

Центр „ЗВЕЗДНЫЙ МИР“

НАДЕЖНОСТЬ  
ЖИВУЧЕСТЬ И  
БЕЗОПАСНОСТЬ  
общепланетного  
транспортного  
средства

Руководитель темы  
КРИШНЕВ В.К.

Гомель-Москва-Харьков

Состав выполненной научно-исследовательской работы по теме:  
"ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ПО НАДЕЖНОСТИ,  
ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОТС И ЕГО МОДЕЛЕЙ".

1. I-й этап. Отчет о НИР. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ ПО НАДЕЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОТС (Постановка задачи. Выбор направления работ). 1988, 61с.

2. II-й этап. Отчет о НИР, НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА. 1989, 55с.

3. III-й этап. Отчет о НИР. НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА. 1989, 49с.

4. ОТЗЫВЫ.



УТВЕРЖАЮ  
Центр  
Директор Центра  
"Звездный мир"  
А.С. Луцкий  
" 7 " 12 1988г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей  
ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ ПО НАДЕЖНОСТИ,  
ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОТС


(Постановка задачи. Выбор направления работ)  
(промежуточный)

СОГЛАСОВАНО

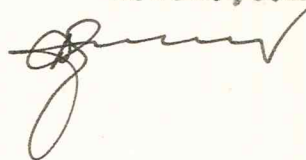
Д. т. н., профессор

 В.П. Мешалкин

Д. т. н., профессор

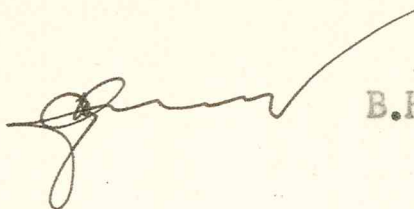
 М.А. Ястребенецкий

Руководитель темы  
к. т. н., с. н. с.

 В.К. Кришнев

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Ответственный исполнитель  
к. т. н., с. н. с.



В.К.Кришнев

Исполнитель

Научный руководитель  
программы "Экомир"

А.Э.Юницкий

РЕФЕРАТ

Отчет 61 страниц 2 рисунков — таблиц

ОБЩЕПЛАНЕТНОЕ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО, ГИПЕРНАКОПИТЕЛЬ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС, ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА, РОТОР, СИСТЕМА, МОДЕЛЬ, МИКРОГРАВИТРОН, ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ, ПРОВОДНИК, НАДЕЖНОСТЬ, КАНАЛ, МОДУЛЬ, ЭЛЕМЕНТ, ОТКАЗ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, КОМПЛЕКС, ПРОГРАММА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЖИВУЧЕСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ.

Цель работы — разработка требований надежности (безотказности и ремонтпригодности), живучести и безопасности к структуре автоматизированного общепланетного комплекса, включающего как единое целое ОТС и автоматическую систему управления, контроля и диагностики и предназначенного для безракетного вывода на околоземную орбиту промышленности и энергетики.

В отчете приведено краткое описание гипернакопителя энергии, геокосмической транспортной системы и общепланетного транспортного средства; выполнена постановка задачи исследования, указано на сложность и неоднозначность решения поставленной задачи.

Выполнен обзор и критический анализ известных методов нормирования показателей надежности сложных автоматизированных комплексов и технических объектов.

Приведены основные математические предпосылки решения задачи нормирования надежности для типовых структур-аналогов автоматизированных комплексов, космических летательных аппаратов и технических объектов.

Изложены рекомендации по выбору основных направлений научно-исследовательских работ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
I. Общая характеристика общепланетного автоматического комплекса	7
I.1. Характеристика кольцевого гипер накопителя энергии (малая физическая модель общепланетного транспортного средства)	10
I.2. Характеристика геокосмической транспортной системы (большая физическая модель общепланетного транспортного средства)	12
2. Особенности функционирования общепланетного транспортного средства и автоматической системы управления, контроля и диагностики в аспекте надежности, живучести и безопасности.	14
2.1. Проблема живучести ОТС, РСУ и автоматического общепланетного комплекса в целом.	22
2.2. Особенности функционирования общепланетного автоматического комплекса в аспекте безопасности	24
3. Обзор и критический анализ методов нормирования показателей надежности автоматизированных комплексов, космических летательных аппаратов и технических объектов.	26
4. Математические предпосылки решения задачи установления обоснованных требований к надежности ОТС.	49
5. Рекомендации по выбору основных направлений выполнения научно-исследовательской работы по теме	55
Заключение	57
Список использованных источников.	58

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения надежности, живучести и безопасности особо сложных автоматизированных и автоматических технических комплексов, которыми начинают пользоваться во все более широких масштабах, является одной из актуальных проблем современности, поскольку отказы компонент и функций этих комплексов влекут за собой огромные потери с непредсказуемыми последствиями для всего живого на нашей планете, в том числе и человечества.

Катастрофа орбитального корабля "Челленджер" в январе 1986 года, авария на атомной электростанции в Чернобыле в апреле 1986г. являются трагическими событиями, предостерегающими человеческий разум. Пренебрежение к проблеме изучения и обеспечения надежности, живучести и безопасности подобных комплексов, сокращение финансирования этих работ уничтожит все радужные планы великих теоретиков, усилия которых направлены лишь на описание явлений, природа которых так и остается для всех тайной (гравитационная сила, физическая природа электромагнитных волн, природа голограмм, землетрясений и т.д.).

Надпись на журнале "Аэрокосмическая техника" | I | гласит: "Катастрофа "Челленджера" определила переход аэрокосмической промышленности от метода экспертных оценок к вероятностным методам оценок надежности". Велика цена тому, что послужило сделать такой вывод.

Создавая новые аэрокосмические комплексы и аппараты, необходимо неукоснительно отслеживать требования по надежности к ним на всех стадиях разработки, проектирования, производства и эксплуатации. Учитывая некоторую неопределенность в оценке условий эксплуатации вновь создаваемых комплексов, какими являются общепланетные автоматические и автоматизированные комплексы и их мо-

дела, а также последствий отказов в момент разгона и запуска общепланетного транспортного средства, кроме надежности требуется изучение и обеспечение живучести и безопасности этих комплексов.

Данный отчет является первым этапом научно-исследовательской работы по теме "Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей" и включает постановку задачи и выбор направления работ по проблеме надежности, живучести и безопасности общепланетного транспортного средства и его моделей.

Данная работа выполняется центром "Звездный мир" по программе "ЭКОМИР" согласно постановления бюро Правления Советского фонда мира от 25 мая 1988г., № 34-88/Б.



## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЩЕПЛАНЕТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Структурная схема общепланетного автоматического комплекса, включающего общепланетное транспортное средство (ОТС) и распределенную систему управления с сетевой структурой (РСУ) приведена на рис. I.

ОТС представляет собой кольцевую путевую структуру, установленную на эстакадах или понтонах на высоте не менее 10 м / 2,3/. Путевая структура представляет собой статор линейного электродвигателя и систему основного (внешнего) магнитного подвеса, установленную на кольцевой трубе-оболочке, где создается вакуум. В кольцевую трубу-оболочку, диаметром поперечного сечения 30 см, помещается ротор, который и является полезным грузом, предназначенным для вывода в космическое пространство. Протяженность путевой структуры (линейного электродвигателя, трубы-оболочки, внешнего и внутреннего магнитного подвеса ротора) на уровне экватора 40 тыс. км.

Внешний магнитный подвес поднимает ротор к центру вакуумированной трубы-оболочки; линейный электродвигатель создает вдоль ротора бегущее магнитное поле, образуемое многофазными токами обмоток статора. Ротор приходит в движение вдоль трубы-оболочки, постепенно ускоряясь в течение нескольких дней до расчетной скорости 12 км/с. При достижении первой космической скорости (8 км/с) ротор становится невесомым, а при дальнейшем ее увеличении ротор стремится перейти на более высокую круговую орбиту, но внешний магнитный подвес будет удерживать его от подъема / 4 7.

