

*На правах рукописи*



Виноградов Владимир Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
НАДЁЖНОСТИ ОБЩЕСУДОВЫХ И  
ОБЩЕКОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ  
ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Специальность 05.08.03 – «Проектирование и конструкции судов»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2013

Работа выполнена на кафедре «Кораблестроение и авиационная техника»  
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Рудницкий Вадим Игнатьевич**

**Официальные оппоненты:** **Федосенко Юрий Семёнович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФБОУ ВПО «Волжская государственная  
академия водного транспорта»,  
заведующий кафедрой

**Хрунков Сергей Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Нижегородский  
государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»,  
декан

**Ведущая организация:** **ОАО Конструкторское бюро «Вымпел»,**  
Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 18 декабря 2013 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.165.08 в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24., ауд. 1258.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Автореферат разослан            ноября 2013 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Грамузов Евгений Михайлович

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Согласно «Морской доктрине Российской Федерации на период до 2020 года», утверждённой президентом Российской Федерации приказом 1387 от 27 июля 2001 года, одними из принципов национальной морской политики являются:

- обладание необходимым военно-морским потенциалом и его эффективное использование в случае необходимости для силовой поддержки морской деятельности государства;

- поддержание российского флота в готовности к решению стоящих перед ним задач, а также мобилизационной готовности торгового, рыбопромыслового, научно-исследовательского и других специализированных флотов.

Из «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу», утверждённой приказом Минпромэнерго России от 6 сентября 2007 года №354 следует, что «... состояние основных фондов, особенно их активной части, не соответствует современным требованиям по ... , надежности, ...». В документе также говорится о том, что годовой объем выпуска продукции российского судостроения к 2015 году должен быть увеличен более чем в 2,2 раза, к 2020 году – в 3-4 раза.

В постановлении Правительства Российской Федерации от 5 декабря 2001 г. №848 о Федеральная Целевая Программа «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» говорится: «Приоритетной целью настоящей Программы является также повышение комплексной безопасности и устойчивости транспортной системы. Достижение этой цели возможно при решении следующих задач: ... обеспечение надежности и безопасности функционирования морского транспорта ...». Согласно этому документу на морском транспорте пополнение морского транспортного флота к 2015 году должно составить 7930,7 тыс. дедейт-тонн.

В вышеуказанных документах, а так же в Государственной программе Российской Федерации "Развитие судостроения на 2013 - 2030 годы", раскрываются планы правительства Российской Федерации, направленные на увеличение объёмов строительства судов и кораблей, повышение их надёжности и эффективности.

Характеристики надёжности судов и кораблей в большой степени зависят от надёжности общесудовых и общекорабельных систем, поскольку последними обеспечивается живучесть судна/корабля, то есть безопасность его плавания, необходимые условия обитаемости, нормальная эксплуатация и выполнение задач, связанных с его назначением. Эти обстоятельства делают обеспечение надёжности общесудовых и общекорабельных систем крайне актуальной задачей, так как возникающие в них отказы в некоторых случаях ставят под угрозу выполнение боевой задачи, жизнь и здоровье пассажиров и членов экипажа, сохранность перевозимых грузов и самого судна/корабля и т.д.

Решающую роль в развитии методов анализа надёжности восстанавливаемых систем положило развитие теории массового обслуживания А.Я. Хинчиным, Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко, А.Д. Соловьёвым. Р. Барлоу и Ф. Прошан разработали концепцию монотонных структур и их вероятностного анализа. Ю.К. Беляев, предложил использование метода Монте-Карло для общего случая систем. Д.К. Ллойд и М. Липов решали задачу оценки доверительных границ

для показателей надёжности систем, основанной на результатах испытаний входящих в неё элементов. Решением важнейшей для морской практики проблемы - обеспечением надёжности подводных кораблей - занимался И.А. Рябинин, сумевший создать на основе математического аппарата логико-вероятностного исчисления теорию надёжности и безопасности структурно-сложных систем. Проблемами надёжности сложных судовых систем занимались В.А. Усачёв, И.П. Падерно, а также такие специалисты в области подводного кораблестроения, как Л.Ю. Худяков, В.М. Букалов.

Надёжность общесудовых и общекорабельных систем закладывается на этапе проектирования. Известные методы обеспечения надёжности при проектировании разрабатывались в тот период времени, когда электронно-вычислительная техника и информационные технологии были на существенно более низком уровне развития. Их использование затруднительно для обеспечения надёжности сложных систем с большим количеством элементов. Сегодня, когда объекты обеспечения надёжности ещё более усложнились, а при проектировании широко используется производительная вычислительная техника, назрела необходимость разработки способов обеспечения надёжности, использующих возможности современной вычислительной техники и новые информационные технологии.

Эти обстоятельства делают **целью диссертационной работы** обеспечение надёжности общесудовых и общекорабельных систем при проектировании.

В соответствии со сформулированной целью были поставлены и решены следующие **задачи**:

- разработать методику оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем на этапе проектирования, способной дать обоснование выбору схемно-технических решений и технических средств общесудовых и общекорабельных систем при проектировании и способы её реализации;

- разработать методику определения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем при проектировании, обеспечивающую готовность к использованию общесудовых и общекорабельных систем и их оборудования в заданный период времени эксплуатации.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- предложено последовательное применение общего логико-вероятностного метода и аппарата теории марковских случайных процессов типа гибели и размножения для оценки на этапе проектирования надёжности общесудовых и общекорабельных систем, для которых характерен отказ не только по причине нарушения внутреннего функционирования, но и вследствие изменения требований к системе извне;

- разработан метод определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем для формирования их оптимальных запасов в целях обеспечения готовности к использованию общесудовых и общекорабельных систем и снижения издержек;

- разработана архитектура программного комплекса для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем и расчёта потребного количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем в рассматриваемый период времени при проектировании.

### **Практическая значимость полученных результатов:**

- применение разработанной методики оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем при проектировании повышает уровень обоснованности показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем и реализуемых в них схемно-технических решений;

- применение методики определения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем позволяет определять при проектировании оптимальные запасы сменно-запасных частей и оборудования, что обеспечивает готовность к использованию общесудовых и общекорабельных систем, снижение неликвидов и затрат на хранение их сменно-запасных частей и запасного оборудования;

- использование комплекса программных средств для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем и расчёта требуемого количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем в заданный период времени позволяет автоматизировать расчёт показателей надёжности и расчёт требуемого количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем.

