной системы мониторинга и контроля по состоянию воздушных судов. 2005. 35с.

62. Приказ ФАВТ (Росавиация) от 16.12.2022 № 922-П Об утверждении Норм летной годности БАС с БВС самолетного типа с максимальной взлетной до 5400 кг (НЛГ БАС СТ).

63. Приказ ФАВТ (Росавиация) от 10.11.2022 № 806-П Об утверждении Норм летной годности БАС с БВС вертолетного типа с максимальной взлетной до 750 кг (НЛГ БАС ВТ).

64. Распоряжение Правительства РФ от 5 октября 2021 г. № 2806-р «Об утверждении Концепции и плана реализации Концепции интеграции БВС в единое воздушное пространство РФ в части развития технологий».

65. Самуленков Ю.И., Тоиров И.С., Грузд А.Д. Использование информационных технологий при поддержании летной годности беспилотных авиационных систем// Автоматизация. Современные технологии. 2025. Т. 79. № 8 – С. 373-379.

66. Распоряжение Правительства РФ от 21 июня 2023г. №1630-р Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации РФ на период до 2030г. и на перспективу до 2035г. и плана мероприятий по ее реализации.

67. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация воздушных судов. Часть 1. Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолёты. 12-е изд. //ИКАО, 2022. 254 с.

68. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полётов. Изд. 2-е. //ИКАО, 2016. 48 с.

69. Сертификат разработчика ФАВТ- Р -59 ООО «С7-ИНЖИНИРИНГ» [Электронный ресурс]. URL: <https://favt.gov.ru/public/razizg/raz/%D0%A4%D0%90%D0%92%D0%A2-%D0%A0-59.pdf> (дата обращения 06.03.2025).
70. ГОСТ Р 53394-2017 Интегрированная логистическая поддержка. Термины и определения. Москва Стандартинформ 2018. 14с.
71. DEF STAN 00-600. Integrated Logistic Support. Стандарт Министерства обороны Великобритании, 2023. – 24 с.
72. ГОСТ Р 54080–2010 Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Информационно-аналитическая система мониторинга летной годности воздушных судов. Общие требования. Стандартинформ, 2012. 19 с.
73. ГОСТ Р 53393-2017. Интегрированная логистическая поддержка. Анализ логистической поддержки. Основные положения. Москва, Стандартинформ, 2017. 9 с.
74. Центральная нормативно-методическая библиотека ГА URL: <https://www2.mlgvs.ru/cnmbga/about>.
75. Краснощенов П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Издательство Московского университета, 1983. 264 с.
76. Мильнер Б.З., Евенко Л.И., Раппорт В.С. Системный подход к организации управления. - М.: Экономика,1983. 224 с.
77. Снапелев Ю.М., Старосельский В.А. Моделирование и управление в сложных системах. – М.: Советское радио, 1974. 263 с.
78. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 2001, - 343 с.
79. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза сложных систем. – М.: Наука,1985, - 174с.
80. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, 1985. 200 с.
81. Соболев И.М., Статников Р.Б. Наилучшие решения – где их искать. Математика, кибернетика №1. – М.: Знание, 1982. 64 с.

82. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-93). 1994г (с изменениями от 30 ноября 1995 г.) 113 с.
83. Киселев Д.Ю., Киселев Ю.В. Комплексный подход к моделированию процессов технического обслуживания авиационной техники // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 33–40.
84. Ицкович А.А., Алексанян А.Р., Файнбург И.А. Построение математической модели процессов технической эксплуатации авиационной техники как замкнутой системы массового обслуживания // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 46–52.
85. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Высшая школа, 2000, - 479 с.
86. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988, - 232 с.
87. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988, - 480 с.
88. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. - М.: Высшая школа, 2000, - 381с.
89. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. - М.: Финансы и статистика, 1986. 353 с.
90. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976,- 272 с.
91. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. – М: Мир, 1971,- 534 с.
92. Растрингин Л.А. Статистические методы поиска. – М.: Наука, 1968. 376 с.
93. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. - М.: Транспорт, 1987, - 232 с.
94. Чернышева Г.Н., Ачекин А.А., Воронцев В.А. Система показателей для анализа и оценки уровня организации инженерно-авиационного обеспечения. Организатор производства. 2018. Т. 26. № 1 С. 34-44.

95. Самуленков Ю.И., Бабков А.Б., Филатова Я.А. Совершенствование инфраструктуры аэропортов гражданской авиации с учетом проектирования организаций по техническому обслуживанию воздушных судов. Научный Вестник МГТУ ГА Том 25, № 01, 2022, С. 35 – 52.

96. URL: <https://visualstudio.microsoft.com/>. ссылка на оф. Сайт C++ (дата обращения 01.05.2025).

97. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы. - М.: Мир, 1982. 583 с.

98. Самуленков Ю.И., Богомолов Д.В., Тоиров И.С. Моделирование системы управления безопасностью полетов организаций разработчиков и изготовителей авиационной техники Авиационный вестник БГАА научно – практический журнал. УДК 629.735 № 9 декабрь 2023 ISSN 2707 – 6989. С. 53 – 58.

99. Самуленков Ю.И., Филатова Я.А., Грузд А.Д. Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания воздушных судов Научный Вестник МГТУ ГА Том 24, № 04, 2021. С. 38-49.

100. Файнбург И.А. Управление процессами поддержания летной годности воздушных судов в центрах технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Научный Вестник МГТУГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов, №49, 2002. 2.

101. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1972. 64 с.

102. Вентцель Е.С. Исследование операций, задачи, принципы, методологии. – М.: Наука, 1980, -552 с.

103. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – 7 – изд., - М.: Юрайт, 2025,- 343 с.

104. ГОСТ Р 27.013-2019 (МЭК 62308:2006). Надежность в технике Методы оценки показателей безотказности. 40 с.

105. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 2. - М.: Финансы и статистика, 1987. 343 с.

106. Горский В.Г. и др. Планирование промышленных экспериментов. - М.: Металлургия, 1978. 112с.

107. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. – М.: Статистика, 1978, - 221 с.

108. ФАП 10 Федеральные авиационные правила «Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил. Порядок приостановления действия, введения ограничений в действие и аннулирования документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил» Утверждены приказом Минтранса России от 12 января 2022 г. № 10.

109. ФАП 128 Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» Утверждены приказом Минтранса России от 31 июля 2009 года № 128.

110. Кубланов М.С. Проверка адекватности математических моделей. МГТУГА, №211, 2015. С 29-36.

111. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и верификация компьютерных моделей. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 9. С. 100–115, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

112. Трофимова Е. А., Кисляк Н. В., Гилёв Д. В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 160 с.

113. Кофман А. Методы и модели исследования операций. – М.: Мир, 1977, - 432с.

114. Большев Л. Н., Смирнов Н. В., Таблицы математической статистики, 2 изд., М., 1968. 474 с.

115. Леман.Э. Проверка статистических гипотез. - 2 изд., пер. с англ., М. 1979. 408 с.

116. Г.С. Петриченко, В.Н. Гоголев, Ю.С. Поверенный. Имитационное моделирование возникновения и развития управленческих ситуаций. Научно-технические ведомости СПбГПУ 3, 2009г. С – 111-117.
117. «Matlab». <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (Дата обращения 17.07.2025).
118. «Maxima». URL: <https://maxima.sourceforge.io/> (дата обращения 20.07.2025).
119. «ANSYS». URL:<https://www.esss.com/en/ansys-simulation-software/> (дата обращения 15.06.2025).
120. «Компас 3D» URL: <https://kompas.ru/> (дата обращения 20.07.2025).
121. Кирпичев И.Г., Шарыпов А.Н. Формирование информационно-аналитической системы государственного мониторинга жизненного цикла изделий авиационной техники. Вестник МГТУ ГА №84(2) 2005. С. 22-29.
122. ИУС «Эрлан-2/3» URL: <https://astra.ru/ready-for-astra/compatible-software/42325/> (дата обращения 15.06.2025).
123. ГОСТ Р 59751-2021 «БАС с беспилотными воздушными судами самолётного типа. Требования к лётной годности». Устанавливает требования к лётной годности БАС с максимальной взлётной массой от 30 до 5700 кг.
124. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. 128с.
125. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные с ним вопросы. - М.: Наука, 1975. 124с.
126. Воцинин А.П., Сатиров Г.Р. Оптимизация в условиях неопределенности. – М.: Техника, 1989. 224с.
127. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас [Текст]: как математика помогает принимать решения. - Изд. 2-е, доп. - Москва: URSS, 2018. 143 с.
128. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. - М.: Наука, 1981. 107 с.
129. <https://24rus.ru/news/economy/183540.html> (Дата обращения 19.12.2025).

130. [https://www.economy.gov.ru/material/directions/np\\_effektivnaya\\_i\\_konkurentnaya\\_ekonomika/](https://www.economy.gov.ru/material/directions/np_effektivnaya_i_konkurentnaya_ekonomika/) (Дата обращения 19.12.2025).

131. ГОСТ Р 56906-2016 Бережливое производство. Организация рабочего пространства. Стандартиформ. 10 с.

132. Самуленков Ю.И., Кириллова Н.Б., Далецкий С.С., Рогозин Р.М. Организационно-технические аспекты обеспечения летной годности беспилотных воздушных судов Научный вестник ГосНИИ ГА № 39 Москва 2022, с. 60 – 71.

133. Федулов, В.К. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений: учеб. пособие / В.К. Федулов, Л.Ю. Артемова. – М.: МАДИ, 2015. 84 с.