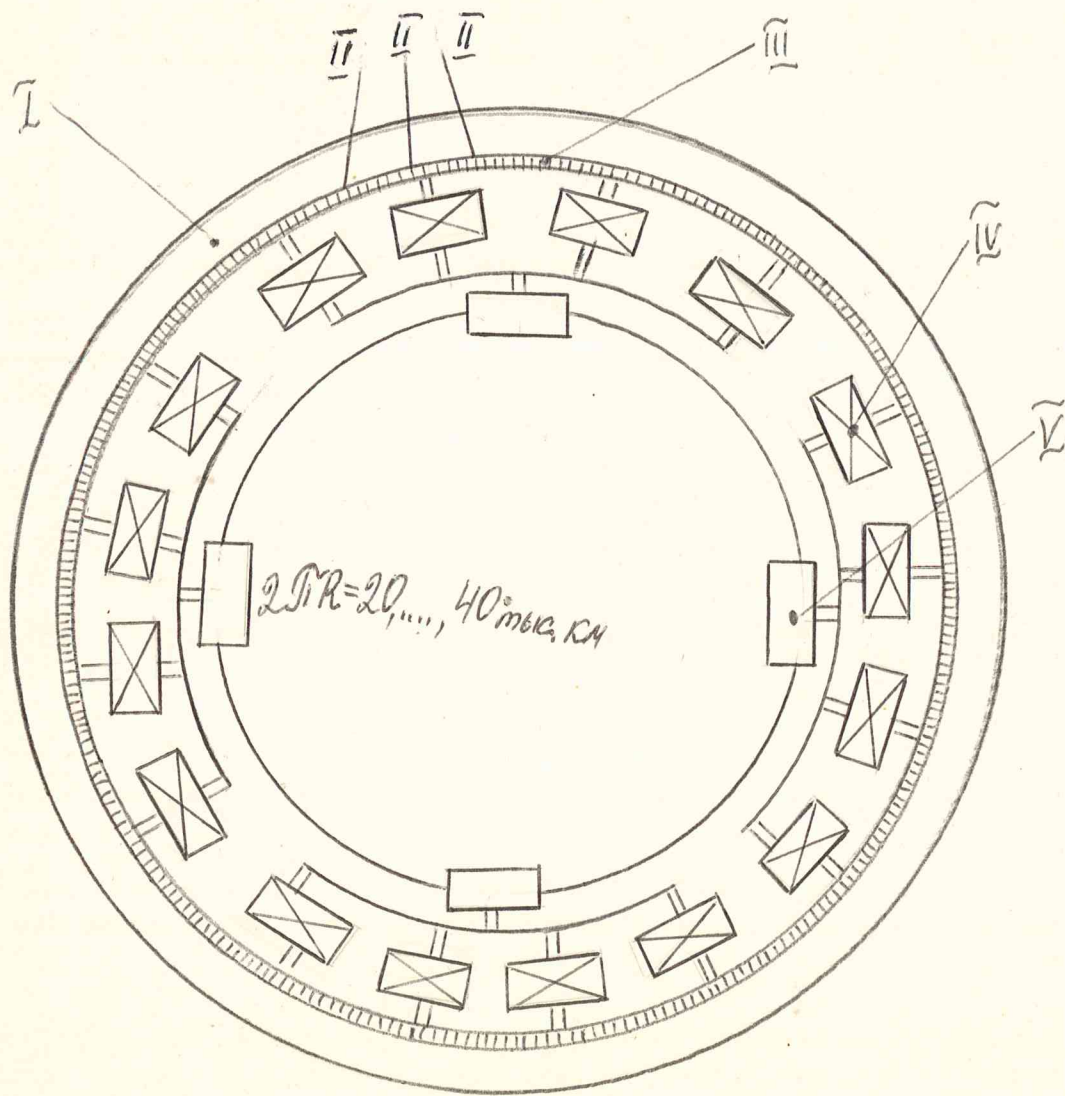
После достижения ротором расчетной скорости 12 км/с вакуумный клапан закрывается (объем трубы-оболочки герметизируется), отключается линейный электродвигатель и внешний магнитный подвес ротора, освобождаются захваты, удерживающие ранее трубу-оболочку

на эстакаде (понтоне); включается внутренний магнитный подвес, находящийся внутри трубы-оболочки. Ротор-кольцо продолжает вращаться по инерции в трубе-оболочке, увеличиваясь в диаметре (неподвижная труба-оболочка также увеличивается в диаметре) и, таким образом, за счет центробежной силы проходит атмосферный участок пути, находясь в вакууме, за 30-40 минут. На высоте 100 км удлинение кольца-ротора составляет 1,57 % (относительно удлинение до разрыва образцов из стали достигает 12-35 %); срабатывают пирозаряды, труба-оболочка разделяется в продольном направлении на две части, которые с помощью парашютов возвращаются обратно на планету для повторного использования. На высоте 120 км происходит разрыв ротора в местах, где его стенка имеет калиброванное утончение (ослабление). В космическом пространстве части ротора собираются орбитальными космическими аппаратами и транспортируются на орбитальный космический полигон для создания космической индустрии.

Для измерения, контроля, диагностирования состояний и управления ОТС в моменты: подготовки к пуску, разгона кольца ротора в вакуумной оболочке, отделения трубы-оболочки от эстакады и прохождения ею атмосферы на высоту до 100 км; разделения оболочки и ротора; "захвата" в космосе частей ротора и предотвращение засорения космического пространства, используется распределенная система управления (PCY) (рис.1).

Путевая структура ОТС условно рассматривается в виде 16 секторов, каждый из которых обслуживается одной мощной Микро-ЭВМ, входящей в состав командно-контрольного измерительного пункта (ККИП). Исходная информация о состоянии физических параметров (температуры, давления, влажности, вакуума, напряженности электромагнитного поля, напряжений, тока, концентраций и т.д.) компонент путевой структуры ОТС, а также о состоянии эстакад и понтонов поступает на вход управляющих микро-ЭВМ с быстродействием не менее  $10^6$  опер/с.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА  
ОБЩЕПЛАНЕТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА



Условные обозначения

- I - общепланетное транспортное средство
- II - каналы измерения, контроля и управления РСУ
- III - глобальная интерфейсная магистраль из стекловолокна распределенной системы управления
- IV - командно-контрольный измерительный пункт РСУ с микро-ЭВМ
- V - координационно-вычислительный центр РСУ с мощными ЭВМ

Рис. I.

По разработанным методам и моделям, алгоритмам и программам, управляющими ЭВМ вырабатываются соответствующие сигналы (сигнализации, индикации) на включение блокировок, защит, резервных компонент и ЭВМ; на перераспределение функций управления между ЭВМ.

Анализ и оценка состояния ОТС, воздушного и космического пространства в момент пуска осуществляется мощными ЭВМ верхнего уровня сетевой структуры с быстродействием не менее  $10^{12}$  опер/с, входящими в состав координационно-вычислительных центров.

Датчики и исполнительные механизмы с регулирующими органами являются принадлежностью управляющих подсистем нижнего уровня РСУ. Координационно-вычислительные центры верхнего уровня РСУ оснащаются радиотелеметрическими системами, функционирующими на связи с орбитальными космическими аппаратами. Связь между координационно-вычислительными центрами РСУ интерфейсная (рис. 1.).

Создание автоматических и автоматизированных общепланетных комплексов позволит в корне изменить жизнь на земле и осуществить перестройку сознания.

При этом будет обеспечиваться восстановление озонового слоя; подавление зарождения землетрясений, штормов, тайфунов, циклонов; создание чистой экологии фауны и флоры планеты; увеличение средней продолжительности жизни человека к 2100 году не менее 100 лет.

1.1. Характеристика кольцевого гипер накопителя энергии (малая физическая модель общепланетного транспортного средства)

Первым шагом создания общепланетного автоматического комплекса является разработка и апробация физических моделей общепланетного транспортного средства (ОТС). Для ОТС важно именно физическое моделирование, когда замкнутый в кольцо ротор, разгоняется до космических скоростей.

Первым полигоном для отработки конструкций линейного электродвигателя, магнитного подвеса, ротора и других узлов, а также

режимов работы двигателя (разгон и торможение ротора, в том числе в аварийных режимах) и управления выхода на орбиту является малая физическая модель ОТС (МФМ ОТС) / 4 /. Диаметр кольца-ротора принимается 1000 м. Максимальная расчетная скорость при этом может быть достигнута порядка 1 км/с. Подбором технологических и конструктивных приемов отрабатываются на МФМ ОТС все сверхзвуковые режимы работы ОТС. Для этого под землей на глубине 100 м прокладывается тоннель диаметром 2 м и толщиной железобетонной стенки 30 см., где размещается вакуумированный кольцевой канал с поперечным диаметром 300 мм в котором помещен кольцевой ротор с диаметром поперечного сечения 100 мм в виде непрерывного металлического стержня. Стенки трубчатого вакуумируемого канала выполняются из неэлектропроводного композиционного материала (парамагнетика), свободно пропускающего магнитное поле. Вдоль вакуумируемого канала размещен линейный асинхронный электродвигатель и система электромагнитного подвеса ротора.

В тоннеле также размещается техника и обслуживающий персонал.

Поскольку кольцевой ротор имеет небольшие поперечные размеры, в нем создаются замкнутые магнитные поля большой мощности с наименьшими потерями энергии, исчезают краевые эффекты. За счет высоких скоростей ротора тормозные потери, создаваемые электромагнитным подвесом, асимптотически стремятся к нулю / 5 /.

Запуск кольцевого ротора (включение внешнего электромагнитного подвеса-ротор заводится, передача переменного электрического тока на обмотки статора линейного электродвигателя - создание бегущего вдоль ротора магнитного поля) и его разгон аналогичен описанному для ОТС.

При прекращении подачи электрической энергии на обмотки линейного электродвигателя ротор будет продолжать свое движение, которое может длиться по инерции месяцами (воздух из канала откачен

до давления не менее 50 Па).