### **Предметом защиты являются:**

- предложенное последовательное применение общего логико-вероятностного метода и аппарата теории марковских случайных процессов типа гибели и размножения для оценки на этапе проектирования надёжности общесудовых и общекорабельных систем, для которых характерен отказ не только по причине нарушения внутреннего функционирования, но и вследствие изменения требований к системе извне;

- метод определения требуемого количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем для формирования их оптимальных запасов в целях обеспечения готовности к использованию общесудовых и общекорабельных систем и минимизации неликвидов и затрат на хранение их сменно-запасных частей и запасного оборудования;

- архитектура программного комплекса для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем и расчёта требуемого количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем в рассматриваемый период времени при проектировании;

- методика оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем при проектировании;

- методика определения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем на заданный период времени.

**Достоверность** полученных результатов подтверждена статистическими данными по эксплуатации кораблей проектов 670, 940.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных форумах:

- IX, XI, XII международные молодёжные научно-технические конференции «Будущее технической науки – 2010<sup>1</sup> (2012, 2013)», Россия, Нижний

---

<sup>1</sup> Доклад удостоен диплома II степени.

Новгород, 2010, 2012, 2013гг;

- Международная научно-практическая конференция «Стратегия антикризисного управления экономическим развитием Российской Федерации» (МК-37-9), Россия, г. Пенза, 2009г.;

- IX молодёжная научно-техническая конференция «Взгляд в будущее – 2011», Россия, Санкт-Петербург, 2011г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 10 работ [1-10], в том числе две статьи [1, 2] в журналах, представленных в Перечне рецензируемых научных журналов<sup>2</sup> Высшей аттестационной комиссии, и 2 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ в Реестре программ для ЭВМ [3, 4], выданные Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

### **Структура и объём диссертации**

Работа состоит из введения, четырёх глав, основных результатов и выводов; содержит 136 страниц основного текста, включая список принятых сокращений; имеет 6 приложений на 12 листах; список использованной литературы включает в себя 152 наименования источников.

## **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность обеспечения надёжности общесудовых и общекорабельных систем, ставятся цели и задачи работы, приведены общие характеристики работы, приводятся выносимые на защиту основные результаты работы.

**В первой главе** диссертации проводится обзор методов оценки надёжности применительно к общесудовым и общекорабельным системам, описывается разработанная методика оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем на этапе проектирования, рассматривается применение разработанной методики для оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем (дифферентной, системы объёмного пожаротушения и др.).

Рассматриваются условия для создания моделей надёжности применительно к общесудовым и общекорабельным системам. Приводятся аргументы, согласно которым создание моделей надёжности не имеет альтернативы при решении стоящих перед проектировщиком общесудовых и общекорабельных систем задач в части оценки надёжности при сравнении и выборе проектных и конструкторских решений.

Обосновывается использование расчётных методов для определения значений показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем.

Проводится анализ состава общесудовых и общекорабельных систем. Их элементы представляются следующими тремя категориями:

- основное оборудование;
- трубопроводы и шланги;
- арматура, распределительные устройства.

---

<sup>2</sup> Позиции 168, 1301 Перечня российских рецензируемых научных журналов ([http://vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/2013/09/perechen\\_zhumalov.rtf](http://vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/2013/09/perechen_zhumalov.rtf)).

Определяется номенклатура и выполняется систематизация показателей надёжности каждой из категорий элементов.

Рассматриваются основные преимущества и недостатки детерминистского и вероятностного подходов к оценке надёжности. Делаются выводы о целесообразности использования в практических целях для оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем расчёта численных характеристик их надёжности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости) вероятностными методами.

Основываясь на опыте оценки надёжности, приведённом в различных работах, и оценке современных технических возможностей формулируются предпосылки для создания методик оценки системной надёжности проектируемых общесудовых и общекорабельных систем, обеспечивающих её выполнение с необходимой полнотой, малыми затратами времени и труда.

Определяется номенклатура показателей надёжности, при помощи которых возможно с достаточной степенью полноты определить надёжность большого количества видов общесудовых и общекорабельных систем. Этими показателями являются показатели безотказности и ремонтпригодности: вероятность безотказной работы  $P(t_{б.р.})$  при наработке  $t_{б.р.}$ , средняя наработка до отказа  $T_{ср.}$ , средняя наработка на отказ  $T_0$ , среднее время восстановления  $T_в$ , коэффициент готовности  $K_г$ , коэффициент технического использования  $K_{т.и.}$ , коэффициент сохранения эффективности  $K_{эф.}$ , вероятность восстановления  $P(t_в)$  за время  $t_в$ , гамма-процентное время восстановления  $T_{в\gamma}$ , средняя трудоёмкость восстановления  $G_в$ , среднее время восстановления составной части  $T_{в.с.ч.}$ , коэффициент готовности в режиме ожидания применения  $K_{г.ож.}$ , вероятность безотказного ожидания применения по назначению  $P(t_{ож.})$  при времени ожидания  $t_{ож.}$ ; показатели долговечности: гамма-процентный  $T_{сл\gamma к.р.}$  и средний  $T_{сл.ср.к.р.}$  сроки службы до капитального (среднего, базового, докового) ремонта, до списания  $T_{сл\gamma сп.}$ , гамма-процентный  $T_{р\gamma к.р.}$  и средний  $T_{р.ср.к.р.}$  ресурс до капитального (среднего, базового, докового) ремонта; показатели сохраняемости для периода консервации судна или корабля: средний срок сохраняемости  $T_{с.ср.}$ , вероятность безотказного хранения  $P(t_{хр.})$  в течение срока  $t_{хр.}$ . Приводятся результаты выполненной классификации общесудовых и общекорабельных систем судов и кораблей проектов МФ БМРТ, МУРС, 670, 940 и др. в соответствии с критериями, определяющими их функционирование с позиции надёжности, а также номенклатура показателей их надёжности. Использование результатов классификации упрощает процедуру выбора показателей надёжности для вновь разрабатываемых систем.