## Приложение А

Таблица А.1 – Вероятности нахождения БВС в различных состояниях

Месяц	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	0.1385	0.4134	8.4841e-05	0.0042	3.5838e-05	2.0148e-06	3.7506e-08	1.0609e-05	6.3630e-06	2.1202e-08
2	0.0916	0.3739	7.3325e-05	0.0036	3.2958e-05	1.8206e-06	2.2500e-08	9.1713e-06	5.4991e-06	1.8319e-08
3	0.0832	0.4396	8.9891e-05	0.0044	3.1217e-05	1.7787e-06	2.0830e-08	1.1245e-05	6.7415e-06	2.2456e-08
4	0.0862	0.3975	8.1068e-05	0.0040	3.1157e-05	1.7113e-06	1.7413e-08	1.0134e-05	6.0837e-06	2.0290e-08
5	0.1246	0.3789	7.1368e-05	0.0035	3.5849e-05	1.9905e-06	2.0512e-08	8.9250e-06	5.3524e-06	1.7833e-08
6	0.0892	0.4627	9.3372e-05	0.0046	3.7523e-05	2.0528e-06	2.6956e-08	1.1677e-05	7.0046e-06	2.3346e-08
7	0.1074	0.3270	6.1632e-05	0.0030	3.3582e-05	1.8656e-06	1.4427e-08	7.7087e-06	4.6216e-06	1.5395e-08
8	0.0845	0.3729	7.3848e-05	0.0036	2.7896e-05	1.6067e-06	3.5623e-08	9.2394e-06	5.5368e-06	1.8435e-08
9	0.1136	0.4106	8.2082e-05	0.0041	2.7041e-05	1.4908e-06	3.5676e-08	1.0261e-05	6.1576e-06	2.0529e-08
10	0.0919	0.4601	9.5812e-05	0.0047	2.7758e-05	1.5008e-06	3.2929e-08	1.1973e-05	7.1909e-06	2.3992e-08
11	0.1092	0.3638	6.8498e-05	0.0034	3.3900e-05	1.8658e-06	3.0576e-08	8.5650e-06	5.1377e-06	1.7121e-08
12	0.0826	0.3655	7.7890e-05	0.0038	3.0212e-05	1.7132e-06	2.8613e-08	9.7371e-06	5.8444e-06	1.9488e-08

Продолжение таблицы А.1

Месяц	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	Сумма
1	8.4861e-08	7.4289e-09	0.2661	0.0110	0.2456	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	1.0792
2	7.3348e-08	4.6996e-09	0.3141	0.0073	0.2774	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0683
3	8.9925e-08	4.4770e-09	0.3014	0.0067	0.2262	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0619
4	8.1098e-08	3.6540e-09	0.2654	0.0068	0.2949	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0551
5	7.1385e-08	4.3303e-09	0.2696	0.0101	0.2644	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	1.0515
6	9.3408e-08	5.4007e-09	0.2447	0.0071	0.2344	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0432
7	6.1647e-08	3.3907e-09	0.3161	0.0087	0.2740	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0366
8	7.3871e-08	7.6807e-09	0.3253	0.0068	0.2353	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0289
9	8.2098e-08	6.7327e-09	0.2550	0.0094	0.2323	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	1.0254
10	9.5838e-08	6.3619e-09	0.2139	0.0076	0.2389	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	1.0175
11	6.8514e-08	6.3158e-09	0.2696	0.0089	0.2557	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	1.0110
12	7.7917e-08	5.2762e-09	0.2706	0.0065	0.2730	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	1.0024

Таблица А.2 – Вероятности переходов БВС из состояния в состояние

Месяц	PX[1315]	PX[131]	PX[28]	PX[29]	PX[210]	PX[213]	PX[23]	PX[24]	PX[35]	PX[313]
1	0.0645	0.8956	3.9999e-05	3.9999e-05	4.0000e-07	0.9797	0.0004	0.0198	0.0001	0.9999
2	0.0645	0.8955	7.9997e-05	7.9997e-05	8.0000e-07	0.9598	0.0008	0.0392	0.0001	0.9999
3	0.0645	0.8955	5.9998e-05	5.9998e-05	6.0000e-07	0.9697	0.0006	0.0296	0.0001	0.9999
4	0.0645	0.8955	5.9998e-05	5.9998e-05	6.0000e-07	0.9697	0.0006	0.0296	0.0001	0.9999
5	0.0645	0.8956	7.9997e-05	7.9997e-05	8.0000e-07	0.9598	0.0008	0.0392	0.0001	0.9999
6	0.0645	0.8955	6.9998e-05	6.9998e-05	7.0000e-07	0.9648	0.0007	0.0344	0.0001	0.9999
7	0.0645	0.8955	7.9997e-05	7.9997e-05	8.0000e-07	0.9598	0.0008	0.0392	0.0001	0.9999
8	0.0645	0.8955	6.9998e-05	6.9998e-05	7.0000e-07	0.9648	0.0007	0.0344	0.0001	0.9999
9	0.0645	0.8957	3.9999e-05	3.9999e-05	4.0000e-07	0.9797	0.0004	0.0198	0.0001	0.9999
10	0.0645	0.8957	3.9999e-05	3.9999e-05	4.0000e-07	0.9797	0.0004	0.0198	0.0001	0.9999
11	0.0645	0.8956	7.9997e-05	7.9997e-05	8.0000e-07	0.9598	0.0008	0.0392	0.0001	0.9999

Продолжение таблицы А.2

Месяц	PX[24]	PX[45]	PX[413]	PX[56]	PX[613]	PX[87]	PX[813]	PX[127]	PX[712]	PX[713]
1	0.0198	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0002	0.9998	0.9993	0.3935	0.6065
2	0.0392	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0001	0.9999	0.9993	0.3935	0.6065
3	0.0296	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0002	0.9998	0.9993	0.3935	0.6065
4	0.0296	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	6.7398e-05	0.9999	0.9993	0.3935	0.6065
5	0.0392	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	4.2299e-05	1.0000	0.9993	0.3935	0.6065
6	0.0344	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0002	0.9998	0.9993	0.3935	0.6065
7	0.0392	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	7.8197e-05	0.9999	0.9993	0.3935	0.6065
8	0.0344	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0001	0.9999	0.9993	0.3935	0.6065
9	0.0198	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	8.1197e-05	0.9999	0.9993	0.3935	0.6065
10	0.0198	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0002	0.9998	0.9993	0.3935	0.6065
11	0.0392	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0002	0.9998	0.9993	0.3935	0.6065
12	0.0198	0.0001	0.9999	1.0000	1.0000	0.0002	0.9998	0.9993	0.3935	0.6065

