МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

Институт авиации, наземного транспорта и энергетики

Кафедра конструкции и проектирования летательных аппаратов

Направление подготовки 24.04.04 «Авиастроение»

К защите допустить

Зав. каф. КиПЛА

_____В.Г.Гайнутдинов

«___» _____20_____г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему «Совершенствование методов расчета надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации»

ОБУЧАЮЩИЙСЯ Н.В. Тухватуллина _____

РУКОВОДИТЕЛЬ доцент, к.т.н. Н.В. Левшонков _____

Казань 2018 г.

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

federal state budgetary educational institution of higher education «Kazan national research technical University. A. N. Tupolev-KAI»

(KNRTU-KAI)

Institute of aviation, land transport and energy

Department of aircraft design and construction

Direction of training 24.04.04 «Aircraft»

To protect allow

Head of department. CiPLA

_____V.D.Gaynutdinov

"___" _____20_____year.

FINAL QUALIFYING WORK

on the topic « Improvement of methods of reliability calculation of functional systems of civil aviation»

STUDENT N. V. Tukhvatullina _____

HEAD associate professor, c.t.s. N. V. Levshenkov _____

Kazan 2018 г.

Аннотация

В рамках выпускной квалификационной работы - «Совершенствование методов расчета надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации» рассматриваются вопросы начального этапа проектирования глубоководных буксируемых систем, предлагается методика их автоматизированного проектирования.

На основе инженерного метода предварительного проектирования глубоководной буксируемой системы в среде MatLab разработан программный комплекс. Применение программного комплекса позволяет до начала конструкторских работ оценить принципиальную возможность создания системы с заданными свойствами и определить возможные проектные решения глубоководных буксируемых систем. Программный комплекс позволяет: подобрать кабель трос удовлетворяющий условиям прочности, определить возможный облик глубоководной системы при выбранном тросе, определить вес требуемого балласта для уменьшения длины кабель троса, подобрать альтернативное балласту заглубляющее крыло, подобрать крыло для совершения вертикального маневра и пр.

Работоспособность программного комплекса апробирована на разработанной и эксплуатируемой системе «универсальный многоканальный буксируемый комплекс». Проводится сравнение результатов применения программного комплекса с результатами, полученными в ходе выполнения опытно конструкторских работ по разработке буксируемой системы. Приводятся рекомендации по доработке системы УМБК на основе применения программного комплекса.

Annotation

In the framework of the final qualifying work "the Method for preliminary hydrodynamic design of a deepwater towed systems," addresses issues of the initial design phase of the deepwater towed systems, proposes a method of computer-aided design.

On the basis of engineering method of preliminary design of deep-water towed system in MatLab the software complex is developed. The application of the software allows to evaluate the principal possibility of creating a system with the specified properties and to determine the possible design solutions of deep-water towed systems before the start of design work. The software allows you to: choose a cable cable that meets the conditions of strength, to determine the possible shape of the deep-water system with the selected cable, to determine the weight of the required ballast to reduce the length of the cable, to choose an alternative to the ballast sinking wing, to choose a wing for vertical maneuver, etc.

The efficiency of the software complex is tested on the developed and operated system "universal multichannel towed complex". A comparison of the results of the application of the software complex with the results obtained in the implementation of development works for the development of a towed system. The recommendations for the revision of the UIMC system based on the application of the software package.

Содержание

Введение……. 7

1. Основы контроля надежности самолетов ..……. 9

1.1 Основные понятия и определения ..……..……..…..... 9

1.2 Состояние парка самолетов гражданской авиации ……..…..... 10

1.3 Отечественный и зарубежный опыт обеспечения и поддержания летной годности самолетов ……. 16

1.4 Постановка задачи исследования ……. 18

2. Методики оценки надежности агрегатов и функциональных систем …. 28

2.1 Методики оценки и обеспечения надежности, применяемые на авиапредприятии……..……. 28

2.1.1. Методики обеспечения надежности на КАЗ им. С.П.Горбунова - филиал ПАО "Туполев" ……. 33

2.1.2. Метод входного контроля комплектующих изделий на КАЗ им. С.П.Горбунова - филиал ПАО "Туполев"…… 43

2.2 Модели надежности агрегатов функциональных систем самолета……. 44

2.2.1. Процедура построения математической модели надежности агрегата в виде экспоненциального закона на основе распределения Пуассона ……. 46

2.2.2 Процедура построения математической модели надежности агрегата в виде экспоненциального закона на основе определения интенсивности отказов…… 50

3. Методы решения задач надежности ……. 53

3.1 Математическая модель вероятности отказа агрегата…… 55

3.2 Анализ метода решения задачи, расчета надежности систем с общим резервированием…… 55

3.3 Анализ метода решения задач расчета систем с индивидуальным резервированием и возможности повышения надежности систем…… 66

Заключение……..…… 90

Conclusion (заключение на английском языке) …… 92

Список использованных источников……..... 93

Введение

В настоящее время в традиционно сложившейся системе оценок надежности авиационной техники гражданской авиации (ГА) используются косвенные показатели оценки надежности. К ним можно отнести такие показатели, как средняя наработка на отказ, количество отказов на 1 000 часов налета (К1 000) [1] и их разновидности. Отслеживание динамики изменения этих показателей в функции календарного времени обеспечивает возможность для разработки и принятия мер по поддержанию надежности авиационной техники и ее летной годности. Летная годность определяется ее нормами [2], которые представляют требования государства к надежности авиационной техники как к основе обеспечения безопасности полетов.

Проблема обеспечения надежности стала особенно актуальной в настоящее время. Это объясняется в основном двумя факторами, продолжающимися усложнениями авиационной техники и увеличением объема воздушных перевозок. Современные летательные аппараты все больше оснащаются средствами автоматики, радиоэлектронной аппаратурой, сложными системами и агрегатами, состоящими из большого числа элементов, блоков и узлов. При этом, несмотря на повышение надежности отдельных элементов, надежность систем летательных аппаратов в целом не только не повышается, но иногда даже понижается. Недостаточная надежность снижает уровень исправности и готовность самолетов к полету, что вызывает понижение эффективности их использования и повышение эксплуатационных расходов.

Надежность самолета закладывается на стадии проектирования, обеспечивается при его строительстве и поддерживается при его эксплуатации [6]. Период эксплуатации продолжителен по календарному времени и по наработке летных часов. В настоящее время самолеты эксплуатируются в течение 30 ч- 35 лет и нарабатывают до 60 тысяч летных часов.

На надежность самолета оказывают влияние действующие эксплуатационные нагрузки. Для силовых элементов планера самолета нагрузки четко определены Нормами летной годности самолетов (НЛГ) [1] в виде

расчетных случаев. Нагрузки агрегатов систем самолета определяются режимами их работы, продолжительностью и цикличностью, которые в свою очередь зависят от условий использования самолета по назначению. Научно обоснованный учет нагрузок агрегатов систем самолета во многом определяет, с одной стороны, их надежность, с другой - экономические показатели стратегий и режимов технического обслуживания.

Поддержание надежности самолета и его систем при эксплуатации осуществляется системой технического обслуживания [7—14]. Эффективность технического обслуживания прямо зависит от его соответствия техническому состоянию самолета и тенденциям его изменения. Контроль технического состояния предусматривает контроль параметров и контроль надежности.

В связи с изложенным, исследование проблемы оценки надежности функциональных систем по статистическим материалам авиапредприятия, представляется актуальным.

1 Основы контроля надежности самолетов

1.1 Основные понятия и определения

Летная годность — характеристика самолета, определяемая реализованными в его конструкции принципами, конструктивными и технологическими решениями, обеспечивающая безопасность полётов в ожидаемых условиях при установленных методах эксплуатации [17].

Летная годность предъявляет к самолетам широкий спектр требований, определяющих возможность совершения безопасных полетов. Одним из важнейших требований является надежность самолета.

Надежность - способность изделия сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени [18]. Надежность является сложным свойством, определяемым безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью.

Безотказность есть свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени или заданной наработки.

Долговечность - свойство объекта сохранять безотказность в течение заданного времени или заданной наработки. Объекты с одинаковой безотказностью могут существенно различаться по долговечности.

Ремонтопригодность — свойство объекта, определяющее его приспособленность к обнаружению отказов и повреждений к восстановлению и поддержанию работоспособности выполнением технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять безотказность, долговечность и ремонтопригодность при его транспортировании и хранении.

Соотношение этих свойств объекта может быть различным в зависимости от его назначения и условий применения. Так для объекта с высокой степенью безотказности и долговечности, т. е. сохранении безотказности в течение всего срока использования по назначению, ремонтопригодность является

несущественным свойством.

Под «сохранением летной годности» понимается комплекс мероприятий гарантирующих, что, в любой момент срока службы, самолет соответствует действующим требованиям летной годности и его состояние обеспечивает безопасную эксплуатацию [17, 19].

В настоящее время в практике эксплуатации авиационной техники взамен термина и понятия «сохранения летной годности» вводится термин «поддержание» летной годности. «Поддержание» летной годности понятие более активное. Оно определяет активную позицию авиапредприятия в вопросах обеспечения соответствия самолетов требованиям НЛГ. В процессе использования самолета по назначению его летная годность имеет тенденцию к снижению. Авиапредприятия поддерживает летную годность путем выполнения профилактических работ (регулировка, замена смазки и т. п.) и ремонтно-восстановительных работ (замена агрегатов и комплектующих изделий). Фактически авиапредприятия постоянно поддерживает надежность самолетов на уровне соответствующем требованиям НЛГ.

В соответствии с ФАП-145 (федеральные авиационные правила) [20] организации по техническому обслуживанию и ремонту самолетов подлежат государственной сертификации. Деятельность авиапредприятия в области поддержания летной годности осуществляется в соответствии с нормативными требованиями различного уровня, которые выстраивают систему поддержания летной годности. Прежде всего, это ГОСТ 28056-89 [12], ГОСТ 18675-79 [13] и ГОСТ В20436-88 [21], определяющие первый государственный уровень.

Второй уровень это нормативные документы отраслевого значения. Прежде всего, общий отраслевой документ «Наставление по технической эксплуатации, ремонту авиационной техники в гражданской авиации России» (НТЭРАТ ГА-93) [7] и федеральные авиационные правила [20, 22, 23], руководства, методики, указания [24-40].

Третий уровень нормативно-технической документации определяет нормы и правила технической эксплуатации, технического обслуживания и ремонта

конкретных типов самолетов. Это, прежде всего Регламенты технического обслуживания и Руководства по технической эксплуатации по типам ЛА.

1.2 Состояние парка самолетов гражданской авиации

Численность аэродромов остается в 1,5 раза меньше, чем была в 2000 году. В то же время продолжаются работы по реконструкции, аэродромной сети, что приводит к повышению качества аэропортового обслуживания. Также подвергнута масштабной модернизации, аэронавигационная система России, что позволяет поэтапно внедрять современные технологии навигации.

Количество коммерческих авиакомпаний продолжает сокращаться, к концу 2013 года их численность составила 119 ед. При этом выполнение 60% пассажирооборота обеспечивают 4 лидирующих авиакомпании (Аэрофлот,Трансаэро, ЮТэйр, Сибирь), и всего 14 авиаперевозчиков обеспечивают выполнение 90% пассажирооборота.

Отечественного производства	
Ил-96-300	13 единиц
Ту-214	11 единиц
Ту-204-100	8 единиц
Ил-62М	8 единиц
Ту-204-300	6 единиц
Ту-154М	25 единиц
Ту-154Б	2 единицы
Як-42	42 единицы
SSJ-100	13 единиц
Итого	**128 единиц**

Таблица1.1 Данных о составе гражданского парка самолетов России на начало 2014 г.

Парк ремонтируемых самолетов на КАЗ им С.П. Горбунова

Ту22М3М	5 единиц
Ту-160	8 единиц
Ту-214	3 единицы

В четвертом квартале 2016 г. наметился положительный тренд в развитии российского рынка авиаперевозок. В декабре 2016 г. темпы роста перевезенных пассажиров и пассажирооборот российских авиакомпаний составили 20,3 % и 21,9 % соответственно. Этот переломный момент говорит о выходе отрасли из затяжного кризиса и создает новые перспективы ее развития.

Количество пассажиров, перевезенных российскими авиакомпаниями, по итогам 2016 г. уменьшилось на 3,8 % по сравнению с 2015 г. и составило 88,6 млн пассажиров. Пассажирооборот сократился на 5,1 % до 215,3 млрд .пасс.-км (рис. 1.1).

Такое сокращение объемов работы обусловлено, в первую очередь, продолжавшимся в течение первых трех кварталов масштабным снижением международных перевозок, которые по итогам девяти месяцев 2016 г. уменьшились почти на 15 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года при фактической стагнации внутренних перевозок.

Основные причины снижения значений показателей – административное закрытие емких сегментов рынка (Египта, Турции, Украины), вызванное необходимостью обеспечения безопасности перевозок и политическими факторами, и уход с рынка в октябре 2015 г. такого серьезного игрока, как авиакомпания «Трансаэро».

Вместе с тем стабилизация ситуации в экономике РФ и оживление деловой активности к началу четвертого квартала привели к развороту тренда развития отрасли. В октябре 2016 г. отмечено возобновление роста объема перевозок по отношению



Рис. 1.1 Количество перевезенных пассажиров и пассажирооборот российских авиакомпаний в 1995–2016 гг. Источник: анализ ЦСР ГА,

Количество инцидентов, вызванных конструктивно производственными недостатками, 2006 г. составило 42 % от общего количества инцидентов произошедших из-за отказов авиационной техники. Из-за недостатков технической эксплуатации произошло 7 % инцидентов, а из-за недостатков ремонта — 9 %.

Абсолютное количество инцидентов из-за конструктивно производственных недостатков (КПН) в 2006 г. по сравнению с 2005 годом уменьшилось на 29 %, вследствие исчезновения одиночных инцидентов по ряду систем. Например, таких как системы: кондиционирования, автоматического управления полетом и радиосвязного оборудования, а также топливной системе самолета, приборному оборудованию, вспомогательной силовой установке, фонарю и окнам, управлению двигателем и масляной системе.

Причинами вынужденных посадок явились 29 % инцидентов. Прерванных взлетов не зарегистрировано.

По видам оборудования инциденты распределились следующим образом:

- планер и его системы - 29 %;
- двигатель и его агрегаты — 20 %;
- авиационное и радиоэлектронное оборудование — 5 %.

В табл. 1.2 показано распределение отказов из-за конструктивно-производственных недостатков, приведших к инцидентам, по системам самолета.

Как видно из таблицы 1.2, наибольшее число инцидентов в 2005 г. приходится на приборы контроля двигателей - 17 %, на систему управления ЛА - 15 %, на шасси - 15 %.

Далее в отраслевом анализе рассматриваются конкретные случаи отказов классифицированные по трем критериям:

- отказы, в наибольшей степени, повлиявшие на безопасность полетов;
- повторяющиеся отказы.

Таблица 1.2 Распределение процентов отказов из-за КПН по системам самолета

Наименование системы	2005 г.			2006 г.		
	всего	ВП	ПВ	всего	ВП	ПВ
Кондиционирование	-	-	-	1	-	-
Автомагическое управление полетом	-	-	-	1	-	-
Связное оборудование	-	-	-	1	-	-
Электроснабжение	1	-	-	0	-	-
Противопожарное оборудование	3	2	-	2	-	-
Управление ВС	6	-	-	9	1	-
Топливная ВС	-	-	-	1	1	-
Гидравлическая	5	1	-	8	1	-
Приборное оборудование	-	-	-	1	-	-
Шасси	6	1	-	3	1	-
гаю	2	-	-	3	1	-
Водоснабжение	1	-	-	-	-	-
ВСУ	-	-	-	1	-	-
Фонарь, окна	-	-	-	1	1	-
Двигатель	3	2	-	9	2	-
Топливная (двигателя)	1	-	-	2	-	-
Отбор воздуха	1	1	-	-	-	-
Управление двигателем	-	-	-	2	1	1
Приборы контроля двигателя	7	5	-	8	1	1
Выхлоп (реверс)	4	-	-	3	-	-
Масляная	-	-	-	1	-	-
Навигационная радиоаппаратура	1	-	-	1	-	-
Всего по самолету	41	12	-	58	10	2

По состоянию на 01.01.2006 года в авиапредприятиях насчитывалось 314 летательных аппаратов. Из них исправных и выполняющих полеты — 167, что составляет 53 %.

Остальная часть парка (147 самолетов) практически находилась в неактивной эксплуатации и простаивала по следующим причинам:

- находилась в авиаремонтных заводах на капитальном ремонте или простаивает в ожидании ремонта - 88 самолетов (60 % простаивающих);
- находилась в ожидании продления ресурса или срока службы - 20 самолетов (13,6%);
- простаивала из-за отсутствия двигателей и комплектующих изделий — 14 самолетов (9,5 %);
- простаивала в ожидании списания — 15 самолетов (10,2 %);
- находилась на техническом обслуживании в АТБ — 10 самолетов (7 %).

существенные трудности в вопросах поддержания летной годности. К ним отнесены:

- трудности с изысканием авиапредприятием средств для финансирования капитальных ремонтов самолетов и процедур по продлению ресурсов и сроков службы, приобретения комплектующих изделий и запасных частей;
- продолжающийся отток квалифицированных кадров с предприятий отрасли;
- сокращение объемов производства и увеличение стоимости запасных частей предприятиями изготовителями.

Из общего числа простаивающих самолетов, по причине ожидания ремонта и продления ресурсов простаивали 108 (73 %) экземпляров.

В разделе «инженерно-авиационное обеспечение безопасности полетов» [43] отмечено, что в 2006 году в целом по региону налет на 1 инцидент составил 2279 часов, что на 18 % лучше, чем в 2005 г.

Налет на один отказ по типам самолетов в 2007 г составил:

Ил-76 - 7 часов;

Ил-86 - 27 часов;

Ил-62 - 21 час;

Ту-204- 26 часов;

Ту-154МиБ - 33 часа;

Ту-134А -23 часа.

Далее в анализе рассматриваются конкретные виды отказов авиационной техники, их причины и последствия.

Анализ надежности ЛА ТУ-154М и Б, направленный авиакомпанией [51] в Россавианавигацию, содержит сравнительный анализ надежности по системам и отдельным агрегатам. Сравнение выполняется с предшествующим годом и с нормативными значениями $К_{100000и}$ - Нормативные значения $К_{100000}$ для Ту-154М и Б заданы в [52]. В случае превышения для отдельных агрегатов фактических значений $К_{1000}$ над нормативными, АТБ авиакомпании должно разработать и выполнить мероприятия направленные на повышение их надежности.

В целом следует отметить, что оценка надежности парка самолетов в авиакомпаниях, регионах и отрасли осуществляется по сравнительным показателям, по налету на отказ, по $К_{100000}$, $К_{1000}$, по количеству особых ситуаций вызванных отказами авиационной техники.

Связь $К_{1000}$ и $К_{10000}$ с вероятностями отказов на 1 час полета нормируемыми в НЛГ для авиапредприятия не прозрачна. В связи с этим авиапредприятия не осведомлены о фактическом состоянии надежности агрегатов и систем самолетов, что естественно делает не возможными выработку со стороны авиапредприятия предложений по совершенствованию стратегий и режимов технического обслуживания.

1.3 Отечественный и зарубежный опыт обеспечения и поддержания летной годности самолетов

В международном сообществе под термином «обеспечение безопасности» понимается комплекс технических мер и система правовых норм, устанавливающая права и обязанности государств в области обеспечения безопасности полетов в международной гражданской авиации.

Впервые в истории воздушного международного права вопросы летной годности были затронуты в Парижской конвенции в 1919 году. Статья 11

предусматривала обязательную сертификацию самолетов, а в соответствии со статьей 14 между государствами участниками действовало право о взаимном признании сертификатов летной годности. На Парижской конвенции 1922 году 14 государств-членов приняли приложения В, С и Д к конвенции согласно которым самолеты, занятые в международных перевозках, должны удовлетворять минимальным требованиям норм летной годности установленным в приложении В. В приложении Д содержались международные правила аэродромного освещения, сигнализации и правила производства полетов.