Для возврата обратно в сеть аккумулярованной при разгоне электрической энергии, включают обратимый электродвигатель на генераторный режим. При этом ротор будет тормозить свое движение, а обмотки статора электродвигателя будут вырабатывать электрическую энергию.

Используя МЭМ ОТС, представляется возможным не только испытать основные компоненты ОТС, но и получить существенный экономический эффект от аккумулярования электроэнергии.

1.2. Характеристика геокосмической транспортной системы (большая физическая модель общепланетного транспортного средства).

Геокосмическая транспортная система (ГКТС) представляет собой также как и в гипернакопителе кольцевую структуру с диаметром кольца 100 км, размещенную под землей на глубине 150 м / 4 /. Вакуумируемая труба - оболочка имеет поперечный диаметр 500 мм, в которой размещен кольцевой ротор с диаметром поперечного сечения 300 мм. ГКТС используется в качестве аккумуляющей электростанции, для которой прокладывается тоннель диаметром 2 м толщиной железобетонной стенки 0,3 м.

Функционирование ГКТС аналогично функционированию гипернакопителя с той лишь разницей, что в ней достигаются реальные космические скорости движения ротора. Для изготовления элементов конструкции ГКТС используются традиционные машиностроительные материалы.

Включение ГКТС в энергосистему страны эквивалентно дополнительному строительству электростанций общей мощностью около 100 млн. квт с экономией около 100 млрд.руб. / 4 /. В то же время энергетическая и космическая программы на создание ОТС по сложности своего решения проще трансконтинентальной транспортной системы "Планетран", на разработку которой уже выделены значительные средства США / 6 /.

Таким образом, создание физических моделей ОТС является проблемой первостепенной важности как для народного хозяйства (создание аккумулирующих электростанций), так и для отработки устройств и узлов ОТС общепланетного автоматического комплекса.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА И АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ В АСПЕКТЕ НАДЕЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

В аспекте надежности каждый компонент ОТС и автоматической системы управления определенным образом влияет на качество функционирования общепланетного автоматического комплекса в целом. Неисправность устройств в любом месте кольцевой путевой структуры ОТС протяженностью 40 тыс. км, равно как несоответствие расчетных данных РСУ состоянию готовности ОТС к запуску является событием, определяемым как сбой или отказ соответствующей функциональной задачи комплекса. Методологические вопросы изучения и обеспечения надежности и эффективности автоматизированных технологических комплексов, промышленных кибернетических систем рассматриваются в | 7... 12 |.

Необходимость совместного рассмотрения объекта управления, в качество которого выступает ОТС и РСУ, вытекает из условия наличия общей цели функционирования распределенной замкнутой системы.

Совокупность ОТС и РСУ, взаимодействующих между собой в замкнутом контуре управления представляет собой автоматический общепланетный комплекс, назначение которого определяется потребностью мировой цивилизации в выводе промышленности, продолжающую загрязнять окружающую среду, и энергетику в космическое пространство и характеризуется величиной целевой отдачи с заданным критерием эффективности. Целевой отдачей автоматического общепланетного комплекса является весь положительный эффект, наблюдаемый при реализации программы ЭКОМИР в течение заданного периода функционирования с использованием данного комплекса.

Какова бы ни была проектная (ожидаемая, расчетная) величина целевой отдачи автоматического общепланетного комплекса, его низ-



кая надежность сведет до минимума установленный критерий эффективности и коэффициент использования материальных и энергетических затрат.

Надежность автоматического общепланетного комплекса - это свойство комплекса выполнять поставленные целевые задачи в заданном интервале времени и при заданных условиях эксплуатации. Для исследования надежности комплекса воспользуемся разработанным системно-функциональным подходом / 7 /.

Согласно рис. 2 на первом и втором этапах используется системный подход, на третьем этапе функциональный. На первом этапе устанавливается критерий эффективности, являющийся количественной мерой оптимальности комплекса с номинальной (максимально возможной) целевой отдачей. В качестве критерия эффективности можно принять величину прибыли от функционирования комплекса с наименьшими затратами, установленными программой ЭКОМИР / 4 /. (ЭКОМИР - это единство космической индустрии (техномир) и оптимальных экологических условий развития биосферы, развития жизни на Земле (БИОМИР)).

На втором этапе при анализе функционирования комплекса выявляются целевые задачи. К основным целевым задачам автоматического общепланетного комплекса можно отнести следующие: соблюдение норм регламентной безопасности при разгоне ротора в ОТС; вывод на околоземную орбиту вакуумированной трубы-оболочки с ротором; восстановление озонового слоя Земли; обеспечение электроэнергией общепланетных энергопотребителей; своевременный сбор и доставка на космический полигон частей ротора; предотвращение (устранение) предаварийных (аварийных) ситуаций на ОТС; своевременный пуск и останов (при необходимости) ОТС.

При проведении научно-исследовательской работы на последующих этапах необходимо проранжировать целевые задачи относительно целевой отдачи, т.е. установить весовую значимость каждой из задач относительно их влияния на выполнение целевой отдачи и установить

связи между ними ; выявить возможные устройства состояния автоматического общепланетного комплекса, зависящие от отказов его компонент с определенной величиной потерь и произвести распределение этих состояний относительно влияния на реализацию целевых задач.

Системную модель автоматического общепланетного комплекса необходимо представить в виде надежно-целевой структуры / 12/. Функциональный подход на третьем этапе (рис. 2) распространяется на составные внешние функции РСУ, участвующие в реализации целевых задач автоматического общепланетного комплекса (под функцией понимается действия РСУ, направленные на достижение частной цели управления при реализации целевых задач). В аспекте надежности функциональный подход позволяет учесть структуру алгоритмов управления и факт участия диспетчера в функционировании РСУ при подготовке ОТС к запуску. Результатом использования функционального подхода должны быть показатели функциональной надежности и технической эффективности.

Особенностью исследования функциональной надежности РСУ является необходимость составления надежно-функциональных схем и разработки обоснованных критериев отказа для каждой составной внешней функции / 13,14/. Внешние составные функции РСУ при системно-функциональном подходе должны быть проранжированы по весовой значимости относительно целевых задач (по количеству связей с задачами и по влиянию на показатели технической эффективности).

К основным функциям РСУ автоматического общепланетного комплекса можно отнести следующие: сигнализация (звуковая и световая) отклонений значений параметров от норм технологического регламента ; непрерывная регистрация значений параметров основных компонент путевой структуры ОТС в момент разгона ротора ; непосредственное цифровое управление (от микро ЭВМ) процессом разгона ротора ; индикация на видеотерминале и автоматическая локализация на путевой

Этапы исследования автоматического общепланетного комплекса

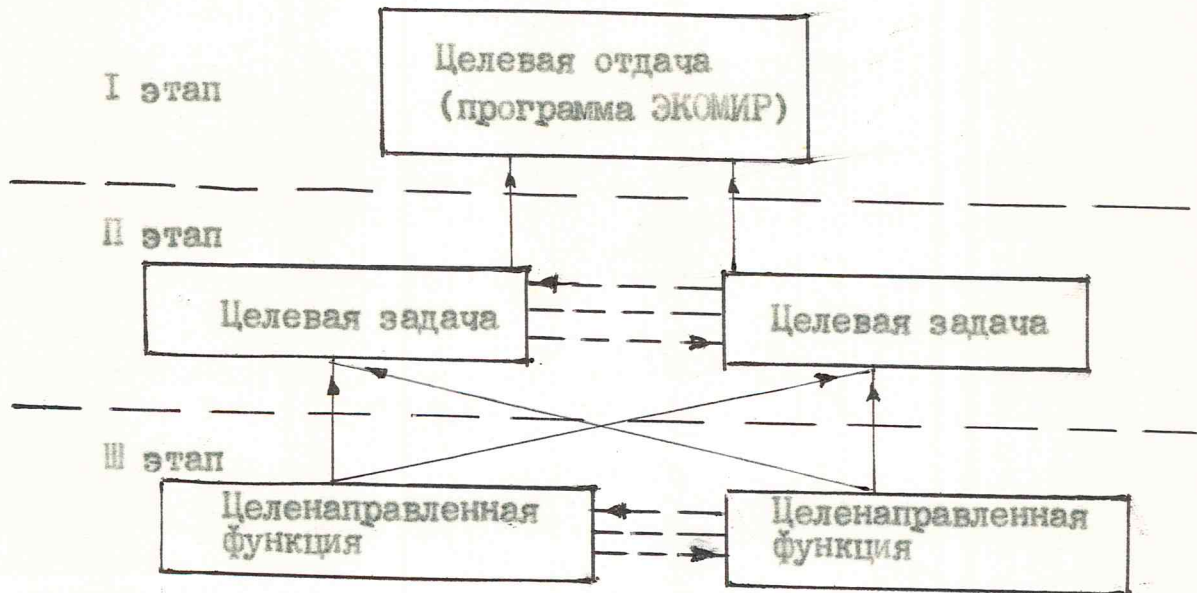


Рис. 2.