Продолжение таблицы А.2

Месяц	PX[1513]	PX[107]	PX[1013]	PX[1315]	PX[97]	PX[913]	PX[117]	PX[1113]	PX[1316]	PX[1613]
1	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0370	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
2	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0325	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
3	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0325	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
4	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0251	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
5	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0432	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
6	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0414	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
7	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0580	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
8	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0645	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
9	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0585	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
10	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0325	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
11	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0625	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990
12	1.0000	1.0000e-07	1.0000	0.0301	1.5000e-05	1.0000	5.0000e-06	1.0000	0.0010	0.9990

*Продолжение таблицы А.2*

Месяц	PX[1317]	PX[1713]	PX[1318]	PX[1813]	PX[1319]	PX[1913]
1	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
2	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
3	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
4	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
5	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
6	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
7	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
8	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
9	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
10	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
11	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980
12	0.0119	0.9881	0.0048	0.9952	0.0020	0.9980

Таблица А.3 – Интенсивности переходов БВС из состояния в состояние

Месяц	XL[1315]	XL[28]	XL[29]	XL[213]	XL[23]	XL[24]	XL[313]	XL[35]	XL[24]	XL[45]
1	0.5000	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.5000	0.5000	0.2500	0.5000
2	0.2500	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.5000	0.5000	0.1250	0.5000
3	0.2500	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.5000	0.5000	0.1667	0.5000
4	0.3333	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.5000	0.5000	0.1667	0.5000
5	0.3333	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.5000	0.5000	0.1250	0.5000
6	0.3333	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.5000	0.5000	0.1429	0.5000
7	0.2500	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.5000	0.5000	0.1250	0.5000
8	0.2000	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.5000	0.5000	0.1429	0.5000
9	0.2000	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.5000	0.5000	0.2500	0.5000
10	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.5000	0.5000	0.2500	0.5000
11	0.2500	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.5000	0.5000	0.1250	0.5000
12	0.3333	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.5000	0.5000	0.2500	0.5000

*Продолжение таблицы А.3*

Месяц	XL[413]	XL[56]	XL[613]	XL[87]	XL[813]	XL[127]	XL[712]	XL[713]	XL[1513]	XL[1315]
1	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0189	0.5000
2	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0083	0.2500
3	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0083	0.2500
4	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0085	0.3333
5	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0147	0.3333
6	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0141	0.3333
7	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0149	0.2500
8	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0133	0.2000
9	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0120	0.2000
10	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0083	0.2500
11	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0161	0.2500
12	0.5000	0.0139	0.2500	0.5000	0.4000	0.1000	0.0500	0.0500	0.0102	0.3333

*Продолжение таблицы А.3*

Месяц	XL[97]	XL[913]	XL[117]	XL[1113]	XL[1314]	XL[1413]	XL[1316]	XL[1613]	XL[1317]	XL[1713]
1	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.5000	0.6667	0.5000	1.0000	0.5000	0.0083
2	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2500	0.6667	0.2500	1.0000	0.2500	0.0083
3	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2500	0.6667	0.2500	1.0000	0.2500	0.0083
4	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.3333	0.6667	0.3333	1.0000	0.3333	0.0083
5	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.3333	0.6667	0.3333	1.0000	0.3333	0.0083
6	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.3333	0.6667	0.3333	1.0000	0.3333	0.0083
7	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2500	0.6667	0.2500	1.0000	0.2500	0.0083
8	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2000	0.6667	0.2000	1.0000	0.2000	0.0083
9	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2000	0.6667	0.2000	1.0000	0.2000	0.0083
10	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2500	0.6667	0.2500	1.0000	0.2500	0.0083
11	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.2500	0.6667	0.2500	1.0000	0.2500	0.0083
12	1.0000	0.6667	0.5000	0.5000	0.3333	0.6667	0.3333	1.0000	0.3333	0.0083

*Продолжение таблицы А.3*

Месяц	XL[1318]	XL[1813]	XL[1319]	XL[1913]	XL[220]	XL[205]	XL[2013]	XL[131]	XL[12]	
1	0.5000	0.0208	0.5000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.7000	
2	0.2500	0.0208	0.2500	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.7000	
3	0.2500	0.0208	0.2500	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.7000	
4	0.3333	0.0208	0.3333	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.7000	
5	0.3333	0.0208	0.3333	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.7000	
6	0.3333	0.0208	0.3333	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.7000	
7	0.2500	0.0208	0.2500	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.7000	
8	0.2000	0.0208	0.2000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2000	0.7000	
9	0.2000	0.0208	0.2000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2000	0.7000	
10	0.2500	0.0208	0.2500	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.7000	
11	0.2500	0.0208	0.2500	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.7000	
12	0.3333	0.0208	0.3333	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.7000	