В 1944 году на Чикагской конвенции было принято решение о создании международной организации гражданской авиации (ИКАО). Целью деятельности ИКАО стало обеспечение безопасности полетов и упорядочение развития международной гражданской авиации (статья 44). Для этого ИКАО дано право принимать международные стандарты по вопросам безопасности полетов обязательные для всех государств-членов.

В отечественной практике Нормы летной годности гражданских самолетов (НЛГС) впервые изданы в 1967 г. В 1971 г. были изданы изменения к НЛГС и нормы летной годности вертолетов (НЛГВ). В 1972 г. выпущен ряд существенных изменений к НЛГС (НЛГС-1), в которых учитывались требования ИКАО. В 1974 г. введены в действие нормы НЛГС-2 полностью соответствующие ИКАО и устанавливающие уровень летной годности, аналогичный уровню норм летной годности США и Великобритании. На основании накопленного опыта применения НЛГС-2 в 1984 г. приняты нормы НЛГС-3 и для вертолетов НЛГВ-2 (1987 г.).

Отсутствие до 1967 г государственной политики, государственного регулирования летной годности, безусловно, нанесло вред отечественной авиации и не только гражданской. Самолеты создавались с использованием отраслевых и внутрифирменных нормалей.

Перед началом Отечественной войны 1941-45 годов наши летчики испытатели имели возможность облетать все типы германских военных самолетов. По их воспоминаниям: они были поражены одинаковой

устойчивостью и управляемостью у всех типов самолетов. Это, безусловно, облегчало переучивание летчиков с типа на другой тип самолетов. Но устойчивость и управляемость это только одна сторона качества самолетов. Есть еще многие качества и в том числе надежность и технологичность технического обслуживания.

Эксплуатирующиеся в настоящее время самолеты Ту-154М и Б, Ту-134, Ил-62, Ил-76Т и ТД, Ан-24, Ан-26, Ан-32, Ан-12, Як-40 создавались без учета норм летной годности. В связи с этим по вопросам пилотирования самолеты фирм Ту, Ил, Ан различны. Но отличаются они не только этим. Рассмотрения архитектуры их функциональных систем достаточно, что бы понять, что на фирмах существовали свои собственные, отличные от других, и не отрегулированные нормали летной годности, и подходы к обеспечению, например, надежности.

Самолеты Ил-86, Як-42 и Ан-28 создавались с использованием НЛГС-2, а Ту-204, Ил-96-30, Ан74 и Ил-114 по НЛГС-3. В настоящее время вместо НЛГС и НЛГВ введены в действие авиационные правила АП-26 и АП-29.

В соответствии с Законом Российской федерации «О сертификации продукции и услуг» в Государственном реестре зарегистрирована система сертификации авиационной техники и объектов гражданской авиации (АТ и ОГА) [53].

Система сертификации АТ и ОГА, совместно с Руководящим органом в лице МАК, является государственной системой, в соответствии с требованиями которой сертификация типовой конструкции ЛА носит обязательный характер в части касающейся безопасности полетов, безопасности для жизни, здоровья, имущества людей и охраны окружающей среды.

Обязательной сертификации при этом подлежат следующие объекты гражданской авиации: воздушные суда, авиационные двигатели, воздушные винты, комплектующие изделия, международные и категорируемые аэродромы, разработчики авиационной техники, производство авиационной техники.

Госстандартом России 28.08.95 г. зарегистрирована в реестре за номером

РОСС.RV.0001АТ.01 Система сертификации на воздушном транспорте (ССВТ), которая также носит обязательный характер. Разобщенность систем ССВТ, АТ и ОГА, отсутствие единой методологии их создания [54-56] привело к тому, что в них не нашел системного решения комплекс задач обеспечения и поддержания летной годности ЛА.

Международные стандарты и рекомендации по летной годности опубликованы в 1949 г. в Приложении 8 к Чикагской конвенции 1944 г. [14]. Для облегчения государствам в применении Приложения 8, при разработке национальных норм летной годности, ИКАО издало в 1974 г. руководящий материал — Техническое руководство по летной годности [2], которое содержит подробные требования к летной годности.

Страны члены ИКАО имеют свои национальные нормы летной годности или распространяют на свою гражданскую авиационную технику действие норм летной годности одной из передовых авиационных держав, например, США или Великобритании.

Отечественная система сертификации, как было отмечено выше, со всеми ее недостатками сформирована в виде двух систем: Системы сертификации авиационной техники и объектов ГА (ССАТ и ОГА) и Системы сертификации объектов воздушного транспорта (ССВТ).

1.4 Постановка задачи исследования

Выше было показано, что в настоящее время в России да и за рубежом реально существует избыточность парка самолетов. Простои самолетов чреваты исчерпанием ими календарных сроков службы. Но эти сроки велики и составляют 20 -г- 30 лет. Возраст самолетов Ту-154М в основном до 10 максимум до 15 лет. По оптимистическим прогнозам они будут находится в эксплуатации до 2015 года и это без продления сроков службы. Арендуемые и получаемые в лизинг зарубежные самолеты также далеко не новые. На новые экземпляры техники в авиакомпаниях средств нет.

Проблема эксплуатации стареющего парка самолетов существует объективно. Вообще говоря, проблема не нова. На ряду с поступающей новой техникой в эксплуатации всегда находилась и старая. Вследствие глубокого экономического кризиса в гражданской авиации России обострились вопросы эксплуатации стареющей техники на фоне крайне неудовлетворительного обновления парка самолетов за последние 10 лет. Изменение функциональных свойств технических объектов в процессе их длительной эксплуатации определяется их долговечностью, надежностью, условиями эксплуатации (использования по назначению) и соответствием процессов технического обслуживания объективным процессам деградации.

В авиации проблема надежности самолетов стоит существенно острее, чем скажем в наземном транспорте, либо машиностроении. Отказавший в полете самолет невозможно транспортировать, либо остановить для ремонта. Он неизбежно погибает.

Самолет — сложный технический объект, включающий планер со средствами его механизации, двигатели, шасси и функциональные системы. Ресурсы самолета в целом по налету часов, по посадкам, по календарному сроку службы, устанавливаются по ресурсу планера.

Планер и двигатели два наиболее значительных и ответственных элемента самолета. Двигатель настолько самостоятельный в плане разработки, постройки, обеспечения и сохранения надежности объект, что принадлежит к самостоятельной отрасли промышленности и области исследований двигателестроению (моторостроению).

Проблемам обеспечения надежности планера, ее сохранения при длительной эксплуатации посвящено достаточно большое количество серьезных исследований [57-66]. В их основе лежат фундаментальные исследования в области надежности [58, 60], прочности при действии статических и циклических нагрузок [67-70]. Для стареющего парка самолетов [71, 72] с позиций прочности планера особую актуальность приобретают вопросы коррозионной прочности [73—80]. Значительная часть исследований посвящена обеспечению надежности

планера самолета при техническом обслуживании и ремонте [81-86].

В целом по проблемам прочности планера самолета и безопасности полетов выполнено достаточно много серьезных исследований заложивших основы их обеспечения, поддержания и прогнозирования. В связи с этим вопросы надежности планера и двигателей самолета в диссертационной работе не рассматриваются.

Функциональные системы самолетов состоят из большого числа агрегатов и комплектующих изделий, имеющих частичное и полное резервирование. Их влияние на безопасность полетов весьма значительна. В табл. 1.4 приведено распределение доли отказов только из-за конструктивно-производственных недостатков по различным функциональным системам для отечественных самолетов приведших к предпосылкам к авиапроисшествиям (ПАП).

Следует иметь в виду, что, из-за архитектурной сложности, поиск отказов функциональных систем и их устранение сопряжено с существенными потерями времени и средств.

Таблица 1.4 Перечень систем, с указанием наибольшего числа отказов по типам самолетов

Наименование системы	Относительное число ПАП, вызванных отказами систем, %										Относител ьное число в общем числе ПАП, %
	АН - 20	**Л - 410**	**ЯК - 40**	**АН-24**	**ТУ-134**	**ЯК-42**	**ТУ--154**	**ИЛ-62**	**ИЛ - 62М**	**ИЛ - 86**	
Система			4,43		7,30						2,49
Радиоаппаратура	5,56										2,02
Система	9,11	5,64			3,93				4,30		4,39
Система управления				3,29		22,00		6,67			2,72
Гидравлическая		5,64	4,93	3,95	7,87					10,53	3,18
Шасси		42,96	54,66	**21,05**	**36,52**	12,00	**31,70**	6,67	11,82	**37,71**	25,38
Пилотажно-навигационная								6,67	4,30		1,85
Фонарь; окна					4,49						0,93
Крыло						10,00					0,81
Воздушные винты				12.50							2,20
Двигатель	**54,00**	16,20	7,39	12,50	11,80	**28,00**	25,43	21,66	**40,85**	19.30	27,81

Топливная система				5,26					4,30	7,89	4,05
Система зажигания	5,33										1,39
Приборы контроля работы		6,34		11,18			15,67				5,83
Система выхлопа								33,33		13,97	3,24
Навигационная радиоаппаратура			5,43	6,58	3,93						2,02

В табл. 1.5 приведено распределение числа отказов по месту их обнаружения.

Таблица 1.5 Распределение (%) числа отказов и повреждений по месту обнаружения для самолетов ГА

Наименование параметра	Значение параметра по типам ВС					Среднее
	Ту- 134	Як-42	Ту-154	Ил-62М	Ил-86	
Доля отказов, выявленных в полете Доля отказов выявленных: при оперативном ТО при периодическом ТО	54,4 22,6 23,0	51,7 21,3 27,0	40,8 24,0 35,2	38,0 18,7 43,3	36,5 24,8 38,7	44 ,3 22

В среднем по всем типам самолетов доля отказов выявленных в полете составляет 44,3 *%,* а при оперативном техническом обслуживании 22,3 %. В первом случае отказы уменьшают безопасность полетов, во втором — их устранение сопровождается задержками рейсов и большими экономическим потерями. Естественно, что на функциональных системах самолетов в целом отражаются определенным образом и процессы старения и воздействия временных и циклических нагрузок. Изучение этих процессов с целью выработки рациональных стратегий в обеспечении надежности функциональных систем и повышении безопасности полетов представляется актуальной задачей для диссертационного исследования.

Приступая к изложению результатов исследования по проблеме, следует обратить внимание на вопросы системного, терминологического и понятийного порядка, затрудняющие как решение поставленной задачи, так и обеспечение анализа надежности и безопасности полетов самолетов в практике их эксплуатации.

Ранее отмечалось, что в гражданской авиации России существуют две

системы сертификации:

- система сертификации авиационной техники и объектов ГА (ССАТ и ОГА) во главе с межгосударственным авиационным комитетом (МАК), эта система разработчиков и изготовителей;
- система сертификации объектов воздушного транспорта (ССВТ), система авиапредприятия авиационной техники.

В этих системах отказы самолетов и их агрегатов классифицируются по степени опасности, в соответствии с которой определяют допустимую вероятность их реализации в полете.

Система ССАТ и ОГА опирается на нормы летной годности, в которых степени опасности отказов классифицируются по ситуациям: катастрофической, аварийной, сложной и усложненными условиями полета.

Катастрофическая ситуация определена как ситуация, при достижении которой предотвращение гибели людей невозможно. Катастрофическая ситуация признана практически невероятной. Частота ее появления не должна превышать 10^{-6} на час налета для самолета в целом.

Аварийная — ситуация характеризуется значительными нагрузками на экипаж и приводит к достижению предельных ограничений и расчетных условий.

Предотвращение перехода аварийной ситуации в катастрофическую требует высокого профессионального мастерства членов экипажа.

Предельными для параметров полета являются ограничения, выход за которые недопустим ни при каких обстоятельствах. Например, предельное ограничение по перегрузке сопряжено с разрушением самолета.

Аварийная ситуация вызванная отказами авиационной техники отнесена к событиям крайне мало вероятным. Вероятность ее появления должна быть не более $10^{\sim 6}$ на час полета.

Сложная - ситуация характеризуется заметным повышением психологической нагрузки на экипаж, значительным ухудшением летных характеристик, устойчивости и управляемости самолета, а также выходом одного

либо нескольких параметров полета за эксплуатационные ограничения, но без достижения предельных ограничений и расчетных условий. Выход параметров полета за эксплуатационные ограничения количественно определяет момент наступления сложной ситуации.

Предотвращение перехода сложной ситуации в аварийную и катастрофическую может быть обеспечено действиями экипажа в соответствии с руководством по летной эксплуатации самолета. Вероятность ее появления не более 10^{-6} на час полета.

Эксплуатационные — ограничения, выход за которые не допустим в нормальной эксплуатации самолета.

Усложненные условия полета - особая ситуация характеризующаяся незначительным увеличением психологической нагрузки на экипаж или незначительным ухудшением устойчивости, управляемости и летных характеристик самолета. Эта ситуация отнесена к категории повторяющихся с вероятностью не более 10" на час налета.

Подробное рассмотрение определений особых ситуаций обусловлено тем, что оценки надежности функциональных систем самолетов, вероятности реализаций в полете тех, либо иных отказов должны сопоставляться по опасности последствий и вероятности появления именно с этими ситуациями. Использование приведенных определений в ряде случаев вызывает затруднения. Так, усложненные условия полета количественно никак не определены. Упоминания об ухудшении устойчивости и управляемости носят качественный характер. Количественные оценки перехода к сложной и аварийной ситуации замкнуты только на параметры полета.

Можно привести множество ситуаций приводящих к авариям и катастрофам из-за отказов функциональных систем при сохранении в нормальных пределах параметров полета, летных характеристик, устойчивости и управляемости. Это - не локализуемые пожары, разгерметизация салонов на эшелоне полета, интенсивное попадание масла в систему наддува салонов, не выпуск хотя бы одной опоры шасси, отказ систем навигации и связи в сложных

метеоусловиях и т. п.

В системе авиапредприятия (ССВТ) различают инцидент, серьезный инцидент и авиа происшествие (АП). Причем под АП понимается как ситуация без человеческих жертв, так и с человеческими жертвами. Часто их, как и у разработчика именуют авариями и катастрофами соответственно. В разряд инцидентов попадают усложненные условия полета и сложная ситуация. Иногда вместо инцидента, либо серьезного инцидента в системе авиапредприятия вводится понятие предпосылки к авиационному происшествию (ПАП).

Инцидент определен как событие, связанное с использованием самолета с момента вступления на борт человека, намеренного совершить полет, и обусловленное отклонениями нормального функционирования самолета, экипажа, служб управления и обеспечения полетов, воздействия внешней среды, могущее оказать влияние на безопасность полетов, но не закончившееся АП.

Инцидент, создавший реальную угрозу безопасности полетов и не закончившийся АП благодаря мастерству экипажа, либо благоприятному стечению обстоятельств, отнесен к серьезным инцидентам.

В обоих определениях количественных оценок наступления соответствующих ситуаций нет. С позиций надежности авиационной техники к состояниям инцидент и предпосылка к авиационному происшествию правомерно отнести любой отказ, не приводящий к аварийной и катастрофической ситуации. Т. е. инцидент становится широким понятием, включающим отказы, с существенно различными по тяжести и влиянию на безопасность полетов последствиями. Очевидно, в связи с этим, чтобы ввести градацию внутри особых ситуаций определяемых как инцидент, в отрасли ГА часто применяют такие понятия как инцидент, приведший и не приведший к изменению плана полета, т. е. была вынужденная посадка, либо нет.

Следует иметь ввиду, что разработчик классифицирует отказы по тяжести последствий на стадии проектирования и сопровождения эксплуатации самолетов, а эксплуатант в процессе его использования по назначению. У эксплуатанта градация тяжести последствий отказа авиационной техники

выражена четче:

- если отказ не привел к изменению плана полета, но повлиял на безопасность

полета, то он классифицируется как инцидент;

- если отказ потребовал изменения плана полета (привел к вынужденной посадке), то это серьезный инцидент, либо ПАП;

- когда последствием отказа явилось разрушение самолета (тем более с человеческими жертвами), то это авиационное происшествие.

Но в отличие от НЛГ разработчика и изготовителя у эксплуатанта вероятности возникновения этих особых ситуаций количественно не нормированы.

Кроме того, в Руководстве по расследованию авиационных происшествий и инцидентов [87], ситуация возникновения серьезного инцидента связывается с выходом значений параметров полета за пределы ожидаемых условий эксплуатации. В соответствии с НЛГ нормирование летной годности самолета предусматривается также в ожидаемых условиях эксплуатации. Но в НЛГ под ожидаемыми условиями понимаются три группы факторов, а именно:

- факторы воздействия на самолет внешней среды: барометрическое давление, температура, влажность, ветер, сдвиг ветра и т. п.;

- эксплуатационные факторы: состав экипажа, класс аэродромов, состояние взлетно-посадочной полосы (ВПП), загрузка, центровка при различных конфигурациях самолета, режимы работы двигателей, характеристики воздушных трасс, маршрутов, качество топлива, применяемые масла, периодичность и виды технического обслуживания;

- параметры режимов полета: высота, горизонтальная и вертикальная скорости, перегрузки, углы крена и тангажа, сочетания этих параметров при различных конфигурациях самолета.

Эти факторы фактически являются условиями, под которые разрабатывается самолет их затруднительно использовать для идентификации серьезного инцидента.

При переходе к эксплуатации самолета и его систем по техническому состоянию, агрегаты и комплектующие изделия (АиКИ) распределяют на группы по методам эксплуатации. Такое распределение представлено в табл. 1.6 для самолетов Ту-154М[52].

Таблица 1.6 Распределение АиКИ Ту-154М по методам эксплуатации

№ п/п	Наименование системы	Количество изделий	Количество изделий по методу эксплуатации		
			по ресурсу	до предотказного	до отказа
1.	Пилотажно-навигационная	37	8	4	25
2.	Радио-электронная	61	12	1	48
3.	Силовая установка	16	6	1	9
4.	Топливная	41	6	6	29
5.	Планер	53	13	7	33
б.	Шасси	53	12	10	31
7.	Гидравлическая	86	2	5	79
8.	Управления	48	8	2	38
9.	Электрооборудование	468	8	3	457
10.	Высотная	48	3	7	38
11.	Противообледенительная	12	1	4	7
12.	Кислородная	5	1	-	4
13.	Бытового оборудования	ПО	-	3	107
14.	Водоснабжения	29	3	1	25
15.	Противопожарн ая	7	3	-	4
	ИТОГО:	1074	86	54	934

Таким образом, 934-м агрегатам и комплектующим изделиям определен метод эксплуатации до безопасного отказа. Техническое обслуживание этих изделий осуществляется с контролем уровня надежности. Разработчиком установлен одинаковый для всех изделий уровень надежности, определяемый значением $К_{1000}$ равный 0,2, т. е. допускается до 2-х отказов каждого типа изделий за 10000 часов налета, или 1 отказ на 5000 часов налета. Поскольку, таких агрегатов и комплектующих изделий 934, нормативный налет на отказ составляет 5,353 часа. В то же время в анализе по региону [43] отмечается, что в целом по всем типам самолетов налет на 1 инцидент, вызванный отказами авиационной техники, составил 2279 часов, а налет на один отказ 22,8 часа. Для ЛА Ту-154М налет на один отказ в 2006 году был 33 часа. Следовательно, на один инцидент приходится по всем типам самолетов в среднем 100 отказов авиационной техники.