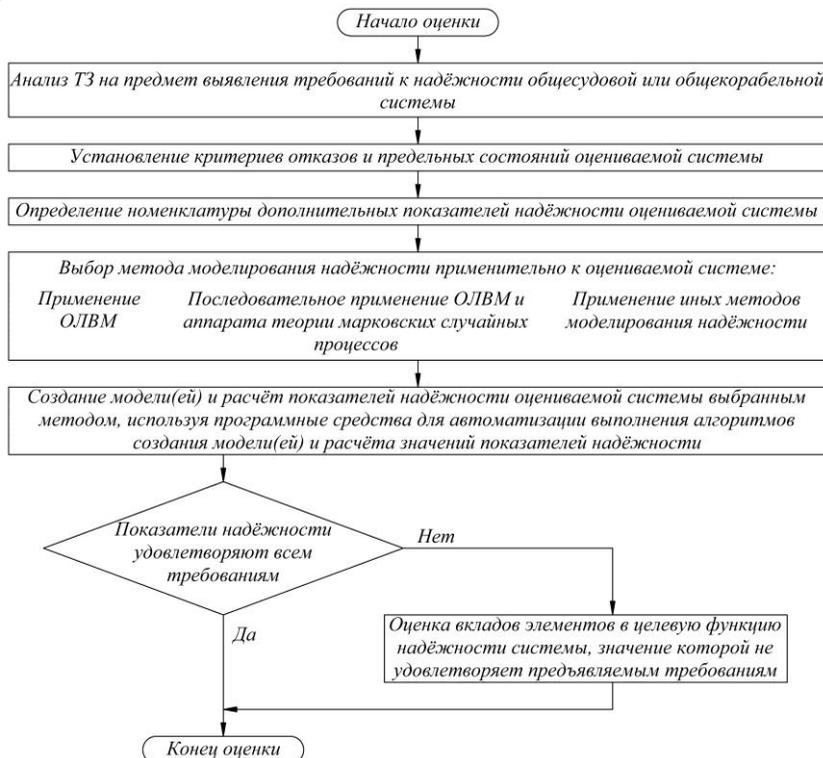
С позиции оценки надёжности общесудовые и общекорабельные системы подразделены на две группы: системы, для которых характерен отказ только по внутренним причинам (дифферентные, креновые, балластные и т.п.), и системы, для которых характерен отказ по внутренним причинам и вследствие изменения внешних требований к системе (объёмного, воздушно-пенного пожаротушения,

воздуха высокого давления, общесудовой гидравлики и т.п.). Процессы эксплуатации первых, даже с учётом восстановления отказавших элементов, в большом количестве случаев вписываются в ограничения, накладываемые на системы для применения логико-вероятностных методов оценки надёжности. Процессы эксплуатации общесудовых и общекорабельных систем в большинстве случаев подпадают под понятие марковских, отвечая условиям ординарности, стационарности, отсутствия последействия и являются транзитивными и эргодичными. Поэтому оценка надёжности общесудовых и общекорабельных систем, для которых характерен отказ по внутренним причинам и вследствие изменения внешних требований к системе, возможна с использованием аппарата теории марковских случайных процессов типа гибели и размножения, принимая пуассоновскими потоки отказов и восстановлений, дискретность числа состояний системы, непрерывность времени и учитывая только средние значения показателей надёжности. Устанавливается, что значения большого количества показателей надёжности, таких как  $P(t_{б,р})$ ,  $T_o$ ,  $T_{ср}$ ,  $T_b$ ,  $K_r$ ,  $K_{т.и}$ ,  $K_{эф}$ ,  $P(t_b)$  и др., необходимые для оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем, можно определить, используя два указанных выше наиболее разработанных на сегодняшний день способа математического описания сложных систем.

Предлагается последовательное применение общего логико-вероятностного метода и аппарата теории марковских случайных процессов для оценки на этапе проектирования надёжности общесудовых и общекорабельных систем, для которых характерен отказ не только по причине нарушения внутреннего функционирования, но и вследствие изменения требований к системе извне. Суть этого подхода заключается в использовании общего логико-вероятностного метода для моделирования внутреннего функционирования надёжности общесудовых и общекорабельных систем и последующем применении аппарата теории марковских случайных процессов для учёта поступающих к системе внешних запросов. Применение предлагаемого метода позволяет учитывать внешнее функционирование сложных общесудовых и общекорабельных систем без построения громоздких графов марковских процессов, включающих все состояния всех элементов системы, а использовать в качестве элементов относительно небольшое количество блоков, надёжность внутреннего функционирования которых определена с помощью общего логико-вероятностного метода. При этом используя в качестве исходных данных такие величины, как  $P(t_{б,р})$  каждого элемента,  $T_b$  каждого элемента и др., результатом применения общего логико-вероятностного метода будут полученные значения таких показателей надёжности блоков, как  $P(t_{б,р})$ ,  $T_o$ ,  $T_{ср}$ ,  $T_b$  и др. Исходными данными для применения аппарата теории марковских случайных процессов будут являться полученные в результате применения общего логико-вероятностного метода значения показателей надёжности и величины, определяющие интенсивность поступления требований к системе извне. Результатом – значения такие показателей надёжности системы, как  $K_r$ ,  $K_{эф}$  и др.

В главе описывается разработанная методика оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем на этапе проектирования, блок-схема

которой представлена на рисунке 1. Выявлена целесообразность применения для оценки надёжности специализированного программного средства, автоматизирующего выполнение алгоритмов общего логико-вероятностного метода.



**Рисунок 1. Блок-схема алгоритма методики оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем при проектировании**

Разработанная методика имеет своей целью получение результатов оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем при проектировании, которые можно использовать для обоснования надёжности проектируемой системы перед заказчиком и как основу для принятия мер по её повышению.

Начальным этапом является анализ требований, предъявляемых заказчиком в техническом задании (ТЗ). Расчёт значений показателей надёжности системы, требования к которым установлены в ТЗ выполняется при любых обстоятельствах для обоснования перед его представителями надёжности системы.

Затем для предлагаемого проектировщиком варианта системы на основании анализа функциональных схем, алгоритмов работы, циклограмм работы устанавливаются критерии её отказов и предельных состояний с учётом номенклатуры показателей надёжности, выявленных в ТЗ.