Таблица А. 4 – Значения показателей эффективности за 12 месяцев эксплуатации БВС

Месяц	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>4</sub>	К <sub>5</sub>
1	0.6761	81.7907	0.7257	2.8560	690 000
2	1.2682	77.9641	0.7012	2.9910	665 000
3	1.0001	82.4274	0.7137	2.8583	660 000
4	0.9063	74.9024	0.7113	2.9218	681 000
5	1.2451	77.3055	0.7078	3.0004	675 000
6	1.1215	79.6650	0.7079	2.9229	655 000
7	1.2065	75.0504	0.7084	2.9381	660 000
8	1.1004	78.2715	0.7098	2.8958	659 000
9	0.6256	77.9153	0.7073	2.8960	660 000
10	0.6148	76.5899	0.7070	2.9020	650 000
11	1.1917	74.2555	0.7028	2.8970	649 000
12	0.5765	71.8654	0.7021	2.9091	655 000

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Матрица планирования экспериментов

№ опыта	T <sub>пл гн</sub>	t <sub>ож ЗЧМ</sub>	t <sub>ож АвД</sub>	t <sub>квр</sub>	t <sub>пто</sub>	t <sub>ото</sub>	t <sub>то</sub>	Q <sub>то</sub>	C	ω <sub>0</sub> ФС
1	3000,00	72,00	163,00	193,00	53,00	2,00	1200	25274,00	104729,00	0,000025
2	6000,00	80,00	111,00	69,00	121,00	4,00	1140	8568,00	5765584,00	0,000126
3	9000,00	89,00	156,00	61,00	121,00	4,00	1160	17946,00	11953057,00	0,000230
4	12000,00	89,00	100,00	128,00	118,00	3,00	1250	25725,00	18097834,00	0,000067
5	15000,00	73,00	125,00	182,00	68,00	3,00	1280	35062,00	24002648,00	0,000042
6	18000,00	112,00	173,00	138,00	71,00	3,00	1120	45006,00	29681028,00	0,000179
7	21000,00	100,00	104,00	187,00	67,00	4,00	1260	52612,00	35573733,00	0,000078
8	24000,00	81,00	206,00	152,00	75,00	5,00	1300	61701,00	42136825,00	0,000138
9	27000,00	111,00	177,00	146,00	83,00	5,00	1240	69500,00	47470775,00	0,000081
10	30000,00	109,00	187,00	134,00	121,00	4,00	1260	78193,00	53516959,00	0,000161
11	33000,00	72,00	143,00	63,00	62,00	4,00	1320	87061,00	59330685,00	0,000231
12	36000,00	104,00	49,00	135,00	98,00	3,00	1220	95600,00	64726963,00	0,000227
13	3000,00	72,00	178,00	214,00	55,00	3,00	1190	24561,00	103145,00	0,000025
14	6000,00	109,00	184,00	91,00	49,00	2,00	1130	7843,00	6511360,00	0,000036
15	9000,00	75,00	77,00	232,00	83,00	2,00	1120	16203,00	12593439,00	0,000050
16	12000,00	111,00	222,00	210,00	88,00	4,00	1100	24101,00	18900151,00	0,000075
17	15000,00	95,00	201,00	88,00	54,00	5,00	1180	32030,00	24652672,00	0,000151
18	18000,00	109,00	61,00	109,00	53,00	3,00	1110	40941,00	30417291,00	0,000118
19	21000,00	86,00	201,00	106,00	79,00	5,00	1250	49347,00	36707866,00	0,000140
20	24000,00	92,00	119,00	93,00	84,00	4,00	1310	58092,00	42611772,00	0,000233
22	27000,00	87,00	140,00	217,00	118,00	2,00	1250	67430,00	48421511,00	0,000067
23	30000,00	78,00	71,00	210,00	62,00	2,00	1230	75633,00	54799461,00	0,000037
24	33000,00	80,00	153,00	134,00	57,00	3,00	1300	84443,00	60981054,00	0,000106
25	36000,00	104,00	105,00	173,00	54,00	4,00	1200	92977,00	66414844,00	0,000014
26	3000,00	72,00	200,00	86,00	97,00	4,00	1140	25258,00	105930,00	0,000025
27	6000,00	105,00	145,00	196,00	58,00	5,00	1160	7822,00	6011150,00	0,000241
28	9000,00	80,00	133,00	213,00	115,00	3,00	1250	16971,00	12017554,00	0,000213
29	12000,00	96,00	203,00	220,00	110,00	3,00	1280	24758,00	18082176,00	0,000211
30	15000,00	110,00	99,00	83,00	51,00	2,00	1120	33018,00	23282635,00	0,000056
31	18000,00	74,00	108,00	127,00	68,00	3,00	1260	42836,00	29100057,00	0,000150
32	21000,00	116,00	64,00	78,00	109,00	4,00	1300	52085,00	35254743,00	0,000215