структуре мест повреждений ; аварийная защита с включением резервных компонент ; устойчивая радиорелейная и спутниковая связь радиотелеметрических систем.

При анализе качества функционирования ОТС выделяются состояния прямо или косвенно связанные с надежностью компонент путевой структуры.

К основным компонентам путевой структуры следует отнести:

1) корпус ОТС многоразового использования, конструкция которого обеспечивает упругое растяжение на 5 - 20 % и крепление к путевой структуре. (Подсистема РСУ обеспечивает: управление напряженно-деформированным состоянием корпуса, коррекцию положения корпуса в пространстве, аварийную защиту от разрушения корпуса ; отделение и возврат трубы-оболочки на землю для повторного использования ; автоматическое, одновременное во всех точках соединения, отделение трубы-оболочки от путевой структуры).

2) линейный асинхронный электродвигатель с основными и резервными обмотками из сверхпроводника. (Подсистема РСУ обеспечивает: штатное и аварийное энергообеспечение электродвигателя) ;

3) электродинамический подвес внешний (в момент разгона ротора) и внутренний. (Подсистема РСУ обеспечивает: штатное и аварийное энергообеспечение системы электродинамического подвеса) ;

4) вакуумная система, включающая вакуумные насосы, вакуумоводы и запорную арматуру для создания низкого и глубокого вакуума. (Подсистема РСУ обеспечивает: штатное и аварийное электропитание вакуумных насосов ; контроль, диагностику и автоматическое включение аварийной защиты в случае разгерметизации вакуумоводов или вакуумной трубы-оболочки) ;

5) система термостатирования с криогенным охлаждением корпуса путевой структуры, линейного электродвигателя, систем магнит-

ного подвеса, ротора, вакуумной оболочки. (Подсистема РСУ обеспечивает: штатное и аварийное электропитание криогенной установки термостатирования; контроль, диагностику и автоматическое включение аварийной защиты в случае разгерметизации каналов циркуляции охладителя; автоматическая локализации поврежденного участка с включением запасных каналов);

6) ротор-маховик в качестве полезной нагрузки, предназначенный для доставки на космический полигон. (Проверка состояния конструкции корпуса ротора, работы механизма разделения ротора и его сердечника на фрагменты производится на контрольном стенде с вакуумной средой, основные параметры которого фиксируются в ЭВМ координационно-вычислительного центра);

7) сооружение для прокладки путевой структуры ОТС (эстакады, понтоны и т.д.), учитывающие особенности равнинных и горных участков земли, глубинных и мелководных участков морей и океанов. (Подсистема РСУ обеспечивает: контроль и диагностику состояния эстакад, понтонов; оперативный анализ влияния метеусловий на состояния эстакад и понтонов; автоматическое включение резервных опор, эстакад и мобильных понтонов);

8) энергетические подстанции отбора электроэнергии (ОТС функционирует в режиме аккумулирующей электростанции). (Подсистема РСУ обеспечивает: анализ состояния энергопотребителей; аварийное торможение ротора-маховика).

В качестве составной части РСУ общепланетного автоматического комплекса в аспекте надежности целесообразно рассмотреть комплекс программно-технических средств TDC 2000 фирмы Honeywell (США) / 15 /. Эта фирма внедряет свои комплексы с 1975 года. К 1980 году один такой комплекс включал 460 систем и 81000 измерительных и управляющих каналов с использованием магистральной шины на светодио-

дах длиной до 10 км. Скорость передачи информации  $10^{12}$  бит/с. К магистральной шине подключалось до 100 абонентов. Изучение структуры АСУ, построенных на этих средствах, показывает, что имеется определенная устойчивость их архитектурных решений, а это позволяет говорить в настоящее время об архитектуре подобных систем в аспекте надежности. Ее основными особенностями являются функциональное разделение структуры на два иерархических уровня и использование интерфейсной связи между ними. На нижнем уровне, как правило, реализуются функции сбора данных и регулирования и иногда последовательного управления; на верхнем - функции контроля, оптимизации, сервисного управления регулированием, непосредственного цифрового управления по модели и другие.

Другими характерными особенностями рассматриваемых программно-технических комплексов являются модульность конструкции и генерируемость программного обеспечения, позволяющие "собирать" нужные конфигурации технических средств и путем настройки программного обеспечения включать их в работу.

Иерархический принцип построения распределенной децентрализованной АСУ с сетевой структурой позволяет повысить живучесть системы, обеспечить при неисправностях постепенный отказ функций. В нормальном режиме регуляторы работают по заданию, получаемому от вышестоящей ЭВМ. При отказе ЭВМ осуществляется управление по статическим уставкам, которые может изменить человек. После отказа регулятора возможен переход на ручное управление.

Основными составными частями такой АСУ являются:

- 1) подсистема цифрового и логического управления и регулирования;
- 2) подсистема сбора данных;
- 3) подсистема связи;
- 4) местные пульты управления путевой структуры ОТС;
- 5) оборудование координационно-вычислительного центра с ЭВМ

и пультом управления;

б) сервисное оборудование для конфигурации и настройки.

Предполагается использование в Т С-2000 многопроцессорных ЭВМ, содержащих большое число универсальных процессоров (до 1000 и более), каждый из которых может автономно выполнять программу (решать задачу) / 16 /. Такая архитектура ЭВМ обеспечивает распределенное выполнение множественного потока команд над множественным потоком данных.

Непосредственное объединение каждого обрабатывающего устройства с блоком памяти и каналом ввода-вывода значительно упрощает требования к системе коммутации. Так, для ЭВМ производительностью 100 млн. опер/с достаточной будет пропускная способность коммутатора  $10^9$  бит/с. При этом коммутаторы набираются из отдельных пространственно-рассредоточенных модулей (выход из строя отдельного модуля коммутации не приводит к отказу ЭВМ).

В ЭВМ должны использоваться средства раннего обнаружения отказов, прогнозирования отказов и технического состояния оборудования, ранжирование процессоров по уровню их надежности, контроля и диагностики с использованием сервисных процессоров (устройств управления готовностью) / 17 /.

Модель функционирования ОТС, РСУ и автоматического общепланетного комплекса в целом отображает преобразования случайных входных параметров (возмущений) в выходные параметры динамической системы (параметры состояния) / 18-21/. Числовые характеристики параметров состояния (математические ожидание, дисперсии и др.), необходимые для предварительного задания функциональной надежности комплекса, как правило неизвестны. Поэтому для нормирования, т.е. назначения требований к надежности ОТС, РСУ и автоматического общепланетного комплекса (АОК) в целом, целесообразно использовать зависимости между стоимостью создания и эксплуатации, соответственно ОТС, РСУ и АОК, критерием эффективности использования

АОК ( $W$ ), а также времени  $T$ , необходимым на его создание.

Задача оптимизации требований к надежности ОТС, РСУ и АОК в целом может быть представлена в следующей форме:

$$\begin{cases} \bar{L}(P_{\text{э}}, T, W_{\text{э}}) = \min \\ W_{\text{э}}(\bar{L}, T, P_{\text{э}}) = W_{\text{эТР}} \\ T(\bar{L}, W_{\text{э}}, P_{\text{э}}) \leq T_{\text{ТР}} \end{cases}$$

где  $C$  - средние предельные затраты на создание и эксплуатацию АОК в течение планируемого гарантийного срока эксплуатации в годах;

$P_{\text{э}}$  - требуемое оптимальное значение показателя надежности;  
 $W, W_{\text{эТР}}$  - функция и требуемое значение критерия эффективности АОК после эксплуатации в течение гарантийного срока;

$T_{\text{ТР}}$  - требуемое значение времени, отводимого на создание АОК.

Некоторые аспекты методов нормированной показателей надежности и их критический анализ приведены в главе 3 данного отчета.

2.1. Проблема живучести ОТС, РСУ и автоматического общепланетного комплекса в целом.

В настоящее время теория живучести находится в начальной стадии, когда еще не сформулированы основные понятия и определения. Нет определенных методических разработок и по вопросу о том, для каких систем следует оценивать, нормировать и обеспечивать живучесть. Согласно общетехническому определению под живучестью понимается способность систем к сохранению своих основных функций (хотя бы с допустимой потерей качества их выполнения) при воздействии факторов внешней среды катастрофического характера - неблагоприятных условий эксплуатации / 22,23 /. В судостроении живучесть судна определена как способность противостоять воздействию стихийных сил ветра и волн, пожаров, оружия противника, а



при повреждении сохранять и восстанавливать полностью или частично мореходность и боевые качества / 24 /. В электроэнергетике под живучестью понимается свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей / 25 /.

В вычислительных системах с живучестью связывается отсутствие потерь любой задачи (функции) из-за отказов элементов, что должно обеспечиваться развитыми средствами технического диагностирования, восстановления и реконфигурации / 26 /.

Содержательная суть формулировок "живучести" систем, объектов заключается в следующем:

1) это внутреннее свойство системы, объекта, которым она (он) обладает независимо от возникающих в данный момент времени условий функционирования;

2) это свойство в полной мере проявляется при крупных внешних воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации.