Определяется номенклатура дополнительных показателей надёжности оцениваемой системы в случае, если определённой в ТЗ номенклатуры недостаточно для выполнения полной оценки надёжности системы. Количество дополнительных показателей должно быть минимальным и достаточным для

определения надёжности системы с достаточной полнотой. Их выбор может опираться на приведённые в главе результаты выполненной классификации общесудовых и общекорабельных систем в части надёжности и номенклатуру их показателей надёжности.

В случае, если существует необходимость учёта требований к системе извне, и связанного с этим использования аппарата теории марковских случайных процессов, используется последовательное применение общего логико-вероятностного метода и аппарата теории марковских случайных процессов. В случае отсутствия такой необходимости, для оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем применяется общий логико-вероятностный метод. Если моделирование надёжности системы указанными методами невозможно вследствие необходимости учёта процессов, свойства которых не подпадают под ограничения, накладываемые для применения этих методов, должны применяться иные методы, такие как методы вариационно-имитационного моделирования.

Для создания модели и расчёта показателей надёжности при использовании общего логико-вероятностного метода выполняются сначала этапы постановки задачи:

1. Декомпозиция оцениваемой системы на элементы;
2. Задание характеристик надёжности каждого элемента, а также условий реализации и нереализации его выходных функций;
3. Создание схемы функциональной целостности системы;
4. Задание логических критериев функционирования системы.

Затем, при помощи автоматизирующего выполнение алгоритмов построения модели и расчётов программного средства, построить многочлен вероятностной функции системы и, используя его, выполнить расчёт необходимых показателей надёжности.

Для случая, когда необходимо последовательное применение общего логико-вероятностного метода и аппарата теории марковских случайных процессов, действия по моделированию и расчёту показателей надёжности общесудовых и общекорабельных системы сводятся к следующим этапам:

1. Декомпозиция оцениваемой системы на блоки;
2. Построение графической модели функционирования системы, описывающую состояния системы и переходы между ними;
3. Построение на основе графической модели функционирования её математической модели в виде системы дифференциальных уравнений Колмогорова;
4. Применение общего логико-вероятностного метода для расчёта показателей надёжности блоков, на которые декомпозирована оцениваемая система, без учёта требований к системе извне;
5. Задание характеристик, определяющих вероятности нахождения системы и требований к ней во всех возможных состояниях, и интенсивностей переходов из одного состояния в другое;
6. Нахождение предельных вероятностей состояний системы и требований к ней, для чего выполняется интегрирование системы, используя для этого программное средство автоматизации математических расчётов;

## 7. Расчёт показателей надёжности системы с учётом требований к системе извне.

Чтобы учесть такие отказы, как человеческий фактор, наличие неотбракованных элементов с производственными дефектами и др. для полученных значений полученных показателей надёжности вводится поправочный коэффициент ( $K_{\text{п}}$ ), определяемый по данным эксплуатации аналогичных систем.

В случае, если система удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям в части надёжности, оценка её надёжности считается завершённой, а полученные результаты можно использовать для обоснования надёжности системы перед заказчиком. В противном случае необходимо внесение изменений в структуру системы, её состав или режимы работы, направленные на повышение её надёжности. Для этого определяется перечень элементов или групп элементов, принятие мер по повышению надёжности которых будет наиболее эффективным для повышения надёжности всей системы. Указанное достигается определением вкладов элементов в целевую функцию надёжности системы и построением диаграммы этих вкладов.

Положительный вклад  $\alpha_i^+$  определяется при изменении значения используемого при расчёте показателя надёжности  $i$ -ого элемента ( $\Pi_{si}$ ) от текущего значения до предельно большой его величины:

$$\alpha_i^+ = \Pi_c \Big|_{\Pi_{si}=\max} - \Pi_c \Big|_{\Pi_{si}}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

На основании полученной оценки надёжности системы с учётом диаграммы положительных вкладов элементов в целевую функцию надёжности системы можно разрабатывать меры по повышению надёжности системы.

В конце главы I описано применение разработанной методики для оценки надёжности различных видов общесудовых и общекорабельных систем судов и кораблей серийной постройки, как требующей учёта требований к системе извне, так и не требующей его.

**Вторая глава** диссертации посвящена обеспечению готовности к использованию общесудовых и общекорабельных систем. Глава содержит в себе обзор факторов, влияющих на готовность к использованию общесудовых и общекорабельных систем, анализ опыта решения задач обеспечения готовности к использованию объектов определением количества запаса сменно-запасных частей и оборудования, разработку модели процесса обеспечения готовности к использованию общесудовых и общекорабельных систем, разработку методики определения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем, обеспечивающей готовность к использованию общесудовых и общекорабельных систем и их оборудования в заданный период времени, применение разработанной методики для определения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем.

В начале главы рассматриваются факторы, влияющие на готовность к использованию общесудовых и общекорабельных систем. Важнейшим из факторов является обеспеченность работ по обслуживанию и ремонту общесудовых и общекорабельных систем сменно-запасными частями и оборудованием, что говорит

за создание их запаса. Вместе с этим образование излишка запаса сменно-запасных частей и оборудования ведёт к образованию издержек.

Приводятся результаты анализа опыта определения количества запаса сменно-запасных частей и оборудования, в ходе которого рассматриваются различные попытки определения потребностей в сменно-запасных частях и в запасном оборудовании, используя математические модели:

- модели определения оптимального количества запасных частей на складе в зависимости от цен, потребления, стоимости хранения, от интенсивности отказов, времени пополнения запаса и от требуемой достаточности запаса;

- модели определения оптимального срока пополнения запасных частей на складе с учётом аварийного запаса (страхового фактора), закладываемого на снижение последствий несвоевременных поставок;

- модели, использующие понятие уровня достаточности и коэффициента достаточности деталей в комплекте сменно-запасных частей.

Рассмотрены положительные и отрицательные стороны указанных моделей с точки зрения их применения к обеспечению сменно-запасными частями и запасном оборудованием общесудовых и общекорабельных систем.

На основании результатов приведённого анализа делается вывод о необходимости создания модели и основанного на ней метода определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования на заданный период времени, позволяющего учесть особенности технического обслуживания и ремонта общесудовых и общекорабельных систем.