33	24000,00	94,00	54,00	137,00	60,00	2,00	1240	61032,00	41298545,00	0,000176
34	27000,00	98,00	140,00	198,00	59,00	4,00	1260	69625,00	47347210,00	0,000242
35	30000,00	95,00	62,00	233,00	78,00	5,00	1320	78190,00	53367991,00	0,000056
36	33000,00	104,00	207,00	106,00	106,00	5,00	1220	86462,00	59217350,00	0,000050
37	36000,00	82,00	101,00	160,00	103,00	5,00	1190	96010,00	64724545,00	0,000241
38	3000,00	72,00	143,00	182,00	115,00	5,00	1160	25463,00	102038,00	0,000025
39	6000,00	110,00	236,00	66,00	86,00	5,00	1180	9087,00	6740370,00	0,000076
40	9000,00	95,00	166,00	227,00	76,00	4,00	1240	16881,00	12087273,00	0,000047
41	12000,00	115,00	235,00	81,00	98,00	4,00	1260	25575,00	17667961,00	0,000189
41	15000,00	120,00	109,00	110,00	63,00	2,00	1140	33393,00	23202974,00	0,000019
43	18000,00	75,00	81,00	84,00	87,00	2,00	1230	41319,00	29227847,00	0,000036
44	21000,00	89,00	177,00	77,00	93,00	4,00	1300	50413,00	35602028,00	0,000014
45	24000,00	80,00	145,00	135,00	57,00	4,00	1200	58742,00	41807339,00	0,000063
46	27000,00	110,00	128,00	183,00	121,00	2,00	1250	67537,00	47492661,00	0,000128
47	30000,00	98,00	219,00	121,00	51,00	5,00	1310	76256,00	53616785,00	0,000102
48	33000,00	97,00	118,00	158,00	104,00	2,00	1220	84861,00	59019028,00	0,000163
49	36000,00	112,00	98,00	138,00	89,00	2,00	1200	92353,00	65628444,00	0,000198
50	3000,00	72,00	220,00	118,00	50,00	3,00	1140	25587,00	103292,00	0,000025
51	6000,00	100,00	217,00	193,00	84,00	4,00	1160	9998,00	6372680,00	0,000155
52	9000,00	107,00	227,00	123,00	89,00	3,00	1250	18782,00	11315731,00	0,000240
53	12000,00	88,00	81,00	173,00	97,00	3,00	1280	26843,00	17203017,00	0,000166
54	15000,00	83,00	187,00	174,00	114,00	2,00	1120	35747,00	23320417,00	0,000138
55	18000,00	119,00	69,00	94,00	54,00	2,00	1260	44295,00	29673396,00	0,000206
56	21000,00	109,00	223,00	156,00	121,00	5,00	1300	52874,00	35752435,00	0,000127
57	24000,00	78,00	130,00	217,00	108,00	2,00	1240	61849,00	41639304,00	0,000227
58	27000,00	75,00	90,00	95,00	88,00	3,00	1260	69678,00	47494771,00	0,000168
59	30000,00	110,00	160,00	225,00	55,00	2,00	1320	77836,00	53305158,00	0,000031
60	33000,00	83,00	211,00	103,00	118,00	3,00	1220	86907,00	59351024,00	0,000132
61	36000,00	106,00	83,00	135,00	120,00	2,00	1210	94972,00	65459668,00	0,000084
62	3000,00	72,00	98,00	51,00	121,00	2,00	1130	25162,00	105376,00	0,000025
63	6000,00	96,00	158,00	58,00	113,00	2,00	1100	8717,00	5927096,00	0,000035
64	9000,00	83,00	219,00	194,00	114,00	3,00	1210	18250,00	11804167,00	0,000107
65	12000,00	78,00	80,00	234,00	124,00	3,00	1270	27743,00	17407346,00	0,000092
66	15000,00	100,00	49,00	54,00	96,00	2,00	1100	35990,00	23105734,00	0,000170
67	18000,00	81,00	216,00	67,00	121,00	4,00	1280	45749,00	29372651,00	0,000148
68	21000,00	95,00	135,00	178,00	54,00	4,00	1300	55524,00	35130581,00	0,000147
69	24000,00	91,00	51,00	171,00	78,00	5,00	1240	63511,00	41236874,00	0,000025

70	27000,00	103,00	50,00	115,00	65,00	5,00	1240	72517,00	47153130,00	0,000043
71	30000,00	96,00	130,00	104,00	83,00	5,00	1320	80906,00	53411897,00	0,000124
72	33000,00	114,00	222,00	59,00	124,00	3,00	1210	89550,00	59298741,00	0,000088
73	36000,00	104,00	223,00	62,00	108,00	4,00	1200	97176,00	65211652,00	0,000183
74	3000,00	72,00	63,00	201,00	72,00	5,00	1140	24627,00	107146,00	0,000025
75	6000,00	95,00	152,00	207,00	103,00	5,00	1160	9946,00	5819094,00	0,000027
76	9000,00	87,00	81,00	167,00	90,00	4,00	1250	19220,00	12001509,00	0,000239
77	12000,00	78,00	202,00	117,00	62,00	2,00	1280	28203,00	18288758,00	0,000220
78	15000,00	107,00	193,00	100,00	97,00	4,00	1120	37540,00	24294981,00	0,000163
79	18000,00	93,00	166,00	175,00	110,00	2,00	1260	45865,00	29741287,00	0,000122
80	21000,00	76,00	184,00	144,00	58,00	5,00	1300	56207,00	35331629,00	0,000216
81	24000,00	89,00	216,00	127,00	74,00	4,00	1240	64257,00	41641118,00	0,000080
82	27000,00	84,00	130,00	129,00	115,00	3,00	1260	71823,00	47565161,00	0,000192
83	30000,00	97,00	182,00	84,00	88,00	4,00	1320	81944,00	53746720,00	0,000040
84	33000,00	116,00	115,00	161,00	120,00	4,00	1220	90605,00	59730325,00	0,000072
85	36000,00	94,00	185,00	133,00	89,00	5,00	1200	98521,00	65485555,00	0,000157
86	3000,00	72,00	127,00	131,00	96,00	2,00	1150	24949,00	103878,00	0,000025
87	6000,00	100,00	91,00	214,00	84,00	5,00	1170	8414,00	6122857,00	0,000086
88	9000,00	120,00	220,00	160,00	105,00	4,00	1250	16560,00	12180236,00	0,000188
89	12000,00	93,00	205,00	202,00	121,00	2,00	1290	25300,00	18377062,00	0,000174
90	15000,00	118,00	122,00	139,00	64,00	4,00	1190	33993,00	24393230,00	0,000123
91	18000,00	90,00	235,00	230,00	71,00	3,00	1280	42272,00	30196016,00	0,000027
92	21000,00	72,00	136,00	138,00	102,00	4,00	1300	51609,00	36257586,00	0,000169
93	24000,00	114,00	238,00	157,00	65,00	2,00	1220	60805,00	42241822,00	0,000034
94	27000,00	75,00	186,00	153,00	67,00	5,00	1200	70091,00	48354168,00	0,000169
95	30000,00	117,00	211,00	163,00	102,00	5,00	1300	79092,00	54306211,00	0,000112
96	33000,00	92,00	192,00	92,00	101,00	2,00	1210	87462,00	60256625,00	0,000226
97	36000,00	114,00	231,00	141,00	49,00	4,00	1210	95347,00	66807283,00	0,000103
98	3000,00	72,00	110,00	121,00	91,00	5,00	1200	25961,00	103376,00	0,000025
99	6000,00	83,00	156,00	225,00	77,00	3,00	1140	8858,00	5732681,00	0,000061
100	9000,00	80,00	186,00	139,00	77,00	5,00	1160	18145,00	12274658,00	0,000179