По статистическим оценкам ИКАО число аварий и катастроф примерно одинаково. На одну катастрофу приходится 200 -г- 300 инцидентов требующих изменения плана полета и 300 -ь 400 инцидентов не требующих изменения плана полета, т. е. суммарно 500 -ь 700 инцидентов. Если учесть, что по Красноярскому МТУ ВТ МТ РФ налет на инцидент составил 2279 часов, то с учетом статистики ИКАО, вероятность возникновения катастрофической ситуации в среднем по всем типам самолетов составила (0,877 ч- 0,626) -10" на 1 час налета, что не вполне удовлетворяет требованиям норм летной годности по надежности самолетов. Она оказывается ниже примерно на 30 %. Эти 30 % вполне могут быть объяснены различиями в толковании понятия инцидент Эксплуатантами России и ИКАО.

Поскольку Разработчик Ту-154М нормирует в «Методике...» налет на отказ в 6 раз меньше фактического за 2006 год, по крайней мере, по рассматриваемому региону, это повышает вероятность возникновения катастрофических ситуаций до (0,526 ^ 0,375) • $10^{\sim 5}$, что совсем не удовлетворяет НЛГ и действительному состоянию надежности самолетов определяемому их безкатастрофной эксплуатацией. Скорее всего, расхождения вызваны неоднозначностью определений и понятий особых ситуаций в системах ССАТ и ОГА, ССВТ и ИКАО.

2 Методики оценки надежности агрегатов и функциональных систем

2.1 Методики оценки и обеспечения надежности, применяемые на авиапредприятии

В авиапредприятиях проводится оперативный и периодический анализ надежности.

Оперативный - по ежедневной и ежемесячной информации.

Периодический - по данным за квартал, полугодие и год. Обработка информации при оперативной оценке уровня надежности представляет собой, как правило, качественный анализ, а при периодической - количественный и качественный анализ надежности агрегатов, систем и ЛА в целом.

Качественный (инженерный) анализ надежности АТ имеет целью определение причин отказов, неисправностей и повреждений, степени их влияния на работоспособность изделий и систем, а также последствий, к которым они могут привести. Результатом анализа должны быть конкретные предложения и мероприятия по предупреждению отказов, неисправностей и повреждений авиационной техники. По результатам качественного анализа можно судить о возможности изменения периодичности ТО.

Количественный (статистический) анализ позволяет определить фактический уровень надежности по показателям, вычисляемым по математическим зависимостям. Для этого используется установленная нормативными документами номенклатура ее показателей, их фактические, нормативные и контрольные значения. При статистическом анализе надежности сравнивают фактические значения показателей надежности с нормативными или контрольными, определяя влияние эксплуатационных факторов на динамику технического состояния АТ и ее надежности.

В качестве показателей принимаются:

а). Для неремонтируемых изделий:

¾ вероятность безотказной работы $P^*(t)$ за время наработки t;

¾ плотность распределения наработки до отказа $f^*(t)$;

¾ интенсивность отказов $\lambda^*(t)$;

¾ средняя наработка до отказа $T^*_{ср\,о}$;

б). Для восстанавливаемых изделий:

¾ параметр потока отказов $\omega^*(t)$;

¾ средняя наработка на отказ $T^*_{\ о}$;

¾ среднее число отказов (неисправностей) на 1000 часов налета K^*_{1000}

Фактические значения показателей надежности АТ определяют в соответствии с утвержденными Департаментом по авиации методиками, на основе учитываемой информации об отказах, неисправностях и повреждениях. Нормативные значения показателей надежности устанавливаются техническими требованиями на разработку АТ, их включают в ЭД и технические условия на поставку авиационной техники.

Контрольные значения показателей надежности задаются ДА по согласованию с организациями промышленности, включаются в ЭД и служат для определения тенденций и степени изменения надежности АТ в конкретных условиях эксплуатации.

Технико-экономический анализ надежности АТ имеет целую оценку экономических последствий отказов, неисправностей и повреждений, уменьшение соответствующих материальных и финансовых потерь, обоснование имущественных и иных претензий к поставщикам АТ, определение приемлемых условий приобретения и использования АТ и т. п.

Проведение анализа надежности АТ должно быть направлено:

— на выявление эксплуатационных недостатков, которые могут быть устранены эксплуатантом самостоятельно;

— на выявление недостатков конструктивно-производственного происхождения, по которым необходимо предъявлять требования разработчикам, изготовителям и поставщикам авиационной техники;

— на выявление недостатков ЭД и используемых при эксплуатации АТ наземных технических средств;

— на определение экономических последствий недостатков АТ, связанных с надежностью;

— на определение эффективности проводимых мероприятий по устранению недостатков АТ и ее эксплуатации, по обеспечению и повышению надежности всего комплекса объектов АТ и вспомогательных технических средств.

Содержание периодического анализа включает в себя систематизированные материалы:

— о повторных, опасных отказах, неисправностях и повреждениях;

— о всех происшествиях и инцидентах с ВС каждого типа;

— о задержках отправлений и отстранений ВС от полетов, связанных с отказами, неисправностями и повреждениями АТ;

— о ресурсном состоянии ВС и наименее надежных их компонентов;

— о показателях надежности, предусмотренных соответствующей нормативной документацией и соглашениями с получателями информации;

— о выполнении требований, предъявленных поставщикам АТ, эффективности принятых мер по обеспечению надежности конкретных объектов.

В состав аналитических материалов включаются также рекомендуемые по результатам анализа мероприятия. Примером таких мероприятий могут быть разовые осмотры, предложения по выполнению дополнительных работ при сезонном ТО, проведение занятий и тренажей с летным и ИТС и др.

При анализе надежности АТ в авиапредприятиях выполняют следующие работы:

— регистрацию, сбор, учет и обработку первичной информации об отказах и неисправностях;

— расчет по действующим методикам фактических значений показателей надежности изделий;

— оценку влияния имеющихся недостатков на безопасность полетов;

— разработку предложений и мероприятий по устранению и предупреждению выявленных недостатков.

Выявляемые отказы и неисправности АТ регистрируются в бортовых журналах (*AFML-Air Flight And Maintenance Log*), картах-нарядах (*Chart-Order*), ведомостях дефектов *(Non-Routine Write-Ups*), в других документах и носителях информации, /карточка учета неисправностей/ (см. приложение 1).

В типовом случае при анализе надежности используют:

— информацию о зарегистрированных неисправностях АТ;

— материалы различных организаций по исследованию отказавших изделий;

— информацию о неисправностях из бортовых журналов, карт-нарядов и дефектных ведомостей.

Для проведения расчетов используются различные информационно-управляющие системы на базе ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Периодичность проведения авиапредприятием итоговых анализов надежности используемой АТ, их методика, объем и формы представления — определяются решениями Департамента по авиации, в который представляется информация о надежности АТ, необходимая для решения следующих задач в масштабах отрасли:

— оценка сохранения уровня летной годности ВС в процессе их эксплуатации;

— нормирование надежности АТ и оценка фактического ее состояния;

— проведение отраслевых мероприятий по повышению надежности АТ, безопасности и регулярности полетов;

— предъявление требований к производителям АТ по обеспечению ее надежности и снижению эксплуатационных затрат;

— оценка эффективности доработок;

— разработка требований по сертификации ВС, авиапредприятий и лицензированию подконтрольных видов деятельности.

В авиапредприятиях хранят следующую информацию и документацию о надежности авиационной техники:

— первичную информацию о неисправностях АТ, зарегистрированную в соответствии с единым форматом;

— материалы проводимых авиапредприятием анализов надежности;

— внутренние документы авиапредприятия по различным вопросам обеспечения надежности АТ;

— бюллетени по доработкам и проверкам АТ, материалы по рекламационно-претензионной работе;

— директивные материалы и переписку по вопросам надежности АТ с различными организациями;

— официальную информацию по надежности, полученную от других организаций (акты по результатам расследования причин отказа, информационные бюллетени и пр.).

К примеру, в КАЗ им. С.П.Горбунова - филиал ПАО "Туполев" для осуществления указанных функций в составе отдела контроля и управления качеством (производственный аналог ОТК) предусмотрена группа надежности и рекламации и соответствующий инженер, которому на постоянной основе поручено проведение работ по сбору, учету, обработке и анализу информации по надежности АТ.

2.1.1 Методики обеспечения надежности на КАЗ им. С.П.Горбунова - филиал ПАО "Туполев"

«КАЗ им. С.П.Горбунова - филиал ОАО "Туполев" - современное предприятие с высоким интеллектуальным и техническим потенциалом, являющееся уникальным авиастроительным комплексом в Российской Федерации. Казанский авиационный завод был создан 1927 (май) году и всегда был передовым в освоении новых типов боевых и пассажирских самолетов. За годы своего существования завод выпустил 22 типа и модификаций авиационной техники, к числу которых относятся всемирно известные самолеты Пе-2, Пе-8, Ту-16, Ту-104Б, Ту-22М3, Ту-160, Ил-62М. За выпуск качественной и надежной авиационной техники КАЗ им. С.П. Горбунова удостоен четырех правительственных наград.

Авиастроение – это стратегическая отрасль, которая не может развиваться без стабильного госзаказа. В перестроечные годы КАЗ им. С.П. Горбунова пришлось выживать самостоятельно, что не могло не сказаться на финансово-экономическом положении предприятия. Но в последнее время ситуация стала меняться в лучшую сторону. Сейчас, когда происходит процесс модернизации российской армии, в том числе военно-воздушных сил, активно обновляются авиапарки российских компаний, КАЗ им. С.П. Горбунова стабильно обеспечено портфелем государственных и частных заказов.

На данный момент Казанский авиазавод - единственное предприятие в России, которое способно выпускать стратегические бомбардировщики последнего поколения, потребность в которых определяется военной оборонной доктриной нашего государства.

В настоящее время на заводе осуществляется производство, техническое обслуживание авиалайнера Ту-214 специального назначения. Хорошо зарекомендовав себя в эксплуатации на пассажирских перевозках, самолет был выбран в качестве базового для создания целого ряда самолетов специального значения. По спецзаказу Управления делами Президента РФ силами ОАО

«Туполев» были разработаны специальные модификации Ту-214: Ту-214СР (самолёт-ретранслятор), Ту-214ПУ (пункт управления), Ту-214СУС (самолёт — узел связи), оборудованные специальными средствами связи. Дальность полета этих спецбортов увеличена до 10 000 км за счет установки дополнительных топливных баков. Самолет Ту-214 стал также оптимальным лайнером для производства самолетов для Министерства обороны РФ. В частности, на КАЗ им. С.П. Горбунова осуществляется выпуск Ту214ОН, разработанного для реализации Международного проекта Открытое небо.

Кроме того, на предприятии производится капитальный ремонт и модернизация стратегического ракетоносца Ту-160, а с 2011 года – и бомбардировщика Ту-22М3.

Еще одно перспективное направление деятельности завода - развитие производства по кооперации. Сейчас на предприятии ведется активная работа по освоению выпуска оперения для самолета Ил-76-МД-90А.

Акционирование КАЗ им. С.П. Горбунова и его вступление в ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ОАО «ОАК») открывает перед предприятием новые возможности. Политика холдинга, предусматривающая углубленную специализацию входящих в него авиазаводов, предполагает развитие казанского авиазавода как предприятия, выпускающего воздушные суда военного и специального назначения, являющиеся модификациями базовых Ту-214. Осваивая производство новых типов самолетов, КАЗ им. С.П. Горбунова постоянно совершенствует свою производственную базу, уделяя внимание техническому оснащению производства современным оборудованием и внедрению передовых и уникальных технологий. Одним из главных направлений развития предприятия является ориентация на современные компьютерные технологии автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства – все это обеспечивает дополнительные конкурентные преимущества.

Еще одно направление деятельности предприятия - производство крыльевого и хвостового оперения для транспортных самолетов Ил-76МД-90А. В дальнейшем, согласно политике ОАО "ОАК", КАЗ им. С.П. Горбунова будет изготавливать по кооперации крыльевое оперение для предприятий, входящих в состав ОАК.

В 2012 году завод отметил свое 85-летие. Большой и славный путь прошел заводской коллектив за эти годы. Знаменательной страницей вошли они в историю отечественного самолетостроения, стали биографией десятков ученых, авиаконструкторов, летчиков-испытателей, сотен талантливых организаторов производства, многих тысяч рабочих и инженеров. Одно поколение сменялось другим, но каждое приумножало трудовую славу объединения.

В марте 2013 года на Совете директоров ОАО "ОАК" было принято решение об интеграции ОАО "КАПО им. С.П. Горбунова" с разработчиком авиационной техники - ОАО "Туполев".

Тесные связи с разработчиком позволят вести непрерывную работу по совершенствованию выпускаемой продукции, принимая во внимание специфические потребности и интересы конкретных покупателей.

Первым шагом в объединении двух предприятий стало создание инженерно-технического центра. Организация на площадке казанского авиационного завода и КФ КБ "Туполев" подобного центра дает возможность конструкторской службе осуществлять создание конструкторской документации с использованием передовых технологий, более тесно взаимодействовать в решении вопросов при создании авиационной техники. Для моделирования и обработки электронных чертежей установлены мощные по производительности рабочие станции со специальным программным обеспечением, соединенные в локальную сеть.

В марте 2013 года Советом директоров ОАО «ОАК» было принято решение об интеграции двух предприятий: ОАО «КАПО им. С. П. Горбунова» и ОАО «Туполев». Реорганизация компаний завершилась в июне 2014 года путем

присоединения ОАО «КАПО им. С.П. Горбунова» к ОАО «Туполев». Новое предприятие в Казани получило название «Казанский авиационный завод им. С.П. Горбунова – филиал ОАО «Туполев».

В настоящее время «КАЗ им. С.П Горбунова - филиал ПАО «Туполев» сотрудничает с более чем 600 зарубежными и отечественными предприятиями. На предприятии выпускается от 1 до 3 самолётов Ту-214 в год, а также производится ремонт самолётов Ту-160. А с апреля 2015 года возобновлён выпуск Ту-160, по поручению министра обороны РФ. Испытания всех воздушных судов, производимых и ремонтируемых на предприятии, осуществляются на заводском аэродроме «Борисоглебское».

Программа обеспечения качества на стадии производства разрабатывалась для изделия «КАЗ им. С.П Горбунова - филиал ПАО «Туполев», по которому в настоящее время проводятся работы по организации серийного производства. В соответствии с действующей НТД программа обеспечения качества на стадии производства серийных изделий должна охватывать этапы постановки
на производство и установившегося серийного производства.

Постановка на производство (изделий) – совокупность мероприятий по организации промышленного производства вновь разработанных или модернизированных изделий, характеризующаяся двумя этапами проведения работ: подготовкой производства изделий и освоением производства изделий.

Подготовка производства (изделий) – составная часть постановки на производство изделий, содержащая мероприятия организационного, технического, экономического характера, а также другие необходимые мероприятия, обеспечивающие готовность предприятия к освоению производства изделий требуемого качества в заданном объеме выпуска.

Освоение производства (изделий) – составная часть постановки изделий на производство, содержащая мероприятия по изготовлению и проведению квалификационных испытаний изделий, по результатам которых оценивают готовность предприятия к выпуску, изделий в соответствии с заданными требованиями к качеству, количеству и ритму выпуска.

Установившееся серийное производство – производство изделий, характеризуемое изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями, по окончательно отработанной конструкторской и технологической документации.

Для наглядности и понимания последовательности этапов работ на стадии производства приведена схема на рисунке 3

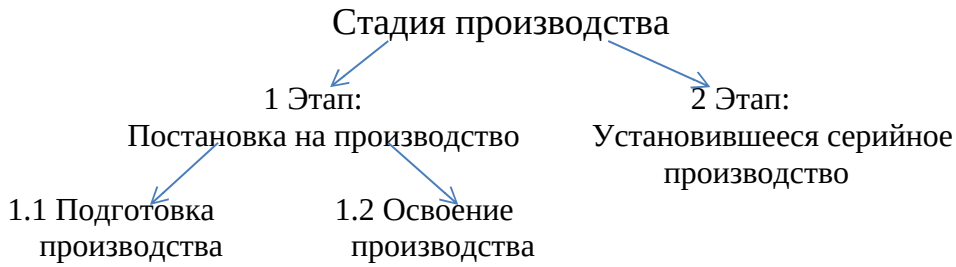


Рисунок 3 – Схема этапов работы

Рассмотрим подробнее этап постановки на производство.

Основные положения и порядок постановки на производство вновь разработанных (модернизированных) изделий военной техники (ВТ) устанавливает ГОСТ РВ 15.301 «Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Постановка на производство изделий».

Цель постановки на производство – обеспечение готовности предприятия к изготовлению и поставке вновь разработанных (модернизированных) изделий, соответствующих требованиям КД, ТУ и условиям государственного контракта на их поставку, в заданном объеме.

Основанием для проведения работ по постановке на производство изделий является государственный контракт (контракт) на поставку изделий, заключаемый между головным изготовителем (изготовителем) и заказчиком (потребителем).

Государственный контракт заключается на основе: заказа государственного заказчика на производство и поставку изделий; постановления Правительства РФ; решения Комиссии Правительства РФ по военно-промышленным вопросам; совместного решения заказчика, головного разработчика (разработчика) и

головного изготовителя (изготовителя) изделия ВТ о подготовке и освоении производства их головным изготовителем (изготовителем).

Для организации выполнения работ по этапам постановки на производство головной изготовитель (изготовитель) изделия разрабатывает организационно-распорядительный документ (распоряжение), в котором для этапов подготовки производства и освоения производства, как правило, указывают:

− наименование изделия, подлежащего постановке на производство;

− головного изготовителя (изготовителя) изделия;

− изготовителей составных частей изделия;

− головного разработчика (разработчика) изделия;

− разработчиков составных частей изделия;

− держателей подлинников КД и ТД в период промышленного производства;

− поставщиков материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий межотраслевого применения;

− объем и сроки мероприятий по подготовке производства и освоению производства (включая передачу от разработчика КД литеры «О1» и ТД опытного образца изделия литеры «О1», необходимых специальных средств технологического оснащения);

− сроки и объем поставок изделий, идущих на комплектацию изделий собственного производства;

− объем выпуска изделий, из расчета которого должна вестись ТПП, сроки изготовления, количество изделий (установочной серии), изготовляемых при постановке на производство;

− исполнителя ТПП;

− мероприятия, направленные на защиту информации от технических разведок и утечки ее по техническим каналам;

− организации (должностные лица), осуществляющие контроль за исполнением данного распоряжения.

На этапе подготовки производства головной изготовитель (изготовитель) выполняет следующие работы:

− разработку комплексного графика (графика, плана) мероприятий по постановке на производство, предусматривающего взаимодействие всех предприятий (организаций), участвующих в подготовке производства (в том числе в ТПП), изготовлении, испытаниях и приемке изделия и его составных частей;

− разработку (отработку) рабочей ТД для изготовления изделий (включая реализацию результатов метрологической экспертизы ТД);

− разработку программы обеспечения надежности для стадии производства (ПОНп) или программы обеспечения качества на стадии производства (ПОКп);

− установление параметров и характеристик технологических процессов, подлежащих контролю и измерениям, и разработку программы (программ) метрологического обеспечения постановки на производство и производства;

− разработку и подготовку к утверждению программы квалификационных испытаний (приемки установочной серии);

− проведение метрологической экспертизы ТД для изготовления изделий и проекта программы квалификационных испытаний изделия;

− разработку и реализацию комплекса мероприятий по подготовке служб, цехов, подразделений предприятия и персонала к проведению ТПП и производству изделия с учетом требований программы метрологического обеспечения постановки на производство изделия, системы технического контроля, требований системы качества и требований по защите государственной тайны;

− приемку КД литеры «О1» и ТД опытного образца изделия литеры «О1» от головного разработчика (разработчика), а также приемку программных средств ВТ от их держателя подлинников или изготовителя;

− приемку от головного разработчика (разработчика) утвержденного макета изделия и его наиболее ответственных составных частей (при необходимости) по решению заказчика, если он изготавливался при разработке изделия;

− приемку от головного разработчика (разработчика) или от головного изготовителя (изготовителя) опытного образца изделия специальных средств технологического оснащения для освоения производства изделия по решению заказчика;

− закупку и получение средств технологического оснащения (в том числе автоматизированных) и технической документации на них (включая управляющие программы) от их поставщиков (изготовителей);

− проведение расчетов, обосновывающих достаточность имеющейся и необходимость требуемой производственной мощности изготовителя для стабильного производства изделий в заданном объеме с целью осуществления ТПП в планируемые сроки;

− организацию, при необходимости, новых специализированных участков и цехов;

− разработку и выполнение мероприятий по совершенствованию системы качества, отвечающей требованиям ГОСТ РВ 0015-002 [4];

− освоение нового оборудования, а также средств испытаний, контроля и измерений;

− проведение поверки средств измерений, аттестации испытательного оборудования и методик выполнения измерений, используемых при испытаниях и производстве изделий;

− подготовку и аттестацию производственного персонала для работы на новом оборудовании и по новым технологическим процессам;

− отработку конструкции на технологичность;

− изготовление, испытания и отладку специальных средств технологического оснащения для изготовления и контроля, а также специальных средств, используемых для испытаний изделий;

− другие мероприятия по подготовке производства, обеспечивающие технологическую готовность предприятия к изготовлению в заданных объемах изделий, соответствующих требованиям КД, с использованием передовых достижений науки, техники и технологий;

Головной изготовитель (изготовитель) начинает освоение производства изделия после завершения подготовки производства.