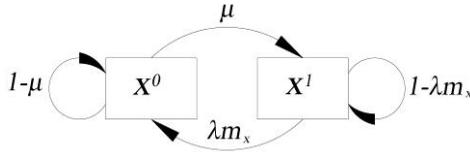
Сведения об эксплуатации общесудовых и общекорабельных систем позволяют считать, что потоки событий процесса обеспечения готовности к использованию общесудовых и общекорабельных систем простейшие, то есть обладают свойствами стационарности, ординарности, и отсутствия последействия. Число состояний в этих процессах дискретно, а время можно считать непрерывным. Совокупность этих свойств законов распределения времени между отказами и распределения времени между ремонтами общесудовых и общекорабельных систем и их оборудования позволяет реальный процесс обеспечения готовности к использованию общесудовых и общекорабельных систем и их оборудования аппроксимировать марковским процессом с непрерывным временем и дискретным числом состояний.

Условливаемся считать, что в процессе эксплуатации общесудовых и общекорабельных систем любой их элемент может находиться либо в работоспособном состоянии, либо в состоянии ремонта при возникновении отказа. В случае отказа чтобы перевести систему в работоспособное состояние необходимо затратить сменно-запасные части или оборудование из запаса. Процесс расходования и пополнения запаса сменно-запасных частей и оборудования можно также представить двумя взаимосвязанными состояниями:

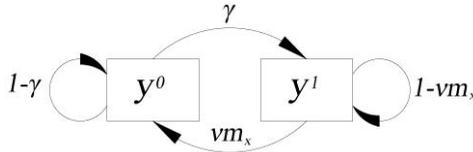
- пополнение запаса сменно-запасных частей или оборудования в результате их изготовления, ремонта или заказа;

- потребление в системе каждым изделием однотипных ему сменно-запасных частей или оборудованием – однотипного ему запасного оборудования из запаса для перехода в работоспособное состояние.

Описанные состояния и переходы между ними для этих процессов можно представить в виде графов (рисунки 2 и 3).



**Рисунок 2. Размеченный граф состояний и переходов процессов поддержания готовности к использованию изделий или оборудования общесудовых и общекорабельных систем**



**Рисунок 3. Размеченный граф состояний и переходов процессов потребления и пополнения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем**

Условные обозначения:

$x^1$  - состояние процесса, в котором  $i$ -ое изделие или оборудование из  $n_c$  находится в работоспособном состоянии;

$x^0$  - состояние процесса, в котором  $i$ -ое изделие или оборудование из  $n_c$  находится в ремонте в результате отказа;

$y^1$  - состояние процесса, в котором  $k$ -ая сменно-запасная часть или оборудование из  $n_{зч}$  находится в запасе;

$y^0$  - состояние процесса, в котором  $k$ -ая сменно-запасная часть или запасное оборудование из  $n_{зч}$  использовано;

$n_o$  - количество рассматриваемых единиц однотипных изделий или оборудования;

$n_{зч}$  - количество рассматриваемых единиц сменно-запасных частей или запасного оборудования;

$x_r(t)$  - количество работоспособных однотипных изделий или оборудования из  $n_c$ ;

$y_3(t)$  - число единиц сменно-запасных частей или оборудования в запасе из  $n_{зч}$  для обеспечения готовности к использованию  $n_c$  однотипных изделий или оборудования;

$t$  - текущее время рассматриваемого периода эксплуатации общесудовых и общекорабельных систем;

$\lambda$  - интенсивность выхода изделия или оборудования из эксплуатации в результате отказа;

$\mu$  - интенсивность ввода изделий или оборудования в эксплуатацию в результате ремонта;

$\gamma$  - интенсивность пополнения запаса сменно-запасными частями или оборудованием в результате их ремонта или производства;

$\nu$  - интенсивность расходования сменно-запасных частей или оборудования из запаса;

$m_x = m_x(t)$  - среднее число работоспособных однотипных изделий или оборудования;

$m_y = m_y(t)$  - среднее число сменно-запасных частей или оборудования, находящихся в запасе.

Опираясь на показанные на рисунках 2 и 3 графы, определены функции приращения количества однотипных изделий и оборудования, находящихся в эксплуатации, и количества сменно-запасных частей и оборудования в запасе от времени  $t$ . Через определение математических ожиданий этих приращений получена система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_x}{dt} = \mu - m_x \lambda, \\ \frac{dm_y}{dt} = \gamma - m_y \nu. \end{cases} \quad (2)$$

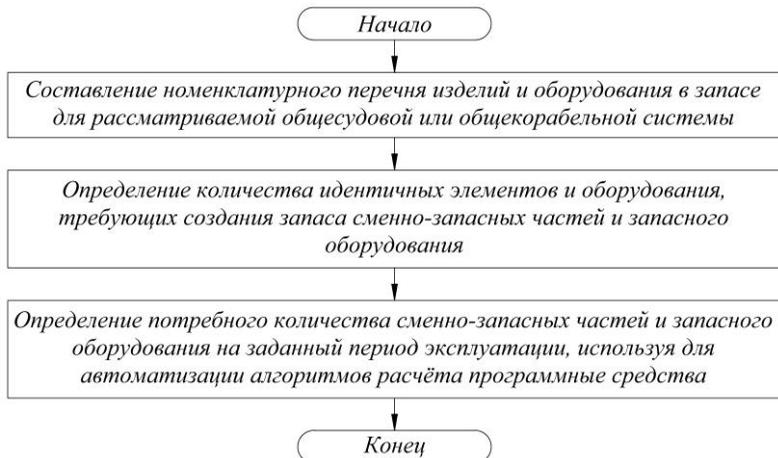
Использование системы уравнений (2) позволяет построить зависимости среднего числа работоспособных однотипных изделий или оборудования от времени  $m_x(t)$ , определить среднее время до момента, когда в состоянии готовности не останется ни одной из рассматриваемых единиц оборудования.

При  $m_x = const$  из (2) получаем систему алгебраических уравнений (3), используя которую можно определить начальный запас  $m_{y0}$  сменно-запасных частей и оборудования, при котором будет обеспечена готовность всех изделий и оборудования общесудовых и общекорабельных систем на протяжении заданного периода эксплуатации:

$$\begin{cases} 0 = \mu - m_x \lambda, \\ m_y = (\gamma - m_y \nu)t + m_{y0}. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (2) является моделью процесса поддержания готовности к использованию изделий и оборудования общесудовых и общекорабельных систем на заданный период времени эксплуатации, заключающегося в чередовании состояний безотказной работы и ремонтов в случаях отказов, и процесса потребления и пополнения запаса сменно-запасных частей и оборудования.