Исходя из вышеизложенного определим живучесть ОТС, РСУ и общепланетного автоматического комплекса в целом как свойство объекта, системы комплекса сохранять и восстанавливать способность к обеспечению выполнения целевой задачи путем реализации основных целевых задач (целенаправленных) функций в заданном объеме и в течение заданной наработки при изменении структуры комплекса и (или) алгоритмов и условий его функционирования вследствие неблагоприятных воздействий.

В качестве неблагоприятных воздействий выступают на земле:

1) природные явления (ураганный ветер, штормовые волны в океане, пожары, чрезмерные осадки, землетрясения, удар линейной молнии);

2) нештатные режимы работы (выход из строя основных систем энергообеспечения, термостатирования и системы по созданию вакуума);

3) терроризм.

На подъеме ротора в космос:

- 1) природные явления (ураганный ветер, чрезмерные осадки);
- 2) столкновение в воздухе (шаровая молния, удар линейной молнии, птицы и другие летающие объекты);
- 3) штатное отделение и спуск оболочки (штатные колебания).

В космосе:

- 1) столкновение (метеориты, летающие объекты);
- 2) штатные режимы стыковки частей ротора с космическими аппаратами (штатные колебания).

Учет факторов неблагоприятных воздействий требует использования сочетания вероятностных и детерминированных моделей. Некоторые данные отсутствуют и их невозможно получить, а это значит, что анализ живучести необходимо вести в условиях неопределенности с использованием теории игр (критериев Лапласа, Вальда, Гурвица, Сэвиджа) и экспертных оценок.

Поскольку процесс обеспечения живучести развивается во времени, требуются разноплановые решения применительно к конкретному объекту.

В последующей научно-исследовательской работе необходимо дополнительно разработать и применить логико-вероятностную модель для нормирования живучести ОТС, РСУ и общепланетного автоматического комплекса в целом.

2.2. Особенности функционирования общепланетного автоматического комплекса в аспекте безопасности.

Учитывая специфику функционирования (разгон, запуск и подъем) ОТС предполагается возможность возникновения отказа-аварии. Для ликвидации процесса развития отказа-аварии применяются специальные устройства защиты.

Принципиальная возможность защиты от аварий обусловлена тем,

что авария, как очевидно, возникает не мгновенно. Сначала в результате отказа элементов ОТС или изменений внешних условий создается некоторая аварийная ситуация с характерными симптомами, которые можно своевременно обнаружить. Аварийная ситуация переходит в аварию, если не будут приняты соответствующие меры. Задача устройства защиты и состоит в своевременном обнаружении аварийной ситуации и останове ротора-маховика в ОТС до того, как аварийная ситуация перейдет в аварию, т.е. в переводе, отказов-аварий в ранг отказов-остановов. Из сказанного очевидно, что надежность свойства ОТС, РСУ и ОАК в целом должны задаваться отдельно по отказам-остановам и отказам-авариям.

При исследованиях необходимо разработать модели функционирования, при которых:

- 1) устройство защиты за расчетное время  $T$  не обслуживается;
- 2) устройство защиты за расчетное время  $T$  обслуживается периодически;
- 3) система сохраняет лишь основные функции, которые она должна выполнять при нормальной работе;
- 4) система должна обладать свойством постепенной деградации по мере увеличения тяжести неблагоприятных последствий и для каждого уровня таких последствий уметь оперативно и максимально эффективно использовать сохранившиеся ресурсы для выполнения основных функций с учетом изменения целевой задачи, а в дальнейшем реализовать оптимальную стратегию восстановления с учетом возникающих ограничений.

### 3. ОБЗОР И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ, КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В начале рассмотрим нормативно-технические и методические документы по выбору и оптимизации показателей надежности.

К настоящему времени в СССР разработан и действует ряд методик по выбору показателей и норм надежности.

Методические указания / 27 / содержат методику выбора номенклатуры нормируемых показателей надежности технических устройств. Методика определяет выбор таких показателей надежности изделия, которые входят в общую оценку эффективности его функционирования. Эти показатели количественно учитывают отдельные свойства надежности (безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость), а также степень и характер их влияния на выполнение изделием возложенных на него функций. При выборе номенклатуры нормируемых показателей надежности учитываются:

факторы конструктивного решения;

факторы характера и режима использования изделия по назначению (принципы ограничения длительности эксплуатации, временной режим использования изделия);

факторы последствий отказов.

В зависимости от сочетаний перечисленных факторов устанавливается 35 шифров изделий. По сочетаниям шифров изделия разбиваются на 10 групп. Каждой из групп соответствуют определенные показатели надежности численностью от одного до четырех. Всего согласно / 27 / может нормироваться до 16 показателей надежности.

В методике описан порядок выбора показателей надежности, даны необходимые термины и определения, примеры выбора показателей надежности, подробно разъяснены основные положения принятого подхода.

Методика / 28 / выбора норм надежности технических устройств непосредственно примыкает к / 27 /. В основу / 28 / также положено составление шифров изделий в зависимости от сочетаний различных факторов и разбивка изделий на 10 групп, каждой из которых соответствует свое сочетание показателей надежности.

Себестоимость изделия считается функцией надежности, при этом перечисляются известные по литературным источникам формулы (см. ниже). При этом отмечается, что применение функциональной зависимости между стоимостью и надежностью может быть возможно при наличии большого опыта производства и эксплуатации технических устройств конкретного вида и что вряд ли можно предполагать наличие зависимости единого вида для различных типов устройств.

Далее указано, что для ориентировочной оценки оптимального уровня надежности проектируемых устройств можно пользоваться подобными рода зависимостям. В то же время эти зависимости не учитывают взаимосвязи различных показателей надежности, которые в ряде случаев используются совместно. Поэтому используется сложный метод анализа характера роста себестоимости в зависимости от мероприятий, увеличивающих надежность.

В зависимости от себестоимости, показателей надежности и экономических показателей эксплуатации по формулам, разработанным для каждой из 10 групп, определяется так называемое приведенное значение коэффициента нормирования надежности для всех возможных вариантов изготовления устройства. Затем в качестве норм надежности выбираются значения показателей надежности того варианта устройства, который обеспечивает получение максимального приведенного значения коэффициента нормирования надежности.

В методике / 28 / содержатся определенные теоретические обоснования принятого подхода, в том числе - вывод основных формул с учетом разновременности затрат на повышение надежности и затрат,

обусловленных ненадежностью. Однако следует подчеркнуть, что основное понятие методики - приведенное значение коэффициента нормирования надежности по существу никак не разъясняется, а формулы для определения этого коэффициента показаны без вывода. Необходимо отметить, что упомянутый выше метод анализа характера роста себестоимости в зависимости от мероприятий, увеличивающих надежность, не получил в / 28 / какого-либо описания.

С методиками / 27 / и / 28 / тесно связана методика / 29 /, где обосновываются методы разбиения изделий на группы по надежности, которые должны служить объективными критериями при оценке уровня надежности. Необходимость в таком разбиении обуславливается тем, что в силу ряда причин (отклонение от требований стандартов и чертежей, нарушение технологии, дефекты изготовления и т.п.) надежность изделий после их изготовления может оказаться ниже нормы, являющейся согласно / 29 /, оптимальным значением показателя надежности.

Разбиение по группам производится в соответствии с действительным уровнем надежности. Отнесение изделия к определенной группе в зависимости от уровня надежности может явиться весомым фактором при установлении качества изделия, а, следовательно, и его цены, что может оказаться существенным экономическим стимулом повышения уровня надежности.

Верхний уровень надежности принимается соответствующим оптимальному приведенному значению коэффициента нормирования надежности. За нижний уровень принимается значение показателя надежности, при котором величина приведенного значения коэффициента нормирования надежности равна единице.

Число групп надежности должно соответствовать числу уровней качества (сортов), устанавливаемых для конкретного вида изделий. Деление на группы производится в зависимости от величины приведен-

ного значения коэффициента нормирования надежности.

Документ / 30 /, одновременно являющийся государственным стандартом СССР и стандартом СЭВ, по названию посвящен правилам задания в стандартах и конструкторских документах нормируемых показателей надежности. Однако содержание документа выходит за рамки названия, поскольку в нем, так же, как и в / 27 /, даются принципы выбора номенклатуры показателей надежности. Принципы выбора номенклатуры показателей надежности, принятые в / 30 /, представляются логичными, однако они очень слабо увязаны с принципами в / 27 /.

Согласно / 30 / выбор показателей надежности происходит в зависимости от отнесения рассматриваемого изделия к определенному классу (I - невозстанавливаемые; 2 - невозстанавливаемые, не-ремонтируемые или подвергаемые обезличенному ремонту определенного вида изделия самостоятельного целевого назначения или предназначенные для использования в качестве элементов в изделии определенного вида; 3 - восстанавливаемые изделия), в определенной группе надежности (I, II, III) по последствиям отказов; в зависимости от режима эксплуатации (непрерывный, циклический, оперативный, общий) и от ограничений длительности пользования (непрерывный, вынужденное). В итоге получается 32 комбинации, включающие от одного до пяти показателей надежности. (Согласно / 27 / таких комбинаций всего 10).