При освоении производства изделий осуществляют:

− изготовление установленного организационно-распорядительным документом по постановке на производство количества изделий (установочной серии) в соответствии с требованиями КД литеры «О1» и разработанного технологического процесса для изготовления изделий по ТД литеры «О1»;

− испытания изделий (приемку установочной серии);

− дальнейшую отработку (при необходимости) конструкции изделия на технологичность и ТД в целях повышения качества изготовления изделий;

− утверждение необходимых изменений КД, ТД и программной документации или утверждение КД и ТД с присвоением литеры «А», если изготавливалась установочная серия.

Изделия, изготовленные в процессе освоения производства (установочную серию), подвергают испытаниям по категории квалификационных испытаний [2]. Квалификационные испытания проводят с целью подтверждения соответствия изделий требованиям КД, оценки проведенных мероприятий по устранению недостатков, выявленных при государственных (межведомственных) испытаниях опытных образцов изделий, проверки разработанного технологического процесса, обеспечивающего стабильность качества изделий, а также для определения готовности производства к выпуску изделий в заданном объеме.

Результаты квалификационных испытаний считают положительными, если изделия (установочная серия) выдержали испытания по всем пунктам, предусмотренным программой квалификационных испытаний, комиссией положительно оценены технологическая оснащенность производства и стабильность технологического процесса изготовления для возможности выпуска в заданном объеме изделий, соответствующих требованиям КД, ТД, программной документации, а также подтверждена готовность предприятия к поставкам изделий заказчику (потребителю) до получения результатов периодических испытаний, установленных ГОСТ РВ 15.307 [8].

Результаты квалификационных испытаний считают отрицательными, если получены отрицательные результаты хотя бы по одному пункту из предусмотренных программой квалификационных испытаний и (или) комиссией

отрицательно оценена технологическая готовность предприятия для возможности выпуска изделий в заданном объеме.

Положительные результаты квалификационных испытаний изделий (приемки установочной серии) оформляют актом.

Освоение производства изделий в пределах постановки на производство считается завершенным, если:

− выполнены мероприятия комплексного графика (графика, плана) мероприятий по постановке на производство;

− достигнута готовность предприятия к выпуску в заданном объеме изделий, соответствующих требованиям КД;

− получены положительные результаты квалификационных испытаний;

− реализованы мероприятия, предусмотренные в решении по акту квалификационных испытаний изделий (приемки установочной серии), срок выполнения которых не превышает установленного срока начала выпуска изделий;

− КД и ТД, программа и программная документация при необходимости откорректированы (в случае присвоения литеры «А»), а КД (в случае присвоения литеры «А») и ТД утверждены.

2.1.2 Метод входного контроля комплектующих изделий на КАЗ им. С.П.Горбунова - филиал ПАО "Туполев"

Входной контроль комплектующих изделий (КИ) проводиться с целью предотвращения запуска в производство КИ, несоответствующих требованиям нормативной документации, договорам на их поставку и техническим условиям.

Входной контроль осуществляется по параметрам и методам, установленным в нормативной документации на контролируемую продукцию и в договорах на ее поставку. К контролю допускаются КИ, принятые БТК, военным

представительством поставщика и поступившие с сопроводительной документацией.

Входной контроль осуществляется на рабочих местах, аттестованных в соответствии с требованиями МУ 1.1.263. В специально отведенном помещении, оборудованном средствами контроля, испытаний и оргтехники, а также отвечающим требованиям к производственной среде, изложенными в технических условиях на КИ, безопасности труда и санитарным нормам согласно действующих в обществе инструкций по охране труда.

Исполнители, обеспечивающие входной контроль, должны быть аттестованы на право выполнения работы. Ответственным за организацию проведения входного контроля КИ, является начальник ОСПК (отдел снабжения покупных изделий).

Для достижения объективной оценки

2.2 Модели надежности агрегатов функциональных систем самолетов

Математические модели агрегатов в теории надежности представлены в форме вероятностей безотказной работы *p(t)*, вероятности отказов *q(t)* (называемых интегральными функциями) и их плотностей вероятностей *f(t)* (называемых дифференциальными функциями). В качестве математической

модели свойства безотказности элементов, изделий и агрегатов в учебной [89-91], научной [92-94] литературе используется экспоненциальное распределение. Так модель вероятности безотказной работы агрегата представляется

$$\mathbf{P(t) = } e^{-\lambda t}\mathbf{,} \qquad \mathbf{(2.2)}$$

где λ - интенсивность отказов.

В [89] принято, что в случае экспоненциального распределения и стационарности потока отказов, интенсивность отказов λ не зависит от времени и равна параметру потока отказов ω.

Модель вероятности отказа агрегата представляется как

$$\mathbf{q(t)=1-} e^{-\omega t}\mathbf{,} \qquad \mathbf{(2.3)}$$

а характер ее изменения приведен на рис. 2.3.

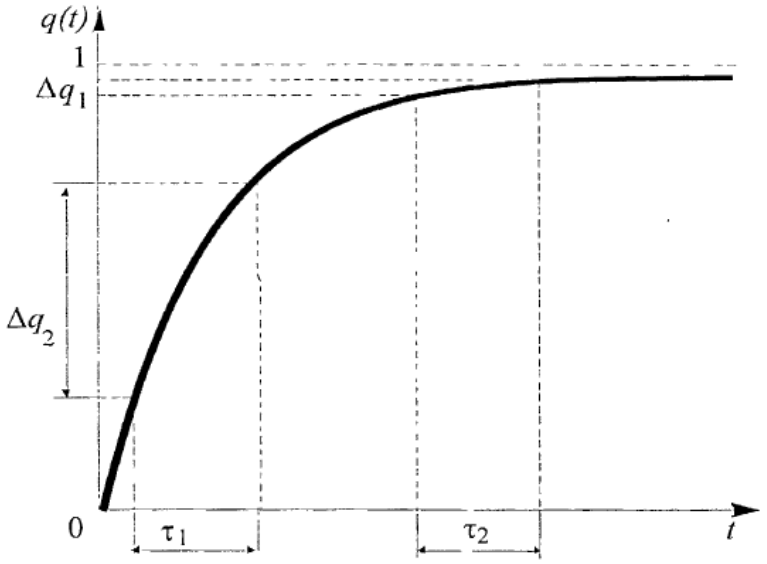


Рисунок 2.3 - Экспоненциальная зависимость вероятности отказа от времени

Оценки надежности агрегатов и систем в гражданской авиации нормированы в Нормах летной годности [17] в вероятностях отказа в единицу времени (1 час полета) в зависимости от тяжести последствий отказа.

Поскольку 1 час полета является величиной третьего порядка малости по сравнению с рассматриваемым диапазоном налета часов самолета (тысячи и десятки тысяч часов), то вероятность отказа на 1 час полета *q(t)* вполне допустимо определять как производную от выражения (2.3), т.е. в виде плотности распределения вероятности *f(t).* Характер изменения *q(t)* приведен на рис. 2.4.

Поскольку параметр потока отказов ω, при большом числе опытов, является математическим ожиданием числа отказов агрегатов в единицу времени (1 час), то правомерность уменьшения вероятности отказа на 1 час, приведенного на рис. 2.4, представляется сомнительной. В связи с этим, ниже приводятся результаты анализа процедур построения экспоненциальной модели надежности агрегата и возможности ее использования.

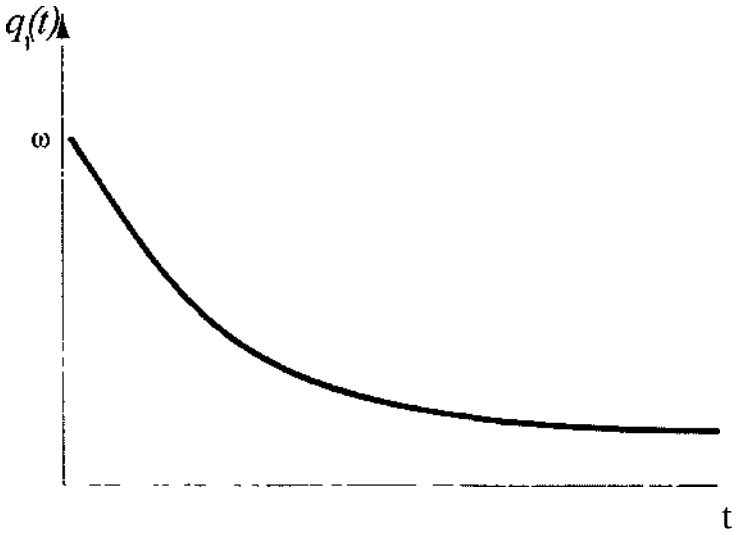


Рисунок 2.4 - Характер изменения вероятности отказа на 1 час при экспоненциальном распределении

2.2.1 Процедура построения математической модели надежности агрегата в виде экспоненциального закона на основе распределения Пуассона

Впервые вопросы неадекватности экспоненциальной модели действительным процессам изменения надежности агрегатов поставлены в работах [95, 96].

Из литературы известны два подхода к построению модели надежности в виде экспоненциального закона. Первый основан на использовании распределения Пуассона для вероятности появления ровно ***m*** отказов на отрезке времени длинной *t* [89, 97].

$$P(m)=\frac{(\lambda t)^m}{m}e^{-\lambda t}$$

Положив участок пустым, т. е. ***m*** = 0, из (2.4) получают выражение (2.2) и (2.3) [89, 97]. Но распределение Пуассона построено применительно к вероятности реализации дискретного числа ровно ***m*** событий (точек) на участке *t.* Длина *t* в распределении Пуассона не является независимой переменной, а входит как сомножитель в параметр распределения, *a* = *λt.* Более того, в указанных источниках, в распределение Пуассона вводится интенсивность отказов λ.

Тогда как, в соответствии с первым условием, накладываемым на совокупность случайных величин, подчиняющихся распределению Пуассона [89, 97]: «вероятность попадания того или иного числа точек на отрезок *t* зависит только от длины этого отрезка, но не зависит от его положения на оси абсцисс. Иными словами, точки распределены по оси абсцисс с одинаковой средней плотностью. Обозначим эту плотность (т.е. математическое ожидание числа точек, приходящихся на единицу(*t)* через λ).

В теории надежности вероятность безотказной работы получена в виде (2.2) из выражения (2.4) при *m* = 0. На том же основании вполне допустимо из (2.4) выразить вероятность одного отказа положив *m* = 1, т. е. получим

$$q_1(t) = \lambda \cdot t \cdot e^{-\lambda t}. \qquad \textbf{(2.5)}$$

Поскольку *p(t)* и $q_1(t)$ представляют собой полную группу несовместных

событий, то их сумма должна быть равна 1, но условие не выполняется

$$P(t) + q_1(t) = (1 + \lambda t) - e^{-\lambda t} \neq 1. \qquad (2.6)$$

График суммы (2.6) приведен на рис. 2.5

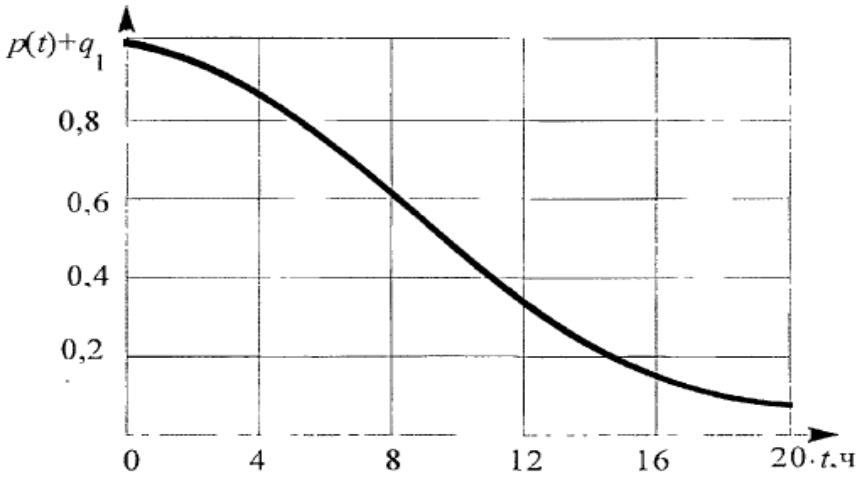


Рисунок 2.5 — Зависимость суммы $p(t) + q_1(t)$ от времени

В действительности в теории вероятностей [97, 99] вероятность отказа (2.3) рассматривается как вероятность не одного, а одного и более отказов. В этом случае условие (2.6) выполняется, но в другой записи

$$P(t) + \sum_{i=1}^{00} q_m(t) = 1. \qquad (2.7)$$

где m — число точек попадания (отказов) на участок протяженностью t.

На рисунке 2.6 приведены кривые, среди которых значение вероятностей отказов $q_{m=}o(t)$, рассчитано по выражению (2.3), полученному из распределения Пуассона (2.4) для случая $m = 0$. Остальные кривые получены непосредственно из выражения (2.4) при различных числах отказов ($m = 1, 2, 3, 4$).

Кривая $q_{10}(t)$ получена для 10 отказов в результате суммирования

$$q_{10}(t) = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) + q_4(t).$$

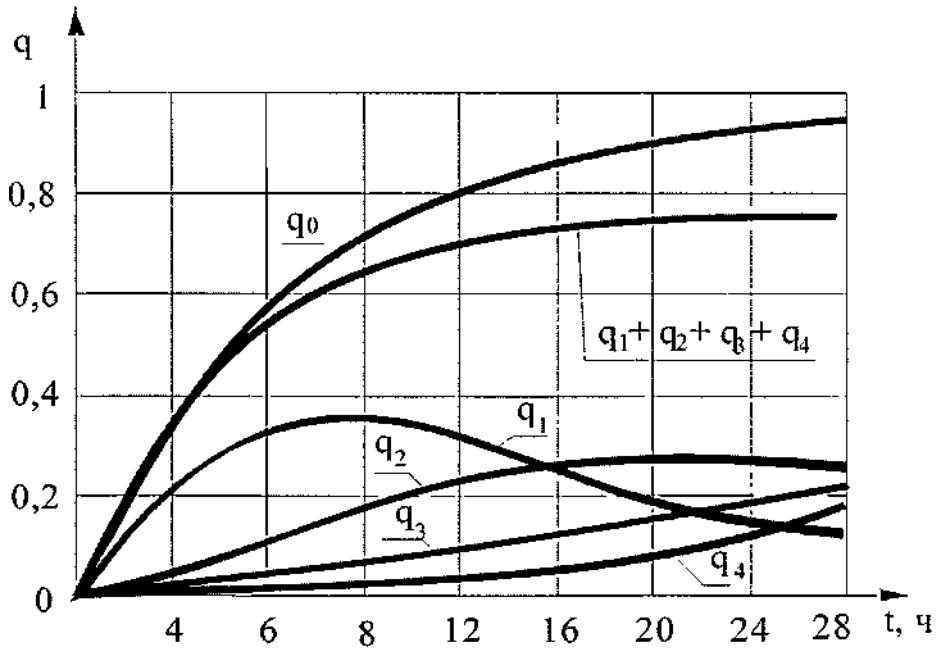


Рисунок 2.6 - Вероятности отказа агрегата определенные при различных ***m***

В теории вероятностей в распределении Пуассона (2.4) вероятность попадания определенного числа точек *m* на участок времени протяженностью *t* обозначается как *P(m)*. В теории надежности, вероятность попадания точки на участок отождествляется с вероятностью отказа и обозначается как *q(t)*. Поэтому вместо обозначения *P(m)* из (2.4), используется $q_m(t)$, где *m*, как и в распределении Пуассона, обозначает число точек попадающих на рассматриваемый участок.

Анализ рис. 2.6 показывает, что в соответствии с распределением Пуассона, вероятности отказов $q_0(t)$ и $q_{10}(t)$, совпадают при *t* изменяющемся от 0 до 5. Для обеспечения совпадения в большем диапазоне *t* можно увеличить число членов суммы.

В связи с изложенным, встает вопрос, каким образом вероятность отказа $q_0(t) = 1 - p_0(t)$, определенная по (2.3) при *m=0*, фактически совпадает с вероятностью большого числа отказов? Модели (2.2) и (2.3) используются в теории надежности для оценки свойства надежности отдельного агрегата, который не может иметь более одного отказа. В связи с этим, можно утверждать, что выражения (2.2) и (2.3) неадекватно оценивают надежность отдельного

агрегата. Подобная некорректность возникла вследствие того, что для оценки надежности отдельного агрегата использовано распределение Пуассона, при построении которого не ставилась и не решалась задача оценки вероятности одного отказа в функции времени.

Распределение Пуассона в руководствах по статистике часто фигурирует под названием «закона редких явлений». На практике показано [97], что при большом числе опытов и малой вероятности появления события в каждом отдельном опыте число появления событий приближенно подчиняется закону Пуассона.

Следует заметить также, что для распределения Пуассона случайной величиной является число отказов *m*, а не время *t.* В связи с этим, операцию получения из распределения Пуассона [100] экспоненциального распределения (2.2) простой подстановкой *m* - 0 трудно признать корректной.

В [93] показано, что замена в распределении Пуассона переменного числа отказов на переменное время возможно, но при этом получают гамма-распределение. Замена переменной осуществлена с использованием преобразования Лапласа. Гамма-распределение может быть получено из рассмотрения суммы случайных величин, моделируемых экспоненциальным распределением. С этим согласуется условие (2.7) и результаты, приведенные на рис. 2.6.

При оценке надежности агрегата, параметры принятого распределения определяют по результатам испытаний большого числа агрегатов, а результаты оценки используют для моделирования надежности отдельного агрегата. Агрегат не может отказать больше одного раза. После его восстановления он будет уже другим агрегатом. В связи с этим выражение (2.3), а, следовательно, и (2.2) не могут быть приняты в качестве математических моделей вероятности отказа и безотказности элементов, изделий и агрегатов.

2.2.2 Процедура построения математической модели надежности агрегата в виде экспоненциального закона на основе определения интенсивности отказов

Другой подход к построению экспоненциальной модели вероятности безотказной работы агрегатов [89, 94] основан на определении интенсивности отказов $\lambda(t)$ как условной плотности вероятности отказа в виде

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \qquad (2.8)$$

Поскольку

$$f(t) = \frac{-dp(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt},$$

то после подстановки в (2.8) и разделения переменных, вероятность безотказной работы определена в виде

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau}. \qquad (2.9)$$

В случае стационарности процесса полагают, что $\lambda(\tau)=\lambda=\text{const}$, и выражение (2.9) преобразуется в (2.2).