Далее в главе описывается разработанная методика определения запаса сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем, использующая для расчётов полученные на основе (2) зависимости.



**Рисунок 4. Блок-схема алгоритма методики определения запаса сменно-запасных частей и оборудования на заданный период эксплуатации общесудовых и общекорабельных систем**

Целью разработанной методики, блок-схема которой представлена на рисунке 4, является определение запаса сменно-запасных частей и запасного оборудования для общесудовых и общекорабельных систем, позволяющего обеспечить их готовность к использованию.

На начальном этапе реализации методики составляется номенклатурный перечень изделий и оборудования в запасе для рассматриваемой общесудовой или общекорабельной системы на основе перечней более ранних, побывавших или находящихся в эксплуатации, аналогов системы, а также опираясь на регламентирующую состав запаса документацию.

После определения номенклатуры изделий и оборудования на основе документации на систему (спецификации сборочных и монтажных чертежей и др.) определяется количество изделий и оборудования в рассматриваемой системе, требующего создания запаса сменно-запасных частей и оборудования.

Когда исходные данные определены, выполняется расчёт потребного количества сменно-запасных частей и запасного оборудования на заданный период эксплуатации.

Начальный запас сменно-запасных частей, необходимый для обеспечения готовности к использованию количества однотипных изделий  $m_{\text{их}_0} = \text{const}$  на заданный период эксплуатации временем  $t$  из модели (2) определяется формулой:

$$m_{\text{сзч}_0} = \left( \frac{V_{\text{и}} \cdot \mu_{\text{и}}}{\lambda_{\text{и}}} - \gamma_{\text{сзч}} \right), \quad (4)$$

где:

$V_{\text{и}}$  - интенсивность потребления единицей однотипных изделий сменно-запасных частей из запаса;

$\mu_{\text{и}}$  - интенсивность ввода однотипных изделий в эксплуатацию в результате использования сменно-запасных частей из запаса;

$\lambda_{и}$  - интенсивность выхода из строя однотипного изделия в результате отказа;

$\gamma_{сзч}$  - интенсивность пополнения запаса сменно-запасных частей в заданный период эксплуатации.

Аналогичная зависимость следует из (2) и для начального количества запасного оборудования, необходимого для обеспечения готовности к использованию оборудования общесудовых и общекорабельных систем.

Определение времени, за которое в работоспособном состоянии не останется ни одного изделия, а также количества однотипных изделий, которое останется работоспособным к концу заданного времени эксплуатации при пополнении или без пополнения их запаса, возможно при построении зависимости изменения количества работоспособных изделий от времени.

Для этого необходимо интегрировать систему уравнений (5), основанную на (2):

$$\begin{cases} \frac{dm_{иx}}{dt} = \mu_{и} - m_{иx}\lambda_{и}, \\ \frac{dm_{сзчу}}{dt} = \gamma_{сзч} - m_{иx}v_{и}, \end{cases} \quad (5)$$

где:

$m_{иx} = m_{иx}(t)$  - среднее число работоспособных однотипных изделий в зависимости от  $t$ ;

$m_{сзчу} = m_{сзчу}(t)$  - среднее число работоспособных однотипных изделий в зависимости от  $t$ .

Для того, чтобы определить время, за которое в работоспособном состоянии не останется ни одной единицы оборудования, чтобы определить количество однотипного оборудования, которое останется работоспособным к концу заданного времени эксплуатации, существует аналогичная зависимость.

Исходные данные для выполнения расчётов методики должны определяться, опираясь на статистику проводимых замен изделий и оборудования, а также потребления запаса изделий и оборудования в эксплуатации.

В конце главы показано применение разработанной методики для определения количества сменно-запасных частей и оборудования в запасе на межремонтный период для реальных общекорабельных систем.

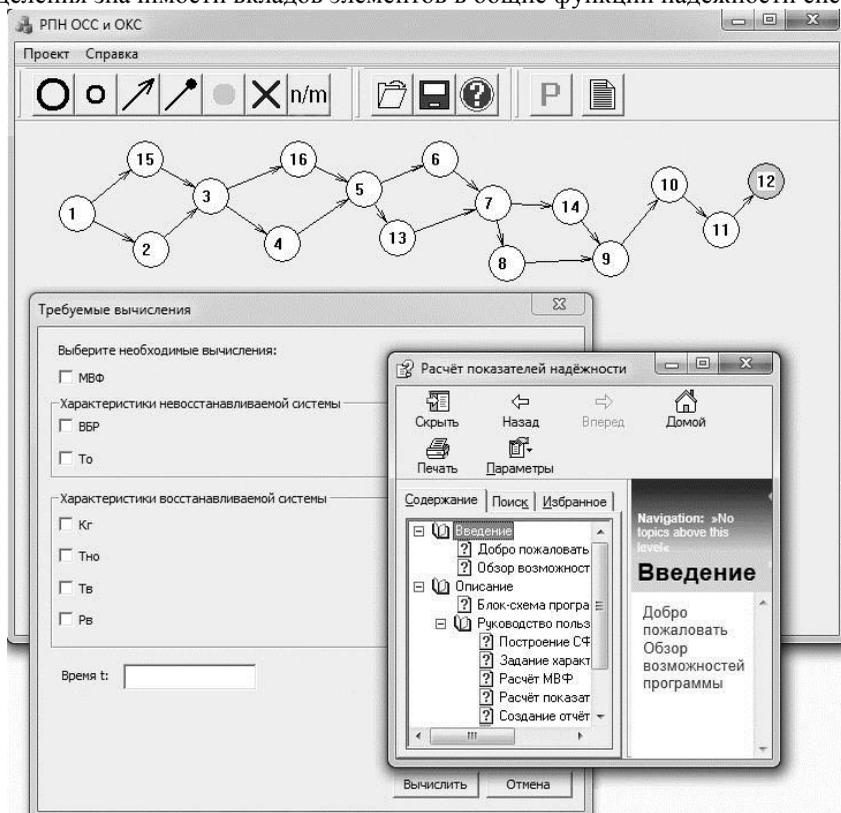
**В третьей главе** описывается разработанный программный комплекс для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем и определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем при проектировании.