Таблица Б.2 – Расчетные значения показателей эффективности

№ опыта	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>4</sub>	К <sub>5</sub>	№ опыта	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>4</sub>	К <sub>5</sub>
1	0,68	81,79	0,73	2,86	690 000	51	0,83	81,62	0,70	2,98	690 000
2	1,27	77,96	0,70	2,99	655 000	52	1,26	77,83	0,71	2,98	655 000
3	1,00	82,43	0,71	2,86	650 000	53	1,10	78,20	0,71	2,95	650 000
4	0,91	74,90	0,71	2,92	685 000	54	0,96	79,95	0,71	2,94	685 000
5	1,25	77,31	0,71	3,00	670 000	55	0,91	75,70	0,71	2,95	670 000
6	1,12	79,67	0,71	2,92	645 000	56	0,61	76,13	0,71	2,90	645 000
7	1,21	75,05	0,71	2,94	650 000	57	0,94	78,02	0,70	2,88	650 000
8	1,10	78,27	0,71	2,90	648 000	58	0,76	75,86	0,70	2,90	648 000
9	0,63	77,92	0,71	2,90	650 000	59	0,87	72,59	0,71	2,88	650 000
10	0,61	76,59	0,71	2,90	640 000	60	0,73	72,51	0,71	2,87	640 000
11	1,19	74,26	0,70	2,90	640 000	61	0,96	77,58	0,75	2,91	640 000
12	0,58	71,87	0,70	2,91	647 000	62	0,65	79,64	0,72	3,04	647 000
13	1,00	80,88	0,69	2,61	690 000	63	0,79	78,09	0,71	3,08	690 000
14	0,80	78,96	0,71	2,70	655 000	64	1,29	79,81	0,70	3,00	655 000
15	0,84	82,77	0,70	2,68	650 000	65	1,07	75,81	0,71	3,05	650 000
16	1,26	78,15	0,69	2,67	685 000	66	0,63	78,62	0,70	3,08	685 000
17	0,62	77,48	0,69	2,73	670 000	67	1,06	75,45	0,70	3,02	670 000
18	0,67	83,42	0,69	2,74	645 000	68	0,75	74,30	0,70	3,02	645 000
19	0,77	76,52	0,68	2,77	650 000	69	1,20	74,86	0,70	3,00	650 000
20	1,19	74,23	0,68	2,81	648 000	70	1,16	72,04	0,70	2,99	648 000
21	0,77	76,38	0,69	2,80	650 000	71	0,62	77,37	0,70	2,94	650 000
22	0,93	77,20	0,68	2,81	640 000	72	1,06	75,18	0,70	2,93	640 000
23	1,27	79,00	0,68	2,82	640 000	73	1,39	84,05	0,74	3,32	640 000
24	0,74	74,21	0,68	2,87	647 000	74	0,99	80,96	0,72	3,20	647 000
25	0,63	76,00	0,74	2,61	690 000	75	1,29	79,97	0,71	3,13	690 000
26	1,19	83,89	0,73	2,83	655 000	76	0,67	83,04	0,70	3,13	655 000
27	0,93	76,87	0,72	2,75	650 000	77	0,82	80,97	0,70	3,06	650 000
28	1,09	77,10	0,71	2,75	685 000	78	1,28	79,28	0,69	3,12	685 000
29	1,29	79,89	0,72	2,86	670 000	79	0,94	77,78	0,69	3,06	670 000
30	0,91	75,41	0,72	2,89	645 000	80	0,61	76,50	0,69	2,99	645 000