Здесь обращает на себя внимание тот факт, что в исходном выражении (2.8) $\lambda(t)$ определена как условная плотность вероятности, а в распределении Пуассона как математическое ожидание числа попаданий точек на единицу протяженности т. Плотность вероятности и математическое ожидание, существенно различные

понятия. Вместе с этим, получен один и тот же результат в виде выражения (2.2).

Статистическая оценка интенсивности отказов λ^* определяется из результатов испытаний как среднее число отказов (математическое ожидание), приходящееся на единицу времени (1час) на интервале времени Δt:

$$\lambda^*(t, \Delta t) = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{\Delta t_{n\Sigma}(t, \Delta t)}$$

где $\Delta n(t, \Delta t)$ - число отказавших изделий на интервале Δt; $\Delta t_n\Sigma(t, \Delta t)$ — общая наработка изделий на интервале Δt.

Совершенно очевидно, что эта оценка λ^* имеет пуассоновский смысл и никак не соответствует оценке, определяемой выражением (2.8).

В ряде работ по надежности [89, 90] и по статистическим методам [91] утверждается, что при экспоненциальном распределении вероятность отказа на участке протяженностью τ зависит только от протяженности участка и не зависит от его положения на оси абсцисс. Такое утверждение не оправданно, поскольку из рис. 2.3 очевидно, что для этого вида моделей, если $\boldsymbol{\tau_1 = \tau_0}$, то $\Delta q_1 \neq \Delta q_2$. Вместе с этим, в работе [94] приведен числовой пример, которым автор делает попытку подтвердить отмеченное свойство экспоненциального распределения. Рассмотрим этот пример.

Показано, что при $\lambda = 0{,}0001$, вероятность отказа на участках от 0 до 10 ч и от 990 до 1000 ч одинакова и равна 0,001. Пример из-за выбранного диапазона неудачен, поскольку во всем рассматриваемом диапазоне времени от 0 до 1000 ч вероятность отказа $q(t)$ меньше 0,1. К тому же в этом рассмотренном диапазоне изменения вероятности отказа, экспоненциальное распределение не существенно расходится с распределением с равномерной плотностью вероятности. При распределении с равномерной плотностью на рассмотренных участках вероятность отказа также равна 0,001.

Если рассмотреть больший диапазон, например до 100 000 ч, то при той же λ= 0,0001 и экспоненциальном распределении вероятность отказа на участке от 0 до 1 000 ч будет 0,0952. На участке от 9 000 до 10 000 ч она составляет 0,0387, а на участке от 99 000 до 100000 ч будет уже 0,474 х 10^{-5}. При этом расхождение в первом случае составит 246 %, а во втором увеличится в 20 тысяч раз.

Утверждение о независимости вероятности отказа, которая от положения на оси абсцисс участка фиксированной длины привнесено в экспоненциальное распределение из условий, где накладывается на систему точек, подчиняющихся распределению Пуассона [90, 91]. Так, авторы полагают, что экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Пуассона при m = 0. Однако, в ограничениях накладываемых на совокупность точек, подчиняющихся распределению Пуассона, на самом деле, предполагается, что «вероятность попадания того или иного числа точек на отрезок m зависит только от длины отрезка, но не зависит от его положения на оси абсцисс». Но там же [90, 91] отмечается, что «точки распределены по оси абсцисс с одинаковой средней плотностью», а никак не экспоненциально. Существует только одно распределение случайной величины, при котором вероятность появления события зависит только от длины отрезка г и не зависит от его положения на оси абсцисс, это распределение с равномерной плотностью вероятности.

Существует еще один аспект, вызывающий сомнение в правомерности использования для оценки надежности условных вероятностей.

3 АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

3.1 Математическая модель вероятности отказа агрегата

В главе 2 показана некорректность построения и неприемлемость использования в качестве математической модели вероятности отказа агрегата -экспоненциального распределения.

В отраслевом стандарте [105], для расчета безотказности функциональных

систем с высоконадежными агрегатами, свойственными авиационной технике, только для упрощения расчетов, рекомендовано использовать распределение с равномерной плотностью вероятности взамен экспоненциального. В связи с этим следует привести высказывание из монографии [95]: «по мнению ряда специалистов, из-за неграмотности разработчиков, государственные стандарты содержали многочисленные ошибки. Для анализа ситуации в 1985 г. была организована рабочая группа по упорядочению системы стандартов по прикладной статистике и другим статистическим методам. Оказалось, что существенная часть стандартов по статистическим методам действительно содержала грубые ошибки. Некоторые из них действуют до сих пор. Затем, с целью исправления положения, был организован Всесоюзный центр по статистическим методам и информатике при МГТУ имени Н.Э.Баумана. В связи с обнаружением грубых ошибок, 24 из 31 государственных стандартов по статистическим методам были отменены в 1986 ÷ 1987 годах».

Рассмотрим процедуру построение математической модели вероятности отказа агрегата. Также как и приверженцы экспоненциальной модели, будем считать поток событий (отказов агрегата) редким и простейшим, т.е. удовлетворяющим условиям ординарности, стационарности и отсутствия последействия, накладываемым на пуассоновский поток.

Напомним, что утверждение о независимости вероятности отказа от положения на оси абсцисс участка фиксированной длины привнесено в экспоненциальное распределение из условий, накладываемых на систему точек, подчиняющихся распределению Пуассона. Так, авторы [90, 91] полагают, что экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Пуассона при $m=0$. Однако, в ограничениях накладываемых на совокупность точек, подчиняющихся распределению Пуассона, на самом деле, предполагается, что «вероятность попадания того или иного числа точек на отрезок τ зависит только от длины отрезка, но не зависит от его положения на оси абсцисс». Но там же отмечается, что «точки распределены по оси абсцисс с одинаковой средней плотностью», а никак не экспоненциально. Существует только одно распределение случайной величины, при котором вероятность появления события

зависит только от длины отрезка τ и не зависит от его положения на оси абсцисс, это распределение с равномерной плотностью вероятности.

В целях определения вероятности первого отказа для потока событий, удовлетворяющего условиям ординарности, стационарности и отсутствия последействия, ужесточим требования к этому потоку. Положим, что события реализуются через равные интервалы времени *T*. Тогда вероятность отказа (появления первого события) при $t \leq T$ выразится как

$$q(t) = \frac{t}{T} . \qquad \textbf{(3.1)}$$

Перейдем вновь к Пуассоновскому потоку событий, зафиксированных на оси *t*. Для такого потока (редкие события) среднее значение *T* — величина обратная λ . Тогда (3.1) примет вид

$$q(t) = \lambda \cdot t . \qquad \textbf{(3.2)}$$

что соответствует распределению с равномерной плотностью.

Следует иметь в виду, что λ в выражении (3.2) понимается как математическое ожидание числа отказов (количества точек, попадающих на интервал) в 1 час.

Таким образом, для построения математической модели вероятности отказа агрегата предлагается использовать распределение с равномерной плотностью вероятности, как наиболее полно отвечающее условиям ординарности, стационарности и отсутствия последействия, наложенных Пуассоном на редкий поток событий.

3.2 Анализ метода решения задачи, расчета надежности систем с общим резервированием

В разделе 2 показана некорректность традиционно используемых методов расчета надежности систем. Причина некорректности заключается в подмене

понятий, допущенной при использовании теоремы умножения вероятностей. Напомним, что в соответствии с этой теоремой для определения вероятности безотказной работы системы из последовательно соединенных агрегатов перемножаются вероятности их безотказной работы. При параллельном соединении вероятность отказа системы находится в виде произведения вероятностей отказов агрегатов.

Теорема умножения вероятностей получена в теории вероятностей применительно к вероятностям дискретных событий. Отмеченная подмена понятий заключается в использовании ее процедур (перемножения вероятностей) применительно к интегральным функциям, а не к дискретным событиям. При этом конечное выражение для расчета надежности сложной системы представляет собой сумму, слагаемые которой являются произведениями интегральных функций вероятностей отказов агрегатов. В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей распределение такой суммы стремится к нормальному при увеличении числа членов суммы. Это хорошо проиллюстрировано рисунками 2.11, 2.12,2.15,2.16,2.17,2.18.

В теории вероятностей для систем случайных величин предлагается аналог теоремы умножения вероятностей для непрерывных случайных. В соответствии с ним определяется плотность вероятности системы как произведение плотностей вероятностей случайных составляющих систему.

Плотность вероятности непрерывная, но определенная в любой точке абсцисс характеристика, поскольку имеет размерность вероятности приходящейся на единицу размерности оси абсцисс. Так плотность вероятности отказа - не что иное как вероятность отказа за 1 час. В любой момент времени t плотность имеет определенное значение и в связи с этим к ней может быть применена теорема умножения вероятностей.

В надежности перемножаются не только вероятности событий (отказов), но и вероятности отсутствия событий (безотказной работы). Плотности вероятности безотказной работы имеют те же числовые значения, что и плотности вероятностей отказов, но противоположны по знаку. В связи с этим при

параллельном и последовательном соединении агрегатов, при четном числе одинаковых агрегатов вероятности отказов и безотказной работы равны, а при нечетном числе агрегатов различаются только по знаку.

Теория вероятностей в отличие от надежности изучает закономерности случайных событий. В связи с этим не все ее теоремы, возможно, использовать в надежности, в частности, когда рассматриваются вероятности отсутствия событий (безотказной работы).

В работе предлагается альтернативный подход к расчету надежности сложных систем, когда задача расчета надежности решается относительно вероятности отказа системы за единицу времени, например, за 1 час полета, как того требуют Нормы летной годности самолетов [17]. Вероятность отказа системы за 1 час налета является дискретным событием. При таком подходе обеспечивается корректность использование процедур теоремы умножения вероятностей.

Рассмотрим альтернативный подход. Для этого положим в (2.30) время t=1 час $(q(t) = \omega\text{-}1 = \omega_1)$, и определим по альтернативной методике вероятность отказа тестовой системы при общем резервировании (раздел 2, рис. 2.10) в виде:

$$Q_{ал.общ}(1) = [1- (1- q(1))^4]^4 = [1- (1- \omega_1)^4]^4 \qquad \textbf{(3.3)}$$

Остановимся подробнее на существе процедуры определения вероятности отказа на произвольном отрезке времени τ. Традиционно вероятность определяется $Q_{тр.общ}(t)$ как приращение интегральной функции вероятности отказа системы на этом отрезке. Для рассматриваемой, в качестве тестовой, системы это приращение функции (2.30) при общем резервировании. Недостатки такого подхода отмечены в разделе 2.

Процедуру альтернативного определения вероятности отказа системы на отрезке τ начнем с того, что примем для математической модели надежности агрегатов функциональных систем, известное распределение с равномерной плотностью вероятности (рис. 3.1), а параметр потока отказов ω постоянным, как это рекомендовано в [105].

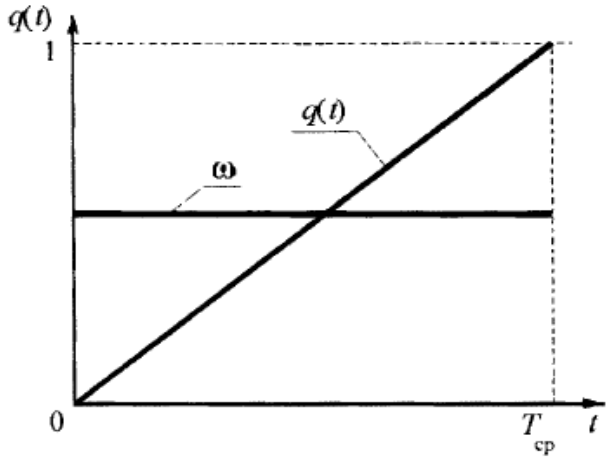


Рисунок 3.1- Зависимость вероятности отказа и параметра потока отказов от времени при распределении с равномерной плотностью

Параметр потока отказов — величина обратная средней наработке на отказ, т. е. имеет место равенство

$$\omega = \frac{1}{Tcp}.$$

Интегральная функция вероятности отказа агрегата при распределении с равномерной плотностью имеет вид

$$q(t) = \omega \cdot t \ . \qquad \textbf{(3.4)}$$

Тогда, положив t = 1, можно утверждать, что вероятность отказа за единицу времени (1 час) численно равна ω, т. е.

$$q(1) = \omega \cdot 1 = \omega^1 = const \qquad \textbf{(3.5)}$$

Заметим, что интегральная функция *q(t)* определяет вероятность реализации отказа агрегата на интервале времени от 0 до *t*, что вносит существенную неясность, с позиции анализа надежности агрегата, никак не

конкретизируя момент реализации отказа. Некоторую дополнительную информацию о моменте отказа агрегата вносит плотность вероятности *f(t)* (дифференциальная функция) как производная от *q(t).* В частности, при распределении с равномерной плотностью вероятности, она указывает на то, что отказ равновозможен в любой момент времени от 0 до *t.*

В отличие от определения вероятности отказа системы, вероятность отказа агрегата на произвольном отрезке, τ возможно, определять как приращение интегральной функции на этом отрезке.

Рассмотрим возможности определения интегральной и дифференциальной функций вероятностей отказа для системы общего резервирования, содержащей 16 агрегатов (рис. 3.2),

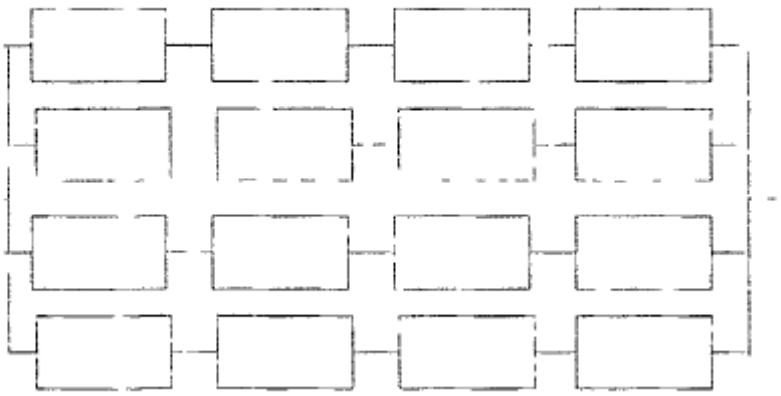


Рисунок 3.2 — Схема системы с общим резервированием

Для простоты положим, что все агрегаты одинаковые и имеют параметры потока отказов ω.

При традиционном подходе к решению задачи расчета надежности интегральная функция вероятности отказа рассматриваемой системы $Q_{тр.общ}(t)$ определится как

$$Q_{тр.общ}(t) = [1- (1- \omega \cdot t)^4]^4. \quad \textbf{(3.6)}$$

Положив $\omega = 10^{-4}$, по выражению (3.6) построим график интегральной функции вероятности отказа (рис. 3.3). Такой график имеет вид *S*— образной кривой нормального *распределения.*

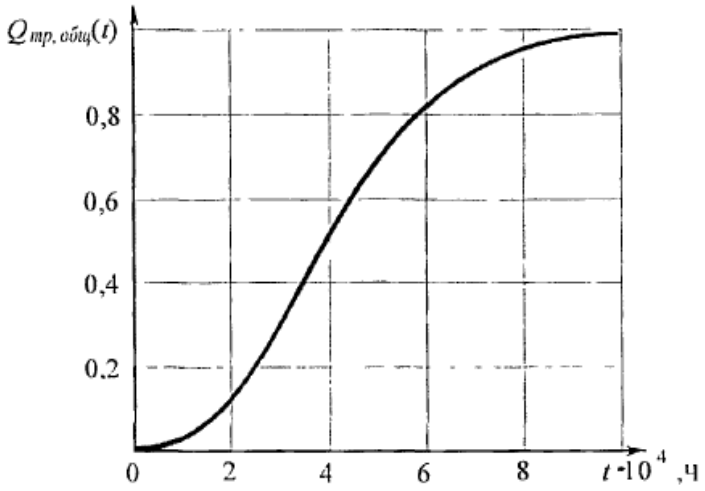


Рисунок 3.3 - Интегральная функция распределения вероятность отказа тестовой системы с общим резервированием

Если далее получить плотность вероятности отказа как производную от (3.6) (дифференциальную функцию), то очевидно, что она имеет вид плотности вероятности нормального распределения (рис. 3.4). Поскольку она определяет и вероятность отказа за 1 час, то наблюдается конкретное противоречие исходным данным.

Во-первых, для агрегатов принято распределение равномерной плотности при $\omega = const$ и вероятность отказа агрегатов за 1 час не зависит от времени. В работах [105, 107] отмечалось, что это несоответствие вызвано неправомерным использованием процедур теоремы умножения вероятностей к интегральным функциям.

Во-вторых, вероятность отказа за 1 час, определенная в форме плотности вероятности нормального распределения дает неоднозначность решения. Одно значение вероятности отказа за 1 час реализуется при двух различных значениях времени (рис. 3.4). Причиной этого, на наш взгляд, является то, что вероятность

отказа системы на произвольном отрезке времени τ традиционно определяют как приращение интегральной функции вероятности отказа системы на этом отрезке. К тому же, при построении интегральной функции вероятности отказа системы, авторы

традиционно не акцентируют внимание на условии возникновения отказа. А ведь рассматриваемая система (рис. 3.2) откажет, когда откажут 4 агрегата, по одному в каждой цепочке. Моменты отказов этих агрегатов никак не определены на интервале времени [0, *t*] их интегральными функциями. В соответствии с условием ординарности, накладываемым на распределение отказов по оси времени, на малом отрезке τ не может реализоваться более 1 отказа. Тем более условие отказа системы не может быть выполнено на малом $\Delta t = 0$ если оно выполняется на интервале [0, *t*].

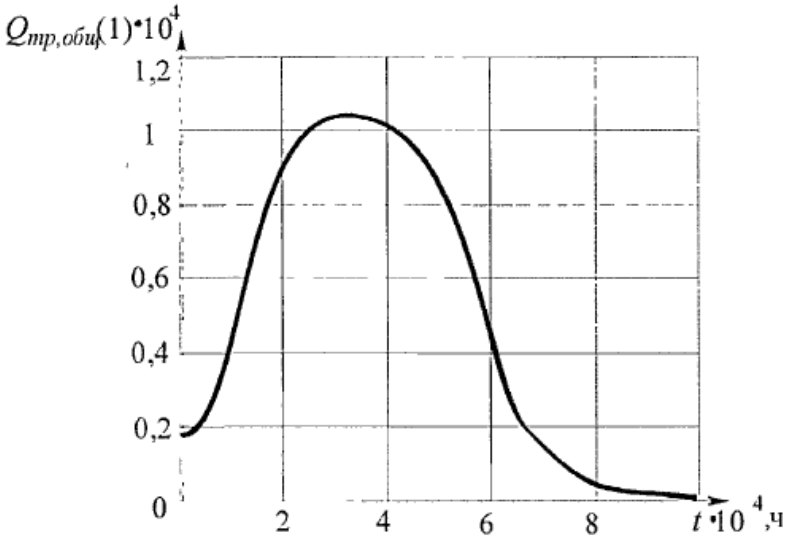


Рисунок 3.4 - Дифференциальная функция вероятности отказа тестовой системы с общим резервированием

С позиций теории вероятностей всё на первый взгляд представляется оправданным. Построена интегральная функция вероятности отказа системы и как ее производная - дифференциальная функция. Они должны полностью характеризовать все свойства безотказности системы. Но при построении интегральной функции неправомерно применена теорема умножения

вероятностей к интегральным функциям вероятностей отказов агрегатов. А при построении дифференциальной функции формально взята производная от интегральной функции. Формально, поскольку проигнорировано условие возникновения отказа системы, а вслед за ним и условие ординарности. Это ставит под сомнение правомерность, как дифференциальной функции отказа системы, так и исходной интегральной функции.