Приводятся результаты оценки возможностей существующих программных средств для автоматизации выполнения алгоритмов расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем. Устанавливается потребность разработки программного средства для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем.

В процессе разработки специализированного программного средства для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем

установлены этапы оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем на этапе проектирования, требующие программной поддержки. Ими являются:

- создание графических и математических моделей надёжности общесудовых и общекорабельных систем;
- задание количественных характеристик состояний элементов и происходящих с ними событий;
- анализ математических моделей общесудовых и общекорабельных систем, средства для определения количественных показателей надёжности систем и определения значимости вкладов элементов в общие функции надёжности систем.



**Рисунок 5. Интерфейс программного средства для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем**

Разработана архитектура программного средства, автоматизирующего указанные этапы оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем, включающая в себя:

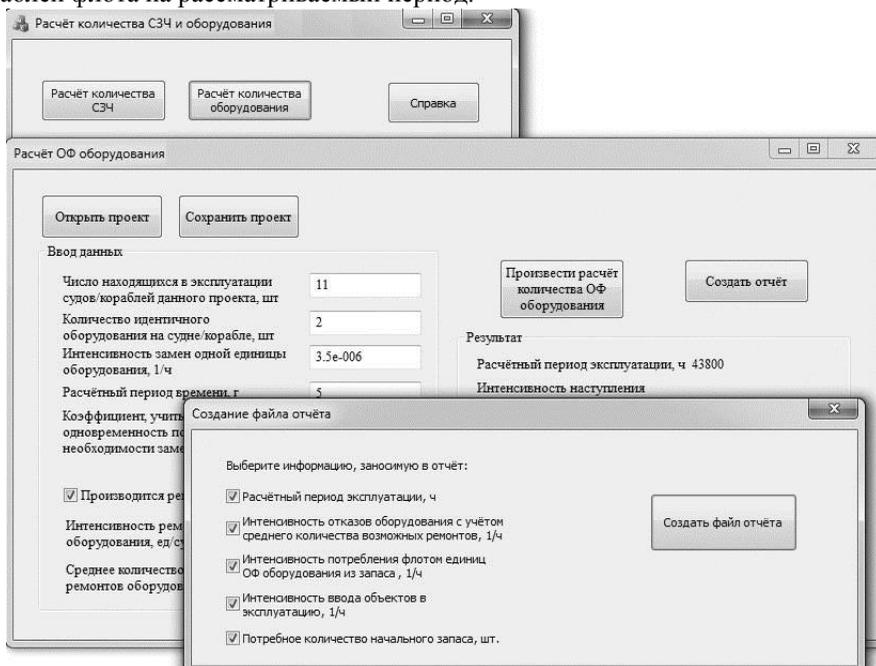
- средства разработки графической модели;
- средства адекватного графического представления модели;
- средства создания математической модели;
- расчётный модуль для анализа модели;
- средства представления полученных результатов анализа;
- средства экспорта и импорта моделей;

- средства документирования модели и результатов анализа.

Программное средство с разработанной архитектурой создано на языке программирования C++. Его интерфейс представлен на рисунке 5.

Разработан ряд тестовых примеров для проведения верификация программного средства. На основании выполненной верификации сделано заключение, что результаты расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем с помощью разработанного программного средства достоверны и оно может быть использовано для решения задач оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем.

Автоматизирован процесс определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования на заданный период. Программной поддержка реализована для выполнения алгоритмов расчёта потребного количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем судов и кораблей флота на рассматриваемый период.



**Рисунок 6. Интерфейс программного средства для определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования на рассматриваемый период эксплуатации общесудовых и общекорабельных систем**

Разработанная архитектура программного средства, включает в себя:

- средства для задания исходных данных;
- расчётный модуль, выполняющий алгоритмы расчёта;
- средства представления полученных результатов расчёта;
- средства экспорта и импорта исходных данных;
- средства документирования результатов расчётов.

Программное средство разработано на языке программирования C++ (его интерфейс на рисунке 6). Результаты его верификации позволяют сделать

заключение о том, что программа корректно выполняет алгоритмы расчёта и может быть использована для решения задач определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем.

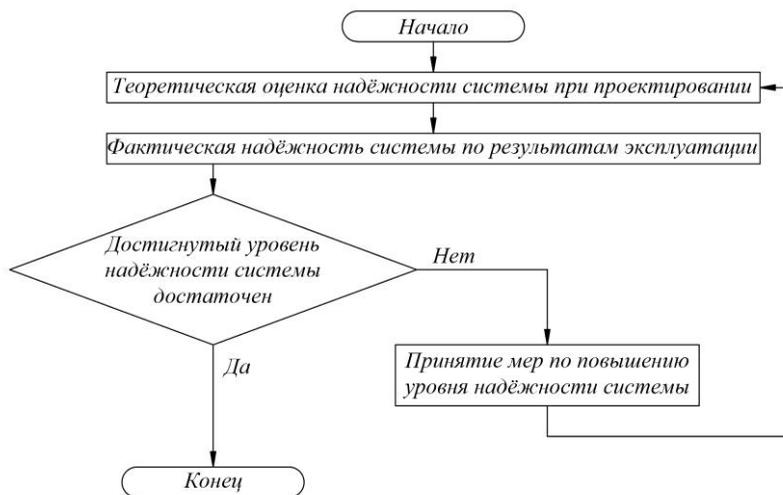
**Четвёртая глава** посвящена интеграции разработанных методик и программных средств в состав системы менеджмента качества проектной организации, разработке методических основ создания системы сбора и обработки данных по надёжности общесудовых и общекорабельных систем и их элементов.

В главе описано внедрение разработанных методик и программных средств в систему менеджмента качества проектной организации, предполагающее их использование как составляющих системного подхода к менеджменту качества. Описан процесс функционирования методик в составе системы менеджмента качества предприятия и задачи подразделений в этом процессе.