Подводя итоги рассмотрению работ / 27-30/ подчеркнем, что /27/ и /30/ посвящены выбору номенклатуры показателей надежности изделий, в /28/ содержится выбор оптимального (по определенному критерию надежности) технического устройства из числа принятых к рассмотрению технических устройств, в / 29 / - принципы разделения технических устройств на группы по значениям того же критерия. Синтез изделия на основе выбора составляющих его элементов с оптимальными уровнями показателей надежности рассматривается в ме-

тодике / 31 /. Конкретно в / 31 / содержится решение задачи выбора уровней показателей надежности статистически независимых элементов изделия, так что при минимуме суммарной стоимости достигается заданный уровень показателя надежности изделия. Исходными данными при решении задачи являются:

- а) зависимости показателей надежности элементов от их стоимости в виде наборов пар значений;
- б) требуемый уровень показателя надежности изделия;
- в) результаты дополнительного расчета (для соответствующей модели резервирования) показателя надежности элементов в функции от стоимости.

Решение задачи состоит из формирования возможных вариантов выполнения элементов изделия и дальнейшего упорядоченного перебора этих вариантов. Упорядочение перебора в методике / 31 / основывается на принципе оптимальности динамического программирования, когда используется последовательная процедура максимизации (минимизации) на каждом шаге.

Характерно, что оптимизация производится с учетом только одного показателя надежности, причем зависимость этого показателя для отдельных элементов изделия от стоимости принимается известной. Конкретные показатели надежности в / 31 / не указаны.

Таким образом, анализ действующих нормативно-технических документов по выбору и оптимизации показателей надежности изделий показал, что только / 27-29 / полностью взаимно увязаны между собой. При решении задач, поставленных перед настоящим исследованием, перечисленные документы частично смогут быть использованы, однако на их основе нельзя непосредственно получить ответы на поставленные задачи.

Вопросы рационального выбора номенклатуры и численных значений показателей надежности технических изделий и их элементов рассмат-



риваются в ряде книг.

Рассмотрим требования к надежности систем. В качестве задаваемых параметров надежности предлагается выбирать:

для восстанавливаемых систем многократного действия

$T_0$  - наработку на отказ,

$T_B$  - среднее время восстановления (не во всех случаях);

для невосстанавливаемых систем однократного действия

$P(t)$  - вероятность безотказной работы за оперативное время

После того, как определены и заданы количественные требования к надежности системы, предлагается рационально распределить их по отдельным элементам, входящим в систему. При решении такой задачи в общем случае должны учитываться такие факторы, как сложность элемента, назначение и степень его важности при выполнении общей задачи системы, режимы и условия работы.

Предлагается в случае последовательного соединения элементов (устройств) системы и равноценности элементов с точки зрения влияния их надежности на эффективность системы распределять наработку на отказ обратно пропорционально количеству первичных модулей, входящих в эти устройства.

Если  $T_0$  - наработка на отказ системы,  $N$  - общее количество первичных модулей в системе,  $N_i$  - количество элементов в произвольном устройстве  $i$ , то требуемая наработка на отказ этого устройства

$$T_{0i} = \frac{N}{N_i} T_0, \quad (3.1)$$

Следовательно, величина  $T_{0i}$  здесь обратно пропорциональна сложности устройства.

В книге / 32 / рассматривается следующая модель для определения стоимости мероприятий по повышению надежности в процессе разработки и производства аппаратуры:

$$C_n = C_0 \left( \frac{\lambda_{cp}}{\lambda_{cp.n}} \right)^\alpha, \quad (3.2)$$

где  $C_0$  - дополнительные затраты по обеспечению надежности аналогичной аппаратуры ("стандартная" стоимость надежности);

$\lambda_{cp}$  - средняя интенсивность отказов проектируемой аппаратуры;

$\alpha$  - коэффициент, зависящий от уровня разработки и производства, имеющий по опытным данным значения, близкие к единице (примерно от 1,5 до 0,5).

Для того, чтобы в системе не оказалось "слабых мест" с точки зрения надежности, целесообразно в основу распределения требований к надежности положить принцип учета степени сложности устройства и ответственности выполняемых функций в общей задаче системы.

Сложность устройства авторы в / 32 / предлагают оценивать количеством входящих в него равнонадежных модулей (каскадно). Степень ответственности устройства в выполнении общей задачи системы можно оценивать коэффициентом значимости  $K_{si}$  который численно равен вероятности того, что отказ данного устройства приведет к невыполнению системой задания и определяется отношением

$$K_{si} = \frac{P_c}{P_i}, \quad (3.3)$$

где  $P_c$  - число срывов задания вследствие отказа  $i$ -го устройства за некоторый период времени или за некоторое число операций;

$P_i$  - общее число отказов данного устройства за тот же период или за то же число операций.

Полная вероятность выполнения задачи системой представляется следующим соотношением:

$$P = \prod_{i=1}^K \left( 1 - K_{si} \frac{t_i}{T_{oi}} \right), \quad (3.4)$$

где  $T_{oi}$  - наработка на отказ  $i$ -го устройства;

$t_i$  - оперативное время работы для  $i$ -го устройства

Для требуемого значения наработки на отказ  $i$ -го устройства

получается следующее выражение:

$$T_{oi} \approx \frac{N K_{zi} t_i}{N_i \ln \rho} \quad (3.5)$$

Формула (3.5) справедлива при условии, что все устройства системы не имеют резких различий с точки зрения их влияния на успех выполнения поставленной задачи. В противном случае при ее использовании могут быть значительные ошибки в расчете требуемой наработки на отказ.

Если оперативное время  $t_i$  для всех устройств системы одинаково, то, учитывая, что  $\frac{t_i}{\ln \rho} T_o$  можно формулу (3.5) записать в следующем виде:

$$T_{oi} = \frac{N}{N_i} K_{zi} T_o, \quad (3.6)$$

где  $T_o$  - заданная наработка на отказ системы.

В книге (3.3) приводятся развернутые формулы для дополнительных затрат на мероприятия конструкторского, производственного и эксплуатационного характера по повышению надежности и долговечности изделий. Далее отмечается, что в экономико-математических исследованиях возможно, абстрагируясь от конкретных способов повышения надежности, применить математическую модель стоимости. В эту модель могут входить различные параметры надежности.

Обозначим через  $C(P_o, P)$  функцию стоимости изделия при повышении его надежности от  $P_o$  до  $P$ . Исходя из физических соображений, можно предположить, что функция  $C(P_o, P)$  должна обладать следующими свойствами:

- 1)  $C(P_o, P) \geq 0$ , так как стоимость - всегда положительная величина;
- 2)  $C(P_o, P)$  не убывает по  $P$  при фиксированном  $P_o$  потому что в большинстве случаев повышение надежности требует дополнительных затрат, т.е. функция является возрастающей;

3)  $C(P_0, 1) = \infty$ , т.к. в реальных условиях проектирования и производства получить абсолютную надежность при конечных затратах невозможно.

Указанным условием могут удовлетворять многие математические функции. Из встречающихся в литературе представляют интерес следующие функции:

$$1) C = C_0 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^a, \quad (3.7)$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda$  - интенсивности отказов, соответствующие надежности  $P_0$  и  $P$ .

В частном случае экспоненциального закона распределения отказов  $P = e^{-\lambda t}$ , где  $t$  - время эксплуатации, выражение (3.7) принимает вид:

$$C = C_0 \left( \frac{\ln P_0}{\ln P} \right)^a. \quad (3.8)$$

В таком виде данное выражение считается возможным применять и для других законов распределения отказов

$$2) C = C_0 \frac{Q_0}{Q} e^{-b(Q - Q_0)}, \quad (3.9)$$

где  $Q = 1 - P, Q_0 = 1 - P_0,$

$$3) C = C_0 \frac{1 - P_0}{P_0} \cdot \frac{P}{1 - P}. \quad (3.10)$$

$$4) C = C_0 \left( 1 + C \ln \frac{Q_0}{Q} \right) \quad (3.11)$$

$$5) C = C_0 \frac{\ln P_0}{\ln P} \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^a. \quad (3.12)$$

По утверждению авторов, рассчитав затраты по повышению надежности по одной из моделей, можно аналогичный результат получить и по другой. Таким образом, при расчетах можно пользоваться любой моделью. Однако для облегчения различных расчетов в технико-эконо-

мических исследованиях повышения надежности необходимо выбрать наиболее простую модель. Этому требованию лучше других удовлетворяет модель (3.10), но она не гибкая, так как в ней нет коэффициента, выбором которого можно аппроксимировать реальную зависимость стоимости от надежности. У других моделей указанный недостаток отсутствует. Наиболее простой из них является модель (3.8), которую и рекомендуется применять для расчетов. Кроме того, в модели (3.8) коэффициент  $a$  может принимать только положительные значения, что соответствует его качественному определению, связанному с эффективностью вложения средств в повышение надежности.