В работах [106, 107] показана возможность решение задачи расчета надежности сложных систем непосредственно относительно вероятности отказа на произвольном отрезке времени τ, принимаемом за единицу времени (например, 1 час налета). Поскольку вероятности отказа агрегатов за единицу времени являются дискретными событиями, то и применение к ним теоремы умножения вероятностей вполне оправданно. Тогда в соответствии с (3.5) и (3.6) вероятность отказа системы за 1 ч по альтернативной методике определится в виде (3.3). Приведем это выражение еще раз

$$Q_{ал.общ}(1) = [1- (1- q(1))^4]^4 = [1- (1- \omega_1)^4]^4$$

При определении значения (3.3) на систему наложено условие, что в течение одного часа в системе с вероятностью $Q_{ал.общ}(1)$ откажут 4 агрегата. Такое же

условие наложено и при построении выражения (3.6) относительно вероятности $Q_{тр.общ}(t)$, но в этом случае оно реализуется и на интервале [0, t]. Одновременная

реализация условий отказа системы на интервале [0, t] и отказа на малом отрезке $\Delta t \rightarrow 0$, реализуемом при построении дифференциальной функции вероятности отказа системы, невозможна. Следовательно, эти условия несовместны, т.е. возможно решение задачи расчета надежности либо на интервале [0, t], либо только на отрезке τ, находящемся внутри этого интервала.

Задачи расчета надежности системы по интегральным функциям на большом отрезке [0, t] и малом $\Delta t, \in [0, t]$ несовместны в соответствии с условием

ординарности. При определении отказа на отрезке [0, t] условие ординарности должно быть выполнено и оно не допускает реализацию отказов на Δt.

При определении вероятности отказа на отрезке τ равном одному часу, на систему накладывается требование отказа агрегатов в течение этого часа. В соответствии с условием ординарности выполнение этого требования маловероятно. Но Нормы летной годности [17] требуют определения вероятности отказа именно за 1 час, хотя и с крайне малой вероятностью. Для функциональной системы, оказывающей влияние на безопасность полетов эта величина должна быть не более 1×10^{-9} [17].

В процессе эксплуатации отрезок времени τ, на котором определяется надежность, может иметь различную протяженность. Системы самолетов имеют 2-3 кратное резервирование и являются системами, работающими с восстановлением. Так, если отказ агрегата имеет открытую для экипажа функцию, то после отказа в полете он заменяется при техническом обслуживании по замечанию экипажа. В этом случае, характерным временем τ для расчета надежности системы, является продолжительность типового полета. Если отказ имеет скрытую для экипажа функцию, то он будет обнаружен только при очередной проверке системы и характерное время τ определится периодичностью проверок.

Поскольку дублирование с восстановлением обеспечивают высокую надежность систем, то катастрофы, вызванные именно отказами систем, нам не известны. Надежность систем, рассчитанная по статистическим материалам авиапредприятия, оценивается вероятностью отказа $10^{-9} – 10^{-16}$ за 1 ч полета.

Если выражение (3.3) умножить на время t

$$Q_{ал.общ}(1) = [1- (1- \omega_1)^4]^4 \cdot t \cdot \qquad \textbf{(3.7)}$$

то функция от t определит зависимость вероятности отказа системы от времени. Но ее смысл существенно отличается от заложенного в выражение (3.6), которое определяет зависимость вероятности отказа от t при условии, что на

интервале [0, *t*] откажут агрегаты, обуславливающие отказ системы. Выражение (3.7) тоже предполагает определение вероятности отказа системы в функции *t*, но при условии, что в течение каждого часа интервала [0, *t*] будет выполняться условие ее отказа. Фактически это произведение вероятности отказа в течение 1 часа на число часов в интервале [0, *t*].

Нетрудно получить выражение вида (3.7) для случая, когда за единицу времени принят не 1 час, а произвольная единица τ.

Наш анализ показал, что в этом случае для каждой τ будет получена своя зависимость вероятности отказа системы от времени, т. е. построено поле таких зависимостей, что противоречит условию однозначности зависимости вероятности отказа от времени.

В соответствии с предлагаемым методом, возможно построение решения относительно вероятности отказа системы в дискретных значениях отказов агрегатов на интервале τ, как этого требует теорема умножения вероятностей, после определения этих дискретных значений. Для этого интервал τ необходимо принять за единицу времени, которая может быть различной, и применительно к ней определить параметр потока отказов в виде

$$\omega_\tau = \tau \cdot \omega.$$

Тогда, в соответствии с (3.5), вероятность отказа агрегата на интервале τ, принятом за единицу времени будет иметь вид

$$q(\tau) = \omega_\tau. \qquad \textbf{(3.8)}$$

и вероятность отказа системы при общем резервировании будет

$$Q_{ал.общ}(1) = [1- (1- q(1)^4]^4 = [1-(1- \omega_\tau)^4]^4. \qquad \textbf{(3.9)}$$

Поскольку $\omega_\tau = \tau \cdot \omega$, выражение (3.9) формально подобно выражению (3.6).

Отличие состоит в понимании, трактовке и использовании результатов расчетов.

Выражение (3.6) традиционно трактуется как интегральная функция вероятности отказа системы, по которой возможно определить текущее по *t* значение вероятности отказа, и вероятность отказа на отрезке τ, как ее приращение на нем, а также вероятность отказа в течение 1 часа в форме дифференциальной функции (рис. 3.4). Выше было показано, что это ошибочные представления.

В соответствии с предлагаемым методом, выражение (3.9) также не трактуется как интегральная функция вероятности отказа системы. Оно определяет вероятности ее отказа на дискретных интервалах времени [0, τ], в том числе и при длительности интервала равной одному часу. В выражении (3.9), при изменении длительности интервала τ, всегда понимается изменение параметра потока отказов ω_τ при единичном значении времени. В (3.9) время всегда равно 1, т.е. выражение не является функцией времени и вследствие этого вероятность отказа на отрезке τ не зависит от его положения на оси времени. В (3.6) параметр потока отказов со принимается постоянным, а изменяется время *t*.

Сходство выражений (3.6) и (3.9) определяет получение одинаковых результатов только при расчете на равных интервалах, имеющих начало совпадающее с началом оси времени. При определении вероятностей отказа системы по традиционному методу на одинаковых отрезках τ, произвольно расположенных на оси *t*, результаты расчетов существенно различны.

Так, рассмотренная в работе система (рис. 3.2) в соответствии с традиционным подходом (3.6) на отрезке τ протяженностью 1000 часов имеет вероятность отказа равную:

-0,014 в диапазоне времени 0 ч ÷ 1000 часов;

- 0,2 в диапазоне времени 4000 ч ÷ 5000 часов;

- 0,0256 в диапазоне времени 7000 ч ÷ 8000 часов;

- 0,0004 в диапазоне времени 9000 ч ÷ 10000 часов.

При альтернативном подходе, в соответствии с (3.9), вероятность отказа при τ=1000 часов равна 0,014 и не зависит от положения отрезка τ на оси времени.

В первом случае выражение (3.6) рассматривалось как интегральная функция вероятности отказа (рис. 3.3) и в соответствии с ней на участке τ=1000 часов в зависимости от его положения на оси *t* получены различные вероятности отказа.

Во втором случае по предлагаемой методике, выражение (3.9) представляет собой вероятность отказа на дискретных отрезках времени τ.

В рассмотренном примере для агрегатов принято распределение с равномерной плотностью вероятности, при котором вероятности их отказов на отрезке τ зависят только от его длины и не зависят от его положения на оси времени. Это свойство пуассоновского потока событий. Несмотря на нелинейность выражения (3.9) и вид рис. 3.3, при альтернативном подходе это свойство осталось присущим и системе.

Следует отдельно остановиться на правомерности традиционной интегральной функции вероятности отказа с позиций стационарности процесса эксплуатации и потоков событий отказов агрегатов. Практикой эксплуатации авиационной техники отечественного и зарубежного производства показано, что, при действующей системе технического обслуживания, потоки отказов агрегатов стационарны, т. е. параметры потоков отказов со не зависят от времени работы системы (от налета часов). При этом момент принятый за начало отсчета времени в выражении (3.6) и на рис. 3.3 является произвольным и может быть выбран любым. Т. е. реализуется не одна функция вида (3.6), принятая за интегральную, а поле таких функций. Любому произвольному моменту времени *t* будут соответствовать вероятности отказа системы в интервале от 0 до 1 в зависимости от момента начала отсчета времени.

Таким образом, интегральная функция вероятности отказа системы теряет смысл как оценка надежности. С точки зрения предлагаемого метода, правомерным является определение вероятностей отказа системы на

определенных отрезках времени τ, значения которых остаются независящими от начала отсчета времени.

3.3 Анализ метода решения задач расчета систем с индивидуальным резервированием и возможности повышения надежности систем

На всех типах магистральных самолетов одноименные функциональные системы выполняют одни и те же функции. Вместе с этим одноименные системы различных Разработчиков, а зачастую и одного Разработчика на разных типах самолетов, имеют отличия в структуре функциональных систем. При одном и том же уровне надежности агрегатов систем, обеспечиваемом современным уровнем развития машиностроения, степень резервирования как индивидуального, так и общего у одноименных систем различных типов самолетов существенно различна. Такое положение связано с отсутствием исследований в области оптимизации структуры систем.

Ранее нами показано, что при традиционном подходе допущена некорректность в решении задачи расчета надежности систем, заключающаяся в использовании интегральных функций вероятностей отказов агрегатов вместо дискретных значений этих отказов [108—110].

При расчете систем с индивидуальным резервированием в традиционном решении задачи надежности допущена некорректность связанная с отсутствием учета различных вариантов развития отказов в системе. Ниже покажем последствия этой некорректности и рассмотрим альтернативное решение, а также возможности общего и индивидуального резервирования в обеспечении надежности систем.

3.3.1 Метод расчета надежности систем с индивидуальным резервированием

Рассматривается система индивидуального резервирования, содержащая n последовательно соединенных блоков каждый из которых включает $\boldsymbol{m} = 2$ параллельно соединенных агрегатов. Структурная схема такой системы приведена на рис. 3.5 [106, 111].

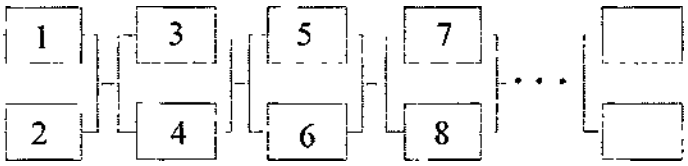


Рисунок 3.5 — Структурная схема системы с индивидуальным резервированием

Будем считать, что, как и в п. 3.2, все агрегаты имеют одинаковые параметры потоков отказов равные ω, а в качестве математической модели вероятности отказа агрегатов принято распределение с равномерной плотности вероятности. Тогда интегральная функция вероятности отказа выразится как (3.4)

$$q(t) = \omega \cdot t.$$

Положив $t = 1$ найдем вероятность отказа на 1 час полета в виде (3.5)

$$q(1) = \omega \cdot 1 = \omega_1 .$$

При традиционном подходе к расчету надежности системы с индивидуальным резервированием вначале определяется вероятность отказа блоков из параллельно включенных агрегатов за 1 час как

$$q^{б}_{mp}(1) = \omega_1^2 .$$

и их вероятность безотказной работы [97, 99] в виде

$$p^{б}_{mp}(1) = 1 - \omega_1^2 .$$

Исходная система, таким образом, заменяется системой последовательно соединенных элементов, вероятности безотказной работы которых равны $p^{б}_{mp}(1)$.

Далее определяется вероятность отказа всей исходной системы с индивидуальным резервированием за 1 час:

$$Q_{тр.инд}(1) = 1 - \prod_{i=1}^{n} p^{б}_{mp}(1) = 1 - (1 - \omega_1^2)^n . \qquad \textbf{(3.10)}$$

Вероятность отказа системы с последовательно соединенными блоками, при расчете по традиционной методике, возрастает по мере увеличения числа блоков *n*.

В действительности это далеко не так. Исходная система (рис. 1) откажет только в том случае если в одном из блоков (любом) откажут оба агрегата. Поскольку вероятности отказов агрегатов в 1 час одинаковы и равны ω, то возможны различные сценарии отказов агрегатов не приводящие к отказу всей системы. Например, откажут агрегаты 1, 3, 6, 7 безразлично в какой последовательности (рис. 3.5). И чем больше *n*, тем меньше вероятность отказа 2-х агрегатов в одном блоке. Определим эту вероятность. Первым может отказать

любой агрегат системы с вероятностью ω_1. Вероятность того, что вторым откажет агрегат, установленный в одном блоке с первым равна

$$q_{ал}^{б}(1) = \frac{1}{2n-1}\,\omega_1.$$

Тогда вероятность отказа рассматриваемой системы при предлагаемом альтернативном подходе к расчету систем с индивидуальным резервированием, по первому сценарию будет

$$Q_{ал.инд}^{ci}(1) = \omega_1 \cdot \frac{1}{2n-1} \cdot \omega_1 = \frac{\omega_1^2}{2n-1}. \qquad \textbf{(3.11)}$$

Выражение (3.11) определяет наибольшую вероятность отказа. Другие возможные сценарии развития отказа в системе (c_i, i=2, 3, ...) определяют существенно меньшие вероятности отказа по выражению

$$Q_{ал.инд}^{ci}(1) = \frac{\omega_1 i}{\prod_{j=2}^{i}(2n-j-1)}. \qquad \textbf{(3.12)}$$

где i - число отказавших агрегатов в системе, приводящих ее к отказу при рассматриваемом сценарии развития отказов.

Здесь важно подчеркнуть тот факт, что при увеличении числа n последовательно соединенных блоков вероятность отказа в соответствии с (3.11) и (3.12) уменьшается, а не возрастает, как это показывает традиционный подход в соответствии с (3.10).

Вероятность отказа системы определится в виде суммы вероятностей отказа по различным сценариям. Но для высоконадежных агрегатов, вероятность отказа по первому сценарию на несколько порядков больше чем по остальным. Поэтому, в практических расчетах допустимо ограничиться рассмотрением первого сценария.

Покажем это на числовом примере. Положим, что система состоит из n=10 последовательно соединенных блоков включающих по $m=2$ параллельно соединенных агрегатов, параметры потоков отказов со которых одинаковы и равны 10^{-4}. Это значение ω свойственно низконадежным агрегатам. Вероятности отказов системы, при различных сценариях отказов, определяемых числом i отказавших агрегатов, приводящие систему к отказу будут:

- при i =2 $Q^{c2}_{ал.инд} = 5{,}26\text{x}10^{-10}$;
- при i =3 $Q^{c3}_{ал.инд} = 2{,}9\text{x}10^{-15}$;
- при i=4 $Q^{c4}_{ал.инд} = 1{,}72\text{x}10^{-20}$;
- при i=5 $Q^{c5}_{ал.инд} = 1{,}07\text{x}10^{-25}$;

Результаты выполненных расчетов с очевидностью показывают, что вероятности отказов при $i \geq 3$ на 5 и более порядков меньше, чем первая вероятность отказа при i =2. Это и дает основание не определять сумму всех подобных членов в расчетах надежности систем.

Из (3.12) следует, что при всех сценариях развития отказов в системе, вероятность ее отказа уменьшается при увеличении n. А характер изменения $Q^{c1}_{ал.\ инд}(1)$ противоположен характеру изменения $Q_{тр.инд}$ (1).

Разработанный метод расчета надежности систем с индивидуальным резервированием позволяет по новому взглянуть на возможности повышения надежности систем за счет изменения подхода к применению сочетания общего и индивидуального резервирования.

3.3.2 Метод повышения надежности систем с использованием индивидуального резервирования

Рассмотрим систему, состоящую из $m=2$ параллельно работающих подсистем содержащих по n =16 последовательно соединенных агрегатов (рис. 3.6).

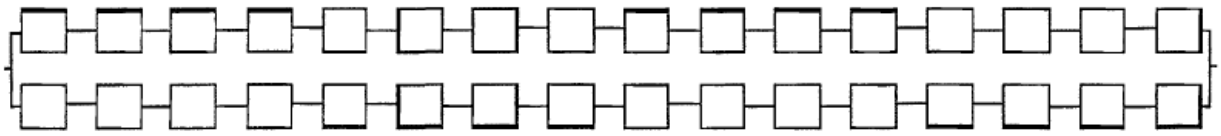


Рисунок 3.6 – Система общего резервирования

Вероятность отказа системы общего резервирования в соответствии с традиционной методикой определится как

$$Q_{тр.инд}\,(1) = [1- (1- \omega_1)^2]^{16}. \qquad \textbf{(3.13)}$$

где параметр потока отказов ω_1 принят одинаковым для всех агрегатов.

Не изменяя числа агрегатов в системе и степень ее резервирования, разделим систему на z частей соединенных последовательно (рис. 3.7)

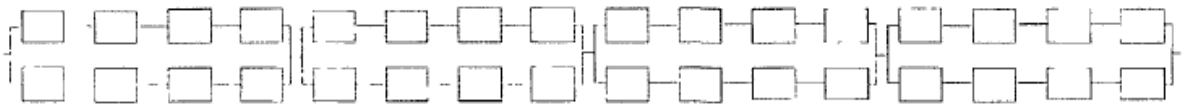


Рисунок 3.7 - Схема исходной системы, разделенная на z = 4 части общего резервирования

Рассчитаем надежность этой системы. Вероятность отказа каждой ветви любой из 4-х частей будет

$$Q^{в}_{тр}(1) = 1- (1- \omega_1)^4. \qquad \textbf{(3.14)}$$

Тогда система, представленная на рис. 3.7 преобразуется к виду, представленному на рис. 3.8, а вероятность ее отказа определится как

$$Q_{тр.инд}\,(1) = 1 - [\,Q^{в}_{тр}(1)]^4 = 1- \{[1- (1-\omega_1)^4]^2\}^4 .$$

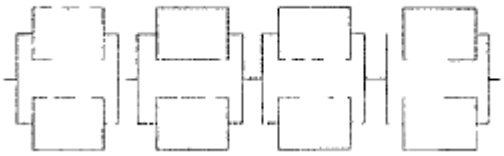


Рисунок 3.8- Схема исходной системы, разделенная на z = 4 частей, преобразованная к схеме индивидуального резервирования

В этой системе (рис. 3.8) вероятность отказа каждого элемента равна $Q^{в}_{тр}(1)$. При альтернативном подходе первая и наибольшая вероятность отказа всей системы (рис. 3.8) реализуется, когда откажут 2 элемента в одном блоке. Она определится как

$$Q_{ал.инд}\,(1) = \frac{\omega_1{}^2}{7}\ .$$

Для сравнения выполнены расчеты вероятностей отказов систем при общем резервировании и после разбиения на z частей с индивидуальным резервированием по традиционному и альтернативному методам. На рис. 3.9-3.12 построены приведены зависимости

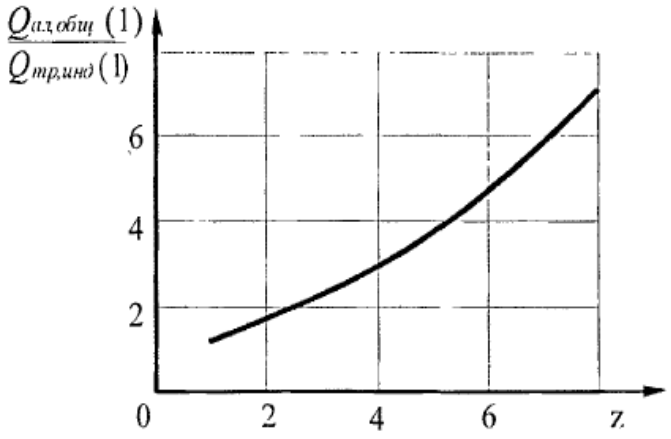


Рисунок 3.9 - Отношение вероятностей отказа

исходной системы общего резервирования
к вероятности отказа системы разделенной
на z частей, рассчитанной по традиционной
методике при $n=16$, $m = 2$ и $\omega=1 \text{x} 10^{-2}$

Из рис. 3.9 следует, что расчеты, выполненные при традиционном подходе, показывают увеличение надежности системы с общим резервированием, при разделении ее на z частей, что переводит ее в систему, содержащую z блоков с индивидуальным резервированием. Но это увеличение надежности несущественное, так при z = 2 надежность возрастает в 1,8 раза, а при z = 4 в 3,5 раза (рис. 3.9)

Перевод системы с общим резервированием к системе с z блоками индивидуального резервирования сопряжен с определенными техническими трудностями, которые мы рассмотрим ниже. Выявленное расчетами по традиционной методике несущественное увеличение надежности не стимулировало разработчиков систем к преодолению упомянутых трудностей.