Обозначена необходимость создания системы сбора данных по надёжности элементов общесудовых и общекорабельных систем и определены методические основы её создания. Выявлена целесообразность создания информационно-функциональной модели жизненных циклов общесудовых и общекорабельных систем и выполняемых в этих циклах процессов. Разработка такой модели позволит отслеживать техническое состояние эксплуатирующихся общесудовых и общекорабельных систем, эффективно использовать технологии обеспечения надёжности для систем следующих проектов.

Разработан проект использования разработанных методик и программных средств в составе CALS(Continuous Acquisition and Lifecycle Support)-технологий.

В конце главы приведён алгоритм обеспечения надёжности общесудовых и общекорабельных систем, использующий информацию с мест эксплуатации систем, в общем виде показанный в виде блок-схемы на рисунке 7.



**Рисунок 7. Блок-схема алгоритма обеспечения надёжности общесудовых и общекорабельных систем в процессе жизненного цикла судна/корабля**

**В основных результатах и выводах** изложены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

**Приложения** содержат документы о внедрении результатов диссертационной работы, о государственной регистрации разработанных программных средств, а также не вошедшие в основную часть работы громоздкие таблицы, расчёты, рисунки.

### **Основные результаты и выводы**

1. Разработана методика, позволяющая дать оценку надёжности и обосновать выбор схемно-технических решений и технических средств общесудовых и общекорабельных систем при их проектировании. Методика реализуется на основе применения общего логико-вероятностного метода и марковских процессов типа гибели и размножения к задаче оценки надёжности различных общесудовых и общекорабельных систем. Применение методики позволяет обосновать показатели надёжности и выбор схемно-технических решений общесудовых и общекорабельных систем при проектировании, чем обеспечивается их надёжность.

2. Разработана методика, позволяющая определить запас сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем на заданный период их эксплуатации, использующая разработанную модель поддержания готовности к использованию изделий и оборудования общесудовых и общекорабельных систем. Применение разработанной методики при проектировании общесудовых и общекорабельных систем обеспечивает их готовность к использованию и ведёт к сокращению издержек при эксплуатации.

3. Разработаны программные средства для расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем и расчёта потребного количества сменно-запасных частей и запасного оборудования общесудовых и общекорабельных систем. Эти разработки обеспечивают автоматизацию выполнения расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем, определения потребного количества сменно-запасных частей и оборудования общесудовых и общекорабельных систем на заданный период эксплуатации при проектировании.

4. Разработан проект использования методик и программного комплекса в составе системы менеджмента качества предприятия и проект их интеграции в CALS-технологии. Разработаны методические основы создания системы сбора и обработки данных по надёжности общесудовых и общекорабельных систем.

Полученные результаты *отличаются от известных* использованием:

- обоснованного набора методов оценки надёжности общесудовых и общекорабельных систем на этапе проектирования, в том числе последовательного применения общего логико-вероятностного метода и аппарата теории марковских случайных процессов типа гибели и размножения для оценки на этапе проектирования надёжности общесудовых и общекорабельных систем, для которых характерен отказ по внутренним и внешним причинам;

- метода определения потребного количества сменно-запасных частей и запасного оборудования, позволяющего учесть особенности технического обслуживания и ремонта общесудовых и общекорабельных систем;

- программных средств и организационных решений, позволяющих использовать современные достижения в области вычислительной техники и

информационных технологий для автоматизации процессов, связанных с обеспечением надёжности общесудовых и общекорабельных систем.

Использование результатов исследования позволяет решить проблему обеспечения надёжности общесудовых и общекорабельных систем при проектировании, что повышает возможность реализации Морской доктрины Российской Федерации и выполнение Федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» и «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу».

### **Публикации по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях Перечня рецензируемых научных журналов ВАК**

1. Рудницкий А.В., Рудницкий В.И., Виноградов В.С. Управление надёжностью судового оборудования с применением информационных технологий // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2011. – № 1. – С. 67-72.
2. Рудницкий А.В., Виноградов В.С. Обеспечение надёжности судовых систем и оборудования на этапах проектирования и эксплуатации с применением информационных технологий // Морской вестник – 2012. – № 3. – С. 45-49.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ**

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ регистрационный № 2013612395 от 26.02.2013 «Программа расчёта показателей надёжности общесудовых и общекорабельных систем (РПН ОСС и ОКС)» Виноградов В.С., Рудницкий В.И., Рудницкий А.В.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ регистрационный № 2013612392 от 26.02.2013 «Программа расчёта потребного количества сменно-запасных частей и обменного фонда оборудования общесудовых и общекорабельных систем (РПК СЗЧ и ОФ ОСС и ОКС)» Виноградов В.С., Рудницкий В.И., Рудницкий А.В.

#### **Статьи в журналах и тезисы докладов научных конференций**

5. Рудницкий В.И., Виноградов В.С. Применение информационных технологий для управления надёжностью электротехнического оборудования автономных объектов Печ. «Актуальные проблемы электроэнергетики»: Труды НГТУ, том 77, Н.Новгород, 2009 г. с.137-142.
6. Рудницкий В.И., Рудницкий А.В., Виноградов В.С. Информационное обеспечение для управления надёжностью судового оборудования Печ. Труды НГТУ 2 (87) 2011 г. с.147-154.
7. Рудницкий В.И., Виноградов В.С. Использование информационных технологий при управлении надёжностью изделий для повышения их конкурентоспособности Печ. «Стратегия антикризисного управления экономическим развитием Российской Федерации» Сборник статей международной научно-практической конференции. Пенза 2009 г. с.64-67.
8. Рудницкий В.И., Виноградов В.С. Применение информационных технологий для управления надёжностью энергетического оборудования автономных объектов Сборник материалов IX Международной молодежной научно-

технической конференции «Будущее технической науки». НГТУ, Н.Новгород, 2010 г. с.29-30.

9. Рудницкий А.В., Виноградов В.С. Математическая модель процесса восстановления эксплуатационной готовности систем и оборудования Сборник материалов XI Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н.Новгород, 2012 г. с. 186-187.
10. Виноградов В.С., Рудницкий А.В., Рудницкий В.И., Методическое и программное обеспечение надёжности общесудовых и общекорабельных систем на этапах проектирования и эксплуатации Сборник материалов XII Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н.Новгород, 2013 г. с. 225-226.