31	1,27	78,71	0,72	2,91	650 000	81	0,86	71,42	0,69	3,04	650 000
32	1,06	75,23	0,70	2,90	648 000	82	0,94	78,47	0,68	3,02	648 000
33	1,23	76,83	0,71	2,90	650 000	83	0,59	73,96	0,69	2,99	650 000
34	0,62	77,71	0,70	2,88	640 000	84	1,21	75,20	0,68	2,98	640 000
35	0,96	79,45	0,70	2,91	640 000	85	0,95	76,71	0,73	2,80	640 000
36	0,57	71,56	0,70	2,94	647 000	86	1,10	77,62	0,73	2,76	647 000
37	0,68	82,27	0,72	3,03	690 000	87	0,64	78,95	0,71	2,81	690 000
38	0,97	79,33	0,72	2,81	655 000	88	1,20	74,33	0,70	2,83	655 000
39	1,03	84,63	0,72	2,84	650 000	89	1,11	78,70	0,70	2,82	650 000
40	0,80	79,34	0,73	2,78	685 000	90	0,77	76,23	0,70	2,87	685 000
41	1,07	75,63	0,71	2,75	670 000	91	1,07	76,34	0,69	2,90	670 000
42	1,03	73,06	0,72	2,80	645 000	92	0,59	74,03	0,69	2,92	645 000
43	1,05	74,48	0,71	2,80	650 000	93	1,06	75,13	0,69	2,93	650 000
44	0,80	79,42	0,71	2,81	648 000	94	0,89	74,11	0,69	2,92	648 000
45	0,78	77,44	0,70	2,82	650 000	95	1,04	74,11	0,69	2,89	650 000
46	1,26	78,60	0,70	2,83	640 000	96	0,58	72,52	0,69	2,89	640 000
47	0,73	72,82	0,71	2,80	640 000	97	1,00	80,34	0,71	2,95	640 000
48	1,01	71,88	0,71	2,83	647 000	98	1,17	82,49	0,69	3,02	647 000
49	0,80	77,40	0,70	3,33	690 000	99	0,9578	78,9368	0,7093	2,9754	690 000
50	1,29	79,27	0,70	3,13	655 000	100	0,89	73,5538	0,7039	2,8683	655 000

## Приложение В

Таблица В.1 – Значение коэффициентов регрессии и доминанты для показателя К1

Коэффициенты регрессии стандартизованного вида									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{то}$	$Q_{то}$	$C$	$\omega_0\ \Phi C$
1,634869323	-0,02648	-0,04313	0,005086	-0,02602	0,026505	-0,60026	-0,19021	-0,89161	0,029802
Коэффициенты доминантов									
$T_{пл\ гн}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{то}$	$t_{квр}$	$\omega_0\ \Phi C$	$C$	$t_{ож\ авд}$	$Q_{то}$
1	0,545372	0,367162	0,116347	0,026381	0,018229	0,016212	0,016197	0,015914	0,003111

Таблица В.2 – Значение коэффициентов регрессии и доминанты для показателя К2

Коэффициенты регрессии стандартизованного вида									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{то}$	$Q_{то}$	$C$	$\omega_0\ \Phi C$
3,252161	6	0,222431	0,263907	-0,40776	0,198133	-2,56843	-0,61693	-2,03613	0,046901
Коэффициенты доминантов									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ото}$	$Q_{то}$	$t_{квр}$	$t_{то}$	$t_{пто}$	$C$	$t_{ож\ авд}$	$\omega_0\ \Phi C$
1	0,542027	0,428072	0,339354	0,102822	0,06796	0,043985	0,037072	0,033022	0,007817

Таблица В.3 – Значение коэффициентов регрессии и доминанты для показателя К3

Коэффициенты регрессии стандартизованного вида									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{то}$	$Q_{то}$	$C$	$\omega_0\ \Phi C$
-0,28478	0,001089	-0,00119	-0,00052	0,001668	0,000631	0,258605	0,015826	0,003093	-0,00044
Коэффициенты доминантов									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$Q_{то}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{то}$	$t_{ото}$	$C$	$\omega_0\ \Phi C$
1	0,908084	0,055572	0,01086	0,005856	0,004171	0,003824	0,002215	0,001836	0,00156

Таблица В. 4 – Значение коэффициентов регрессии и доминанты для показателя К4

Коэффициенты регрессии стандартизованного вида									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{то}$	$Q_{то}$	$C$	$\omega_0\ \Phi C$
4,160388	-0,01087	0,005832	0,004874	0,005569	0,017778	-1,53826	0,040265	-2,66994	0,009961
Коэффициенты доминантов									
$T_{пл\ гн}$	$C$	$t_{то}$	$t_{ото}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{ож\ зчм}$	$\omega_0\ \Phi C$	$Q_{то}$	$t_{пто}$	$t_{квр}$
1	0,641752	0,36974	0,009678	0,004273	0,002613	0,002394	0,001402	0,001339	0,001172

Таблица В. 5 – Значение коэффициентов регрессии и доминанты для показателя К5

Коэффициенты регрессии стандартизованного вида									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ зчм}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{квр}$	$t_{пто}$	$t_{ото}$	$t_{то}$	$Q_{то}$	$C$	$\omega_0\ \Phi C$
-1081,55	-1,7029	-1,48387	2,854546	-1,17704	-0,79952	43,10637	34,37557	996,5633	-2,37959
Коэффициенты доминантов									
$T_{пл\ гн}$	$t_{ож\ авд}$	$t_{квр}$	$C$	$t_{ож\ зчм}$	$\omega_0\ \Phi C$	$Q_{то}$	$t_{пто}$	$t_{то}$	$t_{ото}$
1	0,921419	0,039856	0,031784	0,002639	0,0022	0,001574	0,001372	0,001088	0,000739