При альтернативном методе решения той же задачи увеличение надежности с разбиением системы на z частей существенно больше (рис. 3ЛО). При z = 4 оно достигает 100, а при z = 6 уже 340^400 раз [106, 111].

Для системы с общим резервированием при трех параллельно работающих подсистемах эффект еще выше. При традиционном подходе к расчету надежности он составляет при z=4 12-кратное увеличение надежности (рис. 3.11), а при альтернативном подходе (рис. 3.12) надежность возрастает в 2 800 раз и в 9 000 раз при z = 5.

Выявленное при расчетах по альтернативной методике увеличение надежности не может не стимулировать разработчиков к преодолению упомянутых выше трудностей связанных с переходом от систем с общим резервированием к системам имеющим z блоков индивидуального резервирования.

Кратко охарактеризуем эти трудности. В гидравлической системе состоящей из двух одинаковых подсистем разрыв трубопровода, либо корпуса

одного из агрегатов приводит к потере всей гидрожидкости в подсистеме. Вторая подсистема остается работоспособной и обеспечит выполнение всех функций гидросистемы.

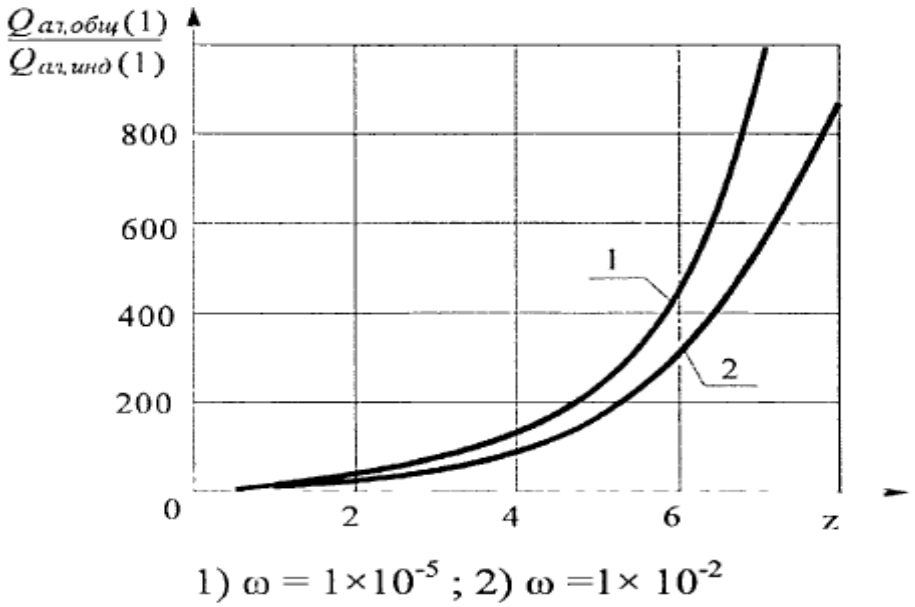


Рисунок 3.10 - Зависимость от z отношения вероятностей отказа исходной системы к вероятности отказа системы разделенной на z частей и рассчитанной по альтернативной методике при n=16, m= 2

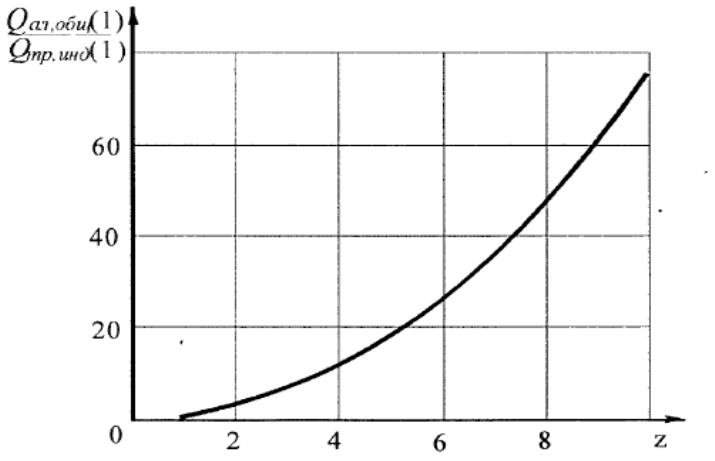


Рисунок 3.11- Зависимость от z отношения вероятностей отказа исходной системы к вероятности отказа системы разделенной на z частей и рассчитанной по традиционной методике при n=20, m=3 и ω=1x10^{-2}

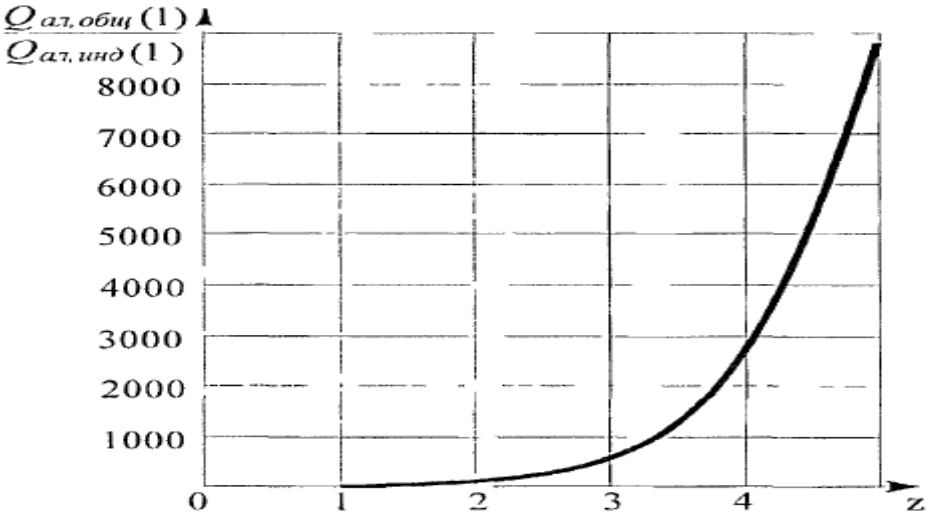


Рисунок 3.12 — Зависимость от z отношения вероятностей отказа исходной системы к вероятности отказа системы, разделенной на z частей и рассчитанной по альтернативной методике при n= 20, m = 3 и $\omega = 1 \times 10^{-2}$

Изменение схемы системы приводящее ее к z блокам индивидуального резервирования лишает ее такой защиты. Подсистемы оказываются объединенными в одну и потеря жидкости в одной ветви z-й части системы приведет к потере жидкости во всей системе, а это недопустимо. Здесь возможно использование ряда блокирующих мер. В каждой ветви z-й части системы устанавливается расходомер, в ее начале запорный кран, а в конце обратный клапан. На определенных участках полета расхода жидкости через систему нет. Появление расхода на этих участках полета говорит от разгерметизации. От расходомера поступает сигнал и перекрывной кран закрывается. С учетом обратного клапана утечка жидкости устраняется. При включении штатных потребителей, требующих определенного расхода жидкости для их работы, перекрывной клапан блокируется.

Для систем электропитания система обеспечения сохранения работоспособности значительно проще. В системе электропитания реализуется два вида отказа: обрыв цепи одной из ветвей z-й части блокировать не следует.

Она перестает работать и всю нагрузку принимает параллельная ветвь этой z-й части. Для блокирования распространения влияния короткого замыкания в одной ветви z-й

части на предыдущие части системы, в начале каждой ветви каждой z-й части необходимо установить автомат защиты сети АЗС (предохранитель).'

Таким образом, показано, что более широкое применение индивидуального резервирования обеспечивает возможность существенного повышения надежности без увеличения числа агрегатов в системе

3.4 Возможности применения марковских моделей в расчетах надежности систем

В работе [93] отказы в системах с резервированием рассматриваются как пуассоновский процесс отказов. Предполагается, что система содержит n одинаковых образцов оборудования, причем в любой момент времени неисправным может быть только один образец. Состояние системы будет определяться числом отказавших образцов. Так, состояние 0 представляет состояние, в котором все n образцов исправны, а состояние n — в котором нет ни одного исправного образца. Интерес представляет вероятность отказа точно $к$ образцов оборудования $(к \leq n)$ к моменту времени t. Приняв, что в начальный момент $t = 0$ система находится в состоянии 0, одновременно допустим, что [93]:

а) вероятность перехода в интервале $[t, t + \Delta t]$ равна $\lambda \Delta t$;

б) вероятность появления более одного отказа в интервале $[t, t + \Delta t]$ равна $0(\Delta t)$;

в) вероятности переходов не зависят от состояния системы.

Фактически эти допущения являются условиями, накладываемыми на систему событий, подчиняющихся распределению Пуассона. Используя эти допущения, составляется матрица переходов P, которая описывает процесс в интервале $[t, t + \Delta t]$. Например, если в момент t система находится в состоянии 0, то условная вероятность остаться в этом состоянии в момент $t + \Delta t$ равна 1

— $\lambda\Delta t$. Вероятность перехода в состояние 1 равна $\lambda\Delta t$; а вероятности перехода в состояние с номером, большим 1, равна $0(\Delta t)$ на основании допущения б).

Аналогично, если система находится в состоянии 1 в момент t, то она останется в этом состоянии в течение интервала $[t, t + \Delta t]$ с вероятностью $1 - \lambda\Delta t$ или перейдет в состояние 2 с вероятностью $\lambda\Delta t$.

Рассматриваемая система не может вернуться в состояние 0, если не выполнялись ремонты отказавших образцов. Учитывая каждое из этих условий, составляется матрица переходов:

$$P = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & 1 & 2 & \dots & n-1 & n \\ \hline 0 & 1 & \lambda & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1-\lambda & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1-\lambda & & 0 & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ n-1 & 0 & 0 & 0 & & 1-\lambda & \lambda \\ n & 0 & 0 & 0 & & 0 & 1 \end{array} .$$

Сумма каждой строки матрицы P равна 1, так как система должна находиться в одном из состояний n.

Такая формулировка приводит к системе линейных однородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Решение этой системы можно найти либо матричными методами, либо непосредственно из дифференциальных уравнений. Для системы, которая должна находиться в состоянии 0 в момент времени $(t + \Delta t)$, необходимо, чтобы она находилась в этом состоянии в момент времени t и оставалась в нем в течение времени Δt.

Таким образом, пребывание в состоянии 0 является сложным событием, состоящим из события первоначального пребывания системы в состоянии 0 и отсутствия переходов из этого состояния. Следует отметить, что элементы столбцов матрицы переходов, соответствующие каждому состоянию, представляют коэффициенты при Δt для вероятностей отсутствия переходов из этих состояний на интервале $[t,\ t + \Delta t]$. Поэтому можно непосредственно записать вероятности пребывания в каждом состоянии:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)\cdot(1-\lambda\Delta t) + 0(\Delta t)\ ,$$

$$P_1\ (t + \Delta t) = \mathrm{P}_0\ (t)\lambda\Delta t + P_1\ (t)(1 - \lambda\Delta t) + 0(\Delta t)\ ,$$

$$P_n(t + At) = P_{n-1}(t)\lambda\Delta t + P_n\,(t) + 0(\Delta t) \qquad \textbf{(3.16)}$$

Представим, например, $P_1\ (t + \Delta t)$ в виде

$$\mathrm{P}_1(t + \Delta t) = P_0(t)\lambda\Delta t + P_1(t) - \mathrm{P1(t)}\lambda\Delta t + 0\Delta t\ .$$

На основании определения производной

$$\mathrm{P}_1(t) = \lim ¿\Delta t \to 0 ❑ \frac{P_1(t+\Delta t) - P_1(t)}{\Delta t}$$

и из условия $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{0(\Delta t)}{\Delta t} = 0$ получим

$$P_1(t) = \lambda P_0 - \lambda P_1(t).$$

Аналогично находим остальные уравнения:

$$P_0{}'(t) + \lambda P_0(t) = 0,$$

$$P_1'(t) - \lambda P_0(t) + \lambda \mathrm{P}_1(t) = 0, \qquad \textbf{(3.17)}$$

$$P_n'(t) - \lambda P_{n-1}(t) = 0.$$

Если предположить, что при $t = 0$ все образцы оборудования исправны, то начальные условия имеют вид

$$P_0'(0) = 0,\ P_1'(0) = 0, ...,\ P_n'(0) = 0.$$

Теперь нужно решить эту систему дифференциальных уравнений, что позволит определить вероятность появления точно k отказов $(k \leq n)$ к моменту времени t. Введем преобразование Лапласа, которое позволяет перейти от системы дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений. Пусть

$$P'(s) = L\{P(t)\} = \int_0^\infty e^{-st} P(t)\, dt\ . \qquad \textbf{(3.18)}$$

$$sP'(s) - P(0) = L\{P'(t)\} = \int_0^\infty e^{-st} P'(t)\, dt. \qquad \textbf{(3.19)}$$

Найдем сначала $P_0(t)$. Применяя преобразование Лапласа к первому уравнению системы, получим

$$\boldsymbol{sP_0' - \lambda P_0(s) = 0 \ \text{ и } \ P_0(s) = \frac{1}{s+\lambda}\ .}$$

Используя обратное преобразование Лапласа, находим

$$\boldsymbol{L^{-1}\{P_0(s)\} = e^{-\lambda t}.}$$

Таким образом, вероятность отсутствия отказов к моменту времени t является экспоненциальной функцией времени. С помощью $Po(t)$ относительно легко найти $P_1(t)$, $P_2(t)$ и т. д. Так,

$$\boldsymbol{P_1'(t) = -\lambda P_1(t) + \lambda e^{-\lambda t}.}$$

После применения преобразования Лапласа это уравнение приобретает следующий вид:

$$P_1(s) + \lambda P_1(s) = \frac{1}{(\lambda + s)}\,. \qquad \textbf{(3.20)}$$

откуда

$$P_1(s) = \frac{\lambda}{(s+\lambda)^2}$$

и

$$P_1(s) = L^{-1}\{P_1(s)\} = \lambda \cdot t \cdot e^{-\lambda t}.$$

Действуя тем же способом, замечаем, что

$$P_k(s) = \frac{\lambda k}{(s+k)^{k+1}}\,, \qquad k = 0,1,2,\ldots,n\text{-}1,$$

откуда

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k\ !} e^{-\lambda t}, \qquad \textbf{(3.21)}$$

что представляет собой выражение вероятности появления точно *к* отказов согласно распределению Пуассона [93].

Распределение получают суммированием этих вероятностей. Поэтому вероятность появления самое большее *k(k<n)* отказов за время *t*

$$P(t,k) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{k} \frac{(\lambda t)'}{i!}\,. \qquad \textbf{(3.22)}$$

Интересно отметить, что пуассоновский процесс приводит непосредственно к другому распределению, известному как *гамма-распределение*. Для распределения Пуассона случайной величиной является число отказов, а для гамма - распределения - время. Функцию плотности

вероятности для гамма-распределения представим в терминах преобразования Лапласа:

$$P_k(t)=\frac{\lambda^k}{(s+\lambda)^k}, \qquad (3.23)$$

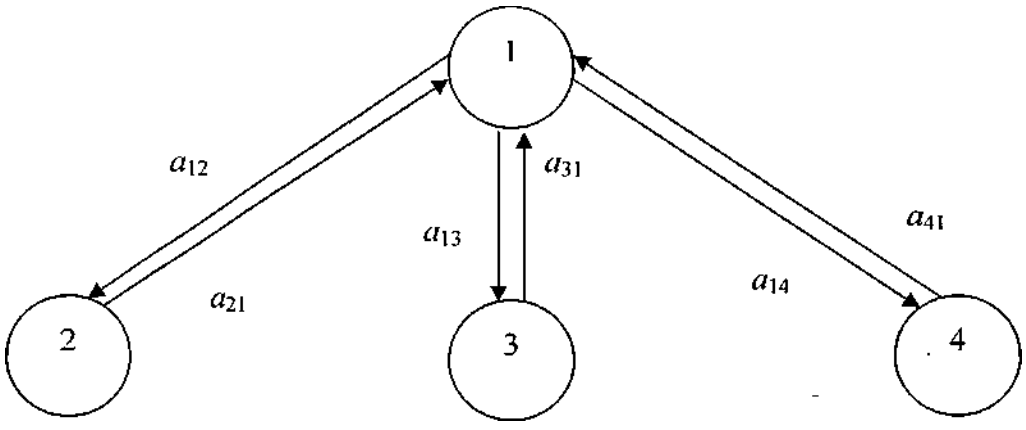
Применив обратное преобразование к $P_k(s)$, получим

Такой же результат получается при рассмотрении суммы независимых случайных величин, имеющих экспоненциальное распределение.

В работе [112] предложен несколько иной подход оценки вероятностей пребывания системы в стационарном процессе эксплуатации в оперативном цикле использования самолета по назначению.

Нетрудно показать, что потоки отказов и восстановлений агрегатов и систем самолетов являются простейшими, т. е. удовлетворяющими условиям ординарности, стационарности и отсутствия последействия. Это дает возможность определять вероятности нахождения систем в состояниях исправности либо функциональных отказов в оперативном цикле использования самолета по назначению.

Рассмотрим в качестве примера размеченный граф состояний и переходов для системы, имеющей три вида функциональных отказов (рис. 3.13).



1 - состояние полета с исправной рассматриваемой системой;
2, 3 и 4 — состояния системы с одним из видов функциональных отказов;

a_{12}, a_{13} и a_{14} — интенсивности переходов системы из исправного состояния в состояние соответствующего функционального отказа; a_{21}, a_{31} и a_{41} — интенсивности переходов системы из состояния функционального отказа в исправное состояние

Рисунок 3.13 - Граф состояний и переходов системы

Интенсивности переходов из исправного состояния в состояния отказов определяются соответствующими параметрами потоков отказов, т. е.

$$a_{i1} = \omega_{i1}.$$

Параметр потока отказов - величина, обратная средней наработке на отказ.

Интенсивности переходов из состояний функциональных отказов в исправное состояние a_{i1} определяются соответствующими интенсивностями восстановления отказов μ_{ii}, т. е.

$$a_{i1} = \mu_{i1}.$$

Интенсивность восстановления — величина, обратная среднему времени устранения i-го вида отказа.

Система дифференциальных уравнений относительно вероятностей нахождения рассматриваемой функциональной системы в состояниях 14 будет

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = a_{21}P_2(t) + a_{31}P_3(t) + a_{41}P_4(t) - (a_{12} + a_{13} + a_{14})P_1; \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = a_{12}P_1(t) - a_{21}P_2(t); \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = a_{13}P_1(t) - a_{31}P_3(t); \\ \dfrac{dP_4(t)}{dt} = a_{14}P_1(t) - a_{41}P_4(t). \end{cases}$$

(3.25)

стационарном процессе эксплуатации система уравнений (3.25) вырождается в систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_{21}P_2+a_{31}P_3+a_{41}P_4-(a_{12}+a_{13}+a_{14})P_1=0; \\ a_{12}P_1-a_{21}P_2=0; \\ a_{13}P_1-a_{31}P_3=0; \\ a_{14}P_1-a_{41}P_4=0. \end{cases}$$

(3.26)

Системы уравнений (3.25) и (3.26) дополняются условием

$$P_1+P_2+P_3+P_4=1. \qquad \textbf{(3.27)}$$

Расчет численных значений вероятностей P_i из системы (3.26) выполняется по стандартным программам на ЭВМ. Они определяют вероятность нахождения системы в исправном состоянии и в состояниях восстановления *i-х* видов отказов. Это вероятности оперативного цикла использования по назначению с учетом только процедур устранения отказов.