Выбор модели произведен в / 33 / применительно к восстанавливаемым и невосстанавливаемым изделиям при повышении надежности за счет уменьшения интенсивности отказов на стадии проектирования и производства.

Недостатком модели (3.8) в применении для восстанавливаемых систем является то, что она подразумевает повышение надежности системы только путем увеличения среднего времени наработки на отказ  $T$ ; за счет повышения надежности составляющих систему элементов, обеспечения облегченных режимов работы, упрощению схемы. Однако надежность системы многократного использования характеризуется не только средним временем наработки на отказ, но и тем, насколько быстро восстанавливается ее работоспособность после возникновения отказа, то есть средним временем простоя  $T_n$  состоящим в основном из средних времен на отыскание и устранение неисправности. Обобщенным показателем надежности таких систем является вероятность нормального функционирования:

$$P = K_r \cdot P_t = \frac{T}{T + T_n} e^{-t/T} \quad (3.13)$$

где  $K_r = T / (T + T_n)$  - коэффициент готовности;

$P_t$

- вероятность безотказной работы на задан-

ное время  $t$ .

В случае систем, работающих непрерывно, для которых важно максимальное использование полного рабочего времени, выражение (3.13) упрощается

$$P = K_r \cdot P_t = \frac{T}{T + T_n} \quad (3.14)$$

Для таких систем сокращение среднего времени простоя является особенно важным. Встроенный автоматический контроль, простота операций при настройке и регулировке, легкий и свободный доступ к элементам аппаратуры, специальный комплекс удобной легкой и производительной измерительной аппаратуры - все это улучшает ремонтпригодность системы, ведет к уменьшению  $T_n$  а следовательно, повышает надежность системы.

Таким образом, представляется целесообразным, чтобы для системы многократного использования модель стоимости (3.8) учитывала повышение надежности не только за счет увеличения  $T$  но и вследствие уменьшения  $T_n$ . Для этого в формулу (3.2) вместо  $\lambda = (T)^{-1}$  вводится коэффициент простоя  $K_n$  имеющий простую связь с коэффициентом готовности  $K_r$

$$K_n = \frac{T_n}{T + T_n} \quad (3.15)$$

$$K_r = 1 - K_n \quad (3.16)$$

Тогда математическая модель стоимости в зависимости от параметров надежности запишется следующим образом:

$$C = C_0 \left( \frac{K_{n0}}{K_n} \right)^a = C_0 \left[ \frac{T_{n0} (T + T_n)}{T_n (T_0 + T_{n0})} \right]^a \quad (3.17)$$

где  $T_{n0}$  и  $K_{n0}$  - соответственно среднее время простоя и коэффициент простоя системы с существующим уровнем надежности;

$T_n$  и  $K_n$  - идентичные величины для системы повышенной надежнос-

ти.

Далее в / 33 / рассматриваются оптимизационные задачи надежности.

Декларируется, что любую сложную систему можно представить как систему, состоящую из  $n$  последовательно соединенных элементов и надежностью каждого из них. Поэтому для повышения надежности системы необходимо увеличить надежность каждого элемента или путем его резервирования или конструкторско-производственным способом, или в общем случае совместным применением и конструкторско-производственного способа, и резервирования.

Рассматриваются две следующие задачи, известные в теории надежности.

Задача 1. (Прямая). При минимально возможных затратах повысить надежность системы до заданного значения  $P_3$

Задача 2. (Обратная). Получить максимально возможную надежность при заданных затратах  $C_3$

В общем случае указанные задачи могут быть решены: методом перебора; методом неопределенных множителей Лагранжа; методом динамического программирования; методом градиентов и наискорейшего спуска и др.

А. МЕТОД ПЕРЕБОРА ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ применим, если число элементов, составляющих систему, невелико и искомый экстремум достигается при малых значениях  $n_i$  (при резервировании). Решение находится из сопоставления всех возможных вариантов системы, составленных путем перебора всех возможных комбинаций соединений вариантов элементов в системе.

Б. МЕТОД НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА общеизвестен. Применение его для решения прямой и обратной задач оптимального резервирования требует наличия аналитической связи между показателями стоимости и надежности. Кроме того, получаемые решения не яв-

ляются целочисленными и должны округляться. Как отмечено в / 33 / "сложность решения определяет сложность метода".

**В. МЕТОД НАЙСКОРЕЙШЕГО СПУСКА.** Решение методом наискорейшего спуска заключается в том, что отыскивается экстремум функции путем последовательных шагов из начальной точки по направлению градиента или по направлению максимальной частной производной. Удобство этого способа заключается в том, что для решения рассматриваемых задач не нужно знать аналитического выражения функции. Требуется лишь иметь значения функции и ее первых частных производных в момент каждого очередного шага процесса движения к экстремуму функции.

Для приближенного решения указанных прямой и обратной задач без применения ЭВМ авторы / 33 / предлагают определять оптимальное распределение надежности между элементами системы методом уравнивания чувствительностей системы по этим элементам.

Пусть известны функции надежности и стоимости всей системы:

$$\begin{cases} P = P(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ C = C(P_1, P_2, \dots, P_n), \end{cases} \quad (3.18)$$

где  $P_i$  надежность  $i$ -го элемента ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Чувствительностью системы по  $i$ -му элементу называется скорость изменения надежности  $P$  системы в зависимости от изменения ее себестоимости  $C$  при условии изменения этих величин только за счет надежности  $i$ -го элемента:

$$v_i = \frac{dP}{dC} \Big|_{\Delta P_i} = \frac{\partial P / \partial P_i}{\partial C / \partial C_i}, \quad (3.19)$$

где  $\frac{\partial P}{\partial P_i}$  - чувствительность надежности  $P$  системы к изменению надежности  $P_i$   $i$ -го элемента;



$\partial C / \partial c_i$  - чувствительность стоимости  $C$  системы к изменению надежности  $P_i$   $i$ -го элемента.

Метод решения заключается в последовательном движении в направлении небольшой скорости роста функции надежности системы, т.е. в последовательном повышении надежности того элемента, чувствительность системы по которому на данном этапе (шаге) наибольшая. Такой процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено заданное значение надежности  $P_3$ . При этом происходит уравнивание чувствительностей системы по отдельным элементам. Оптимальным распределением надежности между отдельными элементами  $P_i$  является такое распределение, при котором чувствительности системы по этим элементам одинаковы и равны оптимальной чувствительности  $\partial C / \partial c_i = \partial C / \partial c_0$  соответствующей значению надежности  $P_3$ . В частном случае, когда с первого же шага чувствительности равны, то, увеличивая надежность всех элементов в одинаковой мере, достигает нового оптимального распределения при заданном значении надежности.

В рамках задачи I методом уравнивания чувствительностей системы по элементам решаются следующие задачи.

I.1. Повышение надежности системы до заданного значения путем оптимального резервирования отдельных элементов при минимальных затратах.

I.2. Повышение надежности системы до максимально возможного значения путем оптимального резервирования элементов при заданных затратах.

I.3. Повышение надежности системы до заданного значения за счет повышения надежности ее элементов конструкторско-производственными способами при минимальных затратах.

I.4. Повышение надежности системы до максимального возможного значения за счет повышения надежности ее элементов конструкторско-производственными способами при заданных на систему затратах.

1.5. Повышение надежности системы путем совместного применения конструкторско-производственных способов и резервирования.

Обратная задача 2 (получение максимально возможной надежности при заданных затратах  $C_3$ ) решается аналогично задаче 1.2 методом последовательного приближения.

Для тех случаев, когда задачи не могут быть решены точно аналитическим путем, в книге /33/ предложен способ решения методом последовательного приближения. Утверждается, что в большинстве случаев для некоторого приближения к искомому результату достаточно сделать не более трех шагов.

В /34/ автор рассматривает применение метода уравнивания чувствительностей для оптимального распределения требований к надежности между элементами сложной системы, которую в общем случае нельзя представить в виде последовательной цепи, т.е. когда отказ отдельных элементов не обуславливает полного отказа всей системы, а приводит лишь к снижению эффективности ее функционирования.

Вместо функции надежности системы  $P$  предлагается ввести в рассмотрение функцию ее ненадежности  $Q$ , определяемую соотношением

$$Q = 1 - P. \quad (3.20)$$

В этом случае выражение (3.19) для чувствительности системы  $l_i$  по  $i$ -му элементу принимает вид

$$l_i = \frac{dl_i}{dc} \bigg|_{\Delta q_i} = \frac{\partial Q / \partial q_i}{\partial C / \partial q_i}, \quad (3.21)$$

где  $\frac{\partial Q}{\partial q_i}$  - чувствительность ненадежности системы  $Q$  к изменению ненадежности  $i$ -го элемента  $q_i$ ;

$\frac{\partial C}{\partial q_i}$  - чувствительность стоимости системы  $C$  к изменению ненадежности  $i$ -го элемента

В свою очередь

$$q_i = 1 - P_i \quad (3.22)$$

В качестве общего показателя надежности  $P$  как простых, так и сложных систем принимается коэффициент сохранения эффективности системы, определяемый соотношением

$$P = \frac{W}{W_0}, \quad (3.23)$$

где  $W$  - показатель эффективности реальной в смысле надежности системы (реальная эффективность), например, вероятность выполнения системной задачи;  $W_0$  - показатель эффективности идеальной в смысле надежности системы (идеальная эффективность).