Расчет надежности предполагает определение вероятностей нахождения системы в рассматриваемых состояниях в течение одного часа полета. Эти вероятности нормируются в Нормах летной годности в соответствии с тяжестью последствий видов функциональных отказов.

Параметры потока отказов ω_i, определяют среднее число видов отказов системы в течение одного часа, что вполне удовлетворяет требованиям Норм. Среднее время восстановления отказа в зависимости от его вида изменяется в широких пределах от 0,5 ч до 10 ч и более. В соответствии с этим интенсивности восстановлений μ_{i1} также принимают различные значения. С другой стороны, время восстановления отказов никак не влияет на вероятность их реализации в полете. Поэтому представляется возможным в системах вида (3.25) и (3.26) принять среднее время восстановления отказов равным одному часу. Тогда в этом случае в рассматриваемых системах уравнений все $a_{i1}=\mu_{i1}=1$. Оправданность такого решения может быть рассмотрена при анализе

решений для систем вида (3.26). Однако аналитическое решение системы четырех уравнений содержащих 4 неизвестных, крайне громоздко. Результаты решения системы даже с тремя неизвестными трудно обозримы. Поэтому для анализа допустимости предположения $a_{i1} = \mu_{i1} = 1$ в работе рассматриваются результаты решения для простейшей системы, имеющей только два состояния (рис. 3.14).

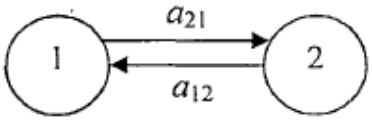


Рисунок 3.14 - Граф состояний простейшей системы

В общем случае $a_{12} = \omega$ и $a_{21} = \mu$. Система алгебраических уравнений относительно вероятностей P_1 и P_2 будет

$$\begin{cases} a_{21}P_2 - a_{12}P_i = 0 \\ a_{12}P_1 - a_{21}P_2 = 0 \end{cases} \qquad \textbf{(3.28)}$$

Из системы (3.28) находим

$$P_1 = \frac{\mu}{\omega + \mu} . \qquad \textbf{(3.29)}$$

Поскольку $\mu = \frac{1}{Tcp.\,ustp}$ выражение (3.29) перепишем в виде

$$P_1 = \frac{1}{\omega T\,cp\_\,ustp. + 1} \qquad \textbf{(3.30)}$$

Уменьшение среднего времени устранения отказов $T_{ср\_устр\_}$ повышает вероятность нахождения системы в исправном состоянии.

Очевидно, что при *Tср.устр.* стремящемся к 0, вероятность P_1 стремится к 1. Это хорошо согласуется с фактическим характером изменения P_1 при уменьшении $T_{ср.устр.}$, но еще не достаточно для доказательства правомерности замены μ_{i1} и a_{i1} на 1.

Нашими исследованиями показана возможность, а отраслевым стандартом для высоконадежных агрегатов систем самолетов рекомендовано использовать распределение равномерной плотности вероятности отказа *q(t)* в виде:

$$q(t) = \omega \cdot t .$$

Нетрудно показать [104], что при таком законе распределения q*(t),*

вероятность отказа за 1 ч полета численно равна со, поскольку $t = 1$.

Приняв в формуле (3.30) $T_{срустр} = 1$ запишем выражение для вероятности отказа на 1 ч в виде

$$q(1) = 1 - \frac{1}{\omega^1 + 1} . \qquad \textbf{(3.31)}$$

Тогда допустимо полагать $a_{i1} = \mu_{i1} = 1$ в диапазоне тех значений соï, при которых из (3.31) следует $q(1) = \omega_1$. Выполненные нами расчеты показали, что условие $q(1) = \omega_1$ в выражении (3.31) выполняется с высокой степенью точности при всех $\omega < 10^{-3}$. При $\omega = 10^{-1}$ расхождение составляет 8 %, а при $\omega = 10^{-2}$ оно не более 1 %.

Таким образом, нами показана возможность использования упрощенного подхода в марковской математической модели при анализе надежности функциональных систем самолетов.

Следует иметь в виду, что хотя метод обеспечивает возможность рассчитывать вероятность безотказного полета и функциональных отказов при

любых значениях $\omega < 10^{-3}$, в соответствии с Нормами летной годности целесообразно рассматривать только несовместные отказы. К несовместным в этом случае относят отказы, вероятность совместной реализации которых в течение часа

полета менее 10^{-9} . Несмотря на это разработанный метод привлекателен своей наглядностью.

Результаты и выводы

1. Показано, что математической моделью вероятности отказа для агрегатов, потоки отказов которых удовлетворяют условиям ординарности, стационарности и отсутствия последействия, является распределение с равномерной плотностью вероятности.
2. Показана некорректность использования теоремы умножения вероятностей, предусматривающей операции умножения вероятностей дискретных событий. Перемножение интегральных функций вероятностей отказов агрегатов не приводит к построению интегральной и дифференциальной функций вероятности отказа системы.
3. В разделе применен метод расчета надежности систем с общим резервированием. Показано, что единственно возможной оценкой надежности сложной системы является решение относительно вероятности ее отказа на произвольном, но дискретном отрезке времени τ. Причем вероятность отказа системы, как и составляющих ее агрегатов, зависит только от протяженности отрезка τ и не зависит от его положения на оси времени.
4. Показано, что традиционно применяемый метод расчета систем с индивидуальным (раздельным) резервированием, не учитывает возможных путей (сценариев) развития отказов в системе и неадекватно определяет их надежность.
5. Показано, что традиционно применяемый метод расчета систем, не учитывающий различных сценариев развития отказов в системе, может быть

использован только для расчета систем с единственно возможным сценарием развития отказа в системе.

6. Применен метод расчета надежности систем с индивидуальным резервированием. Показано, что индивидуальное резервирование приводит к повышению надежности систем и недостаточно используется в технике.

7. Показано, что для обеспечения сходимости расчетных значений надежности агрегатов и систем со значениями, определяемыми эксплуатационной статистикой, необходимо испытания агрегатов проводить по программам соответствующим режимам их технической эксплуатации и технического обслуживания.

Заключение

В результате выполненных исследований впервые получены следующие научно значимые результаты.

1. В результате проведенного анализа показано, что экспоненциальное распределение вероятности случайной величины не может быть использовано в качестве математической модели надежности агрегатов, поскольку оно определяет вероятность отказа за единицу времени работы агрегата как убывающую функцию.

Это противоречит как опытным данным, так и представлениям о том, что в процессе работы развитие деградационных процессов увеличивает вероятность отказа за единицу времени.

Показано, что процедуры получения экспоненциального распределения для оценки надежности некорректны. Использование условных вероятностей и условных плотностей вероятности для одной случайной величины приводит к некорректности получения экспоненциальной модели надежности агрегата из представления интенсивности отказов в виде мгновенной условной плотности вероятности.

2. Показано, что решение задачи расчета надежности функциональных систем с использованием интегральных функций распределения вероятностей отказов агрегатов неправомерно, так как теорема умножения вероятностей, применяемая в решении, предусматривает выполнение операций над вероятностями дискретных событий, но не интегральных функций. Зависимость вероятности отказа системы за единицу времени (1 час налета), получаемая из решения с использованием интегральных функций распределения вероятностей отказа агрегатов, не соответствует опытным данным и не имеет однозначности решения.

3. Установлено, что при стационарном потоке отказов в качестве математической модели расчета надежности для агрегатов сложных функциональных систем самолетов ГА необходимо использовать распределение равномерной плотности.

4. Проработан метод решения задач оценки надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации, при котором вероятность отказа либо безотказной работы определяется непосредственно за произвольную единицу времени. При этом в решении используются вероятности отказов агрегатов также за произвольную единицу времени, являющиеся дискретными величинами, что обеспечивает правомерность использования операций, предусмотренных теоремой умножения вероятностей.

5. Установлено, что решение задачи оценки надежности сложных функциональных систем с использованием дискретных значений вероятностей отказов агрегатов, возможно при прямом применении теоремы умножения вероятностей, реализуемом при традиционном подходе, только для систем с однозначным процессом (сценарием) развития отказа.

6. Для систем с индивидуальным резервированием проработан альтернативный подход к расчету надежности, учитывающий неоднозначность сценариев развития отказов в системе.

Анализ метода расчета обеспечивает возможность оценки надежности сложных функциональных систем как при проектировании, так и в процессе эксплуатации. Показано, что используемые при проектировании оценки надежности агрегатов систем, получаемые при тестированных планах испытаний, не реализуются в эксплуатации, поскольку планы испытаний существенно отличаются от условий, определяемых режимами технического обслуживания при эксплуатации. Рекомендовано испытания агрегатов выполнять по планам, согласованным с режимами технического обслуживания.

Список используемой литературы

1. АП-26. Авиационные правила. Нормы летной годности. - М.: МАК, 1989-196 с.

2. Техническое руководство по летной годности. Док. 0151. ИКАО: 2-е издание.-М.: 1987.-183 с.

3. Руководство по типовым правилам национального регулирования производства полетов и сохранению летной годности воздушных судов. Док. 9388.ИКАО: Повторное издание. 1993. - 165 с.

4. Руководство по процедурам эксплуатационной инспекции, сертификации и постоянного надзора. Док. 8335-AN/879. ИКАО: Издание 42. 1995. - 150 с.

5. Летная годность воздушных судов. Приложение 8 к Конвенции о гражданской авиации. ИКАО: 1983. — 204 с.

6. Руководство по сохранению летной годности воздушных судов. Док. 9642-AN/941. ИКАО: 1995.-192 с.

7. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-93). — М: Воздушный транспорт, 1994. -250 с.

8. Дзиркал, Э. В. Выбор и оценка показателей надежности сложных изделий/ Э.В. Дзиркал. - М: Знание, 1974, 48 с.

9. Руководство для конструкторов и эксплуатантов по разработке и сертификации программ технического обслуживания и ремонта функциональных систем ВС (РДКЭ). - М: ЛИИ им. Громова, 1993. 123 с.

10. Положение о порядке создания авиационной техники и технологии двойного назначения, экспортных вариантов военной авиационной техники и

оборудование для нее с использованием инвестиций. Утв. Постановлением Правительства РФ от 09.09.84г. №189.

11. Временное положение об организации и проведении работ по установлению ресурсов и сроков службы гражданской авиационной техники. - М.: ФСВТ, 1998 г.

12. ГОСТ 28056-89. Документация эксплуатационная и ремонтная на авиационную технику. Построение, изложение, оформление и содержание программы технического обслуживания ремонта. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 52 с.

13. ГОСТ 18675-79. Документация эксплуатационная и ремонтная на авиационную технику и покупные изделия для нее. - М.: Издательство стандартов, 1985.-36 с.

14. Конвенция о международной гражданской авиации. Чикаго. 1944 г. - 93с.

15. Гипич, Г. Н. Обоснование и разработка концепции поддержания летной годности гражданских воздушных судов при эксплуатации: диссертация канд. техн. наук: 05.22.14:-М.гМГТУ ГА, 2001. 180 с.

16. Гипич, Г. Н. Некоторые вопросы современного состояния развития авиационной деятельности в России/ Г. Н. Гипич, Ю. М. Чинючин// Научный вестник МГТУ ГА № 75(9). -М.: 2004. - С. 5-Ю.

17. АП-26. Авиационные правила. Нормы летной годности. - М.: МАК, 1994. -112 с.

18. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - М.: Стандартиздат, 2002. — 32 с.

19. Сакач, Р.В. Безопасность полетов: Учебник для вузов/ Р. В. Сакач, В.Н. Голего, М.Ф. Давиденко - М.: Транспорт, 1989, - 239 с.

20. ФАП-145. Федеральные авиационные правила. Организация по техническому обслуживанию и ремонту авиационной техники. Рег. №1871 Минюста РФ от 13.08.99. - М.: МАК, 1999. - 37 с.

21. ГОСТ В20436-88. Изделия авиационной техники. Общие требования

к комплексным программам обеспечения безопасности полетов, надежности, контролепригодности и эксплуатационной технологичности. — М.: Издательство стандартов, 1988. - 26 с.

22. ФАП-145Р. Организации по ремонту авиационной техники. Требования и сертификация. Утв. ФАС России 31.03.97. № 60. . - М.: МАК, 1999. - 29 с.

34. ОСТ 54 30054-88. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Регламент технического обслуживания самолета (вертолета). -М: Издательство стандартов, 1988. — 64 с.

35. Методические рекомендации по разработке и содержанию «Руководства по деятельности организаций по техническому обслуживанию и ремонту ВС». Утв. ОТЭРАТ ДВТ 30.03.94 г. № 25.1.5-11. - М.: 1995. - 29 с.

36. Сертифицированные требования к Российским внешним линейным станциям технического обслуживания ВС. Утв. ДВТ 01.12.94 г. № ДВ-6.1-103.

37. Общие требования к содержанию, порядку заключения и организационному обеспечению договоров на техническое обслуживание ВС. Утв. ДВТ 17.09.93 г. №ДВ-1.50-51.-М.: 1995.-18 с.

38. Требования к метрологическому обеспечению технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Утв. ДВТ 06.03.96 г. № ДВ-6.8-21. - М.: 1998. - 19с.

39. Руководство по оценке соответствия нормативным требованиям подразделений, осуществляющих сбор, обработку и анализ полетной информации авиапредприятий РФ. Утв. ФСВТ России 17.08.99 г. № 33. - М.: 2000. - 41 с.

40. О поддержании летной годности и переоснащении парка ВС авиакомпаний России. Постановление Коллегии ВАС России от 23.03.98 г. — 11с.

41. Гипич, С. Н. Современное состояние проблемы поддержания летной годности ВС/ С.Н. Гипич// Инженерно-авиационный вестник № 5 (23). - М.: Издание УПЛГ ГВС ФСВТ России, 1999. - С.4-15.

42. Анализ надежности авиационной техники в авиакомпании «Красноярские авиалинии» за 2005 год, - Красноярск, 2006. - 36 с.

43. Анализ инженерно-авиационного обеспечения безопасности полетов авиапредприятиях Красноярского МТУ ВТ МТ РФ за 2005 год, - Красноярск, 2006. -24 с.

44. Анализ инженерно-авиационного обеспечения полетов в авиапредприятиях Красноярского МТУ ВТ МТ РФ за первое полугодие 2006 года,—Красноярск, 2006. — 20 с.

45. Анализ безопасности полетов в гражданской авиации Красноярского МТУ ВТ МТ РФ за первое полугодие 2006 года, - Красноярск 2006. -28 с.

46. Анализ влияния надежности авиационной техники на безопасности полетов за 2005 год, Минтранс России. - М.: 2006. - 102 с.

47. Анализ влияния надежности авиационной техники на безопасности полетов за 2005 год. (Приложение). Минтранс России. - М.: 2006. - 86 с.

48. Оценка влияния надежности авиационной техники на безопасность полетов за 1 полугодие 2005 года, Минтранс России. — М.: 2005. — 62 с.

49. Оценка влияния надежности авиационной техники на безопасность полетов за 1 полугодие 2006 года, Минтранс России. — М.: 2006. — 50 с.

50. Анализ надежности самолетов Ту-154М и Б за 2006 год, Красноярск, а/к «Красноярские авиалинии», 2007. - 32 с.

51. Методика автоматизированного контроля, анализа и подготовки решений по управлению уровнем надежности агрегатов и комплектующих изделий самолета типа Ту-154, эксплуатируемых по техническому состоянию. Утверждена Главным конструктором А. С. Шенгардт, г. Москва, 2001. - 82 с.

52. «О совершенствовании системы сертификации и порядка расследования авиационных происшествий в гражданской авиации РФ», Постановление правительства РФ от 23.04.94 г. № 367.-8 с.

53. Адлер, Ю. П. Управление качеством: статистический подход/ Ю.П. Адлер. -М.: Знание. 1979.-49 с.

55. Чинючин, Ю. М. Принципы построения новой системы нормативно-технической документации по технической эксплуатации ЛА/ Ю.М. Чинючин, Н.Н.Смирнов. - М.: МГТУ ГА, 1998. - 24 с.

56. Венцель, Е. С. Теория вероятностей. Государственное изд. Ф-М. литературы — М.: 1962, - 563 с.

57. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. — М.: Наука, 1965. —524 с.

58.Венцель, Е. С. Теория Вероятностей и ее инженерные приложения/ Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. - М.: Наука, 1988. - 476 с.

59. Александровская, Л. Н., Аронов, И. З. и др. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем/ Л.Н. Александровская, И.З. Аронов. - М.: Логос, 2001. - 254 с.

60. Бойко, О. Г. Направление решения задачи обеспечения исправности функциональных систем самолетов эксплуатантами/ О.Г.Бойко// Вестник СибГАУ. Сб. науч. тр.: СибГАУ.-Красноярск, 2009. - Вып. №2(23). - С. 171-173.

61. Бойко, О.Г. Анализ традиционного и разработка альтернативного методологического подхода к расчету надежности сложных систем/ О.Г. Бойко// Наука и технологии. Итоги диссертационных исследований. Том 1. Избранные труды Российской школы. -М.:РАН, 2009. - С. 326-336.

62. Бойко, О.Г. Метод расчета надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации по статистическим материалам эксплуатантов/ Л.Г. Шаймарданов., А.Г. Зосимов, О.Г. Бойко // Вестник СибГАУ. Сб. науч. тр.: СибГАУ. - Красноярск, 2007. - Вып. № 4(17). - С. 118-119.

63. Бойко, О.Г. Математические модели и методы расчета надежности сложных систем/ О.Г. Бойко, Л.Г. Шаймарданов// Вопросы современной науки и практики. Журнал университета им. В.И. Вернадского. Ун-т им. Вернадского.-Тамбов, 2009. -Вып. №22. - С. 64-72.

64. ОСТ 1 00132-84. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов. - 92 с.

65. Бойко, О.Г. Надежность функциональных систем самолетов

гражданской авиации: моногр. Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. - М.:РАН. 2009. - 119 с.

66. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Термины и определения. - 36 с.

67. ГОСТ 27.504-87. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по цензурируемым выборкам. - 22 с.

68. ГОСТ 27.503-87. Надежность в технике. Системы сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности. - 42 с.

69. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений/ Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Баровский. — М.: Наука, 1969.-511 с.

70. Бойко, О. Г. Элементы риск-анализа и безопасность полетов/ Л.Г. Шаймарданов., О.Г. Бойко // Вестник СибГАУ. Сб. науч. тр.: СибГАУ. - Красноярск, 2009. -Вып. № 3(24). - С. 86-89.

71. Руководство по сохранению летной годности. ДОК 9642-AN/941. Изд. Международной организации гражданской авиации (ИКАО), 1995. - 182 с.

72. Шульц, В.В. Теория надежности машин/ В.В. Шульц. - Л.: Ленингр. инж. -строит, инст., 1983. - 75 с.

73. Хэнли, Э. Надежность технических систем и оценка риска./ Э. Хэнли, Х. Кумамото. — М.: Машиностроение, 1984. - 528 с.

74. Одиноков, М.Ю. Надежность технических систем (основы теории)/ М.Ю. Одиноков. - Казань: Казанск. авиац. ин-т, 1988. - 88 с.

75. Барзилович, Е.Ю. Вопросы математической теории надежности/ Е.Ю. Барзилович и др. - М.: Радио и связь, 1983. - 376 с.

76. Зайцев, А.М. Обеспечение надежной работы деталей авиационных двигателей/ А.М. Зайцев. - М.: Транспорт, 1971. - 196 с.