С помощью уравнений (3.22) и (3.23) определяется показатель надежности системы, численно равный относительному снижению эффективности системы за счет конечной надежности ее элементов:

$$Q_c = \frac{W_0 - W}{W_0} = \frac{\Delta W}{W_0}. \quad (3.24)$$

Для нахождения чувствительности стоимости системы  $C$  к изменению ненадежности  $i$ -го элемента необходимо знать зависимость стоимости от ненадежности. Считается, что зависимость показателя ненадежности  $i$ -го элемента системы  $q_i$  от материальных затрат  $C_i$  может быть представлен в виде

$$q_i(C_i) = q_{oi} e^{-(C_i - C_{oi})V_i}, \quad (3.25)$$

где  $C_{oi}$  - минимальная стоимость  $i$ -го элемента системы;

$q_{oi}$  - максимальное значение показателя ненадежности  $i$ -го элемента, соответствующее стоимости  $C_i = C_o$ ;

$V_i$  - коэффициент, характеризующий эффективность вложения средств в повышение надежности  $i$ -го элемента.

Коэффициент  $V_i$  имеет размерность показателя материальных затрат  $C_i$ .

Известно, что показатель ненадежности резервированной группы из  $n$  элементов при нагруженном резервировании определяется соотношением

$$q_i = q_{oi} C_i / C_{oi}, \quad (3.26)$$

где  $C_{oi}$  - стоимость  $i$ -го элемента в случае отсутствия резервирования (стоимость одного элемента);  $q_{oi}$  - показатель ненадежности  $i$ -го элемента в случае отсутствия резервирования;

$$C_i = n C_{oi}, \quad (3.27)$$

$C_i$  - стоимость резервированной группы из  $n$  элементов (стоимость элементов).

Приравняв (3.26) и (3.25) и решив полученное выражение с учетом (3.27) относительно  $B_i$  автор / 34 / получает

$$B_i = -C_{oi} / \ln q_{oi}. \quad (3.28)$$

Решение уравнения (3.25) относительно  $C_i$  дает выражение, определяющее стоимость  $i$ -го элемента в функции от показателя его ненадежности  $q_i$

$$C_i = C_{oi} - B_i (\ln q_i - \ln q_{oi}), \quad (3.29)$$

С учетом выражения (3.29) находим соотношение, определяющее стоимость системы в целом

$$C = \sum_{i=1}^n [C_{oi} - B_i (\ln q_i - \ln q_{oi})]. \quad (3.30)$$

С учетом выражения (3.30) чувствительность стоимости системы к изменению ненадежности  $i$ -го элемента  $q_i$

$$\partial C / \partial q_i = -B_i / q_i. \quad (3.31)$$

Наконец соотношение, определяющее чувствительность системы  $\ell_i$  по  $i$ -му элементу:

$$|\ell_i| = q_i^* / B_i, \quad (3.32)$$

где

$$q_i^* = q_i \left[ 1 - \alpha_1^{(i)} \prod_{j \neq i} p_j \right]. \quad (3.33)$$

Оптимальным распределением надежности между элементами системы является такое, при котором чувствительность системы по этим

элементам одинаковы и равны оптимальной чувствительности  $l_i = l_0$

Отсюда

$$Q_{\text{гон}} = \sum_{i=1}^n q_i^* = \sum_{i=1}^n |l_0| B_i = |l_0| \sum_{i=1}^n B_i, \quad (3.34)$$

где  $Q_{\text{гон}}$  - допустимое относительное снижение эффективности функционирования системы за счет конечной надежности  $e$  элементов.

Решение уравнения (3.26) относительно  $|l_0|$  дает соотношение, определяющее оптимальную чувствительность системы:

$$|l_0| = Q_{\text{гон}} / \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.25)$$

На основании выражений (3.32 и (3.25)

$$q_i^* = B_i Q_{\text{гон}} / \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.36)$$

Соотношение (3.36) можно переписать в виде

$$q_i^* = K_i Q_{\text{гон}}, \quad (3.37)$$

где

$$K_i = B_i / \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.38)$$

Применительно к простой системе, которую можно представить в виде последовательно соединенных элементов, т.е. у которой

$$\alpha_1^{(1)} = \alpha_1^{(2)} = \dots = \alpha_1^{(i)} = \dots = \alpha_1^{(n)} = 0$$

и, следовательно  $q_i^* = q_i$  задача оптимального с точки зрения затрат распределения надежности между элементами системы решается уравнениями (3.37) и (3.38).

Для сложных систем, у которых отказ отдельных элементов не обуславливает полного отказа всей системы, а приводит лишь к снижению эффективности ее функционирования по найденным с помощью соотношения (3.37) и (3.38) значениям  $q_i^*$  на основании (3.33) составляется система из  $n$  уравнений:

$$\begin{cases} q_1^* = q_1 \left[ 1 - d_1^{(1)} \prod_{j \neq 1}^{n-1} P_j \right], \\ q_2^* = q_2 \left[ 1 - \alpha_1^{(2)} \prod_{j \neq 2}^{n-1} P_j \right], \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\left. \begin{aligned} q_i^* &= q_i \left[ 1 - \alpha_1^{(i)} \prod_{j \neq i} P_j \right] \\ \bar{q}_n^* &= \bar{q}_n \left[ 1 - \alpha_1^{(n)} \prod_{j \neq n} P_j \right]. \end{aligned} \right\}$$

Решение системы уравнений (3.39) приводит к определению оптимальных значений показателей ненадежности элементов сложной системы  $q_i (i=1, 2, \dots, n)$  обеспечивающих допустимое относительное снижение эффективности функционирования системы  $Q_{\text{дон}}$  при минимальных экономических затратах, которые определяются по уравнению (3.30) с учетом найденных значений  $q_i$ .

Для целей, поставленных перед настоящим исследованием, представляет особый интерес ряд вопросов, излагаемых в книге / 35 /. Начнем с того, что в книге изделия делятся на два вида. Предлагается различать изделия вида I с двумя уровнями работоспособности - номинальным и нулевым и изделий вида II с многими уровнями, включая уровни пониженной, промежуточной работоспособности.

Подавляющее большинство изделий относится к виду II. Однако это влечет за собой ряд методических усложнений, которые оправданы лишь тогда, когда промежуточные уровни существенно отличаются от номинального и нулевого, а вероятность попадания изделия в соответствующие подмножества состояний не слишком мала. Иными словами, в ряде случаев может оказаться целесообразным внести в оценку некоторую ошибку, но свести все состояния изделия в два подмножества с двумя уровнями работоспособности. Это определяется требуемой точностью исследования.

В книге / 35 / различаются также два вида показателей надежности. Техническими называются такие показатели надежности (ПН), которые характеризуют процессы перехода по состоянию или по уровням  $X(t)$  или  $Y(t)$  вне связи с результатами работы изделия. К ним относятся средняя наработка на отказ (до отказа)  $T$ , среднее

время восстановления  $T_B$ , интенсивность (параметр) отказов  $\lambda$  и восстановлений ( $\mu$  и др.

Оперативными называются такие показатели, которые характеризуют влияние процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  на выходной эффект. К ним относятся, например, коэффициент оперативной готовности  $K_{ог}$ , вероятность безотказной работы в течение времени выполнения задачи  $P(t)$ , коэффициент сохранения эффективности  $K_{эф}$ , выражающий отношение эффективности изделия о реальной надежности к его эффективности при безотказной работе.

Коэффициент готовности  $K_g$  является примером показателя, который может быть техническим и оперативным одновременно. С одной стороны, это вероятность пребывания изделия в подмножестве состояний  $X_c$  в произвольный момент. С другой стороны, если изделие предназначено для выполнения очень коротких задач, то  $K_g$  определяет вероятность того, что выполнение одной такой задачи не будет сорвано отказом.

Представляет значительный интерес и выполненная в книге /35/ систематизация требований, предъявляемых к нормируемым показателям надежности (ПН):

1. ПН должны отражать влияние надежности на выполнение основных функций изделия. ПН, отражающие это влияние, по принятой в /35/ терминологии, называются оперативными.

2. ПН должны определять надежность независимо от характера использования изделия (в том числе от времени выполнения задач, от последствий отказов и т.д.) как свойство собственно изделия, но так, чтобы она полностью определяла "поведение" изделия в работе и позволяла решать все основные задачи, связанные с надежностью. К последним относится и расчет оперативных ПН. Показатели надежности, удовлетворяющие этому требованию, были названы техническими

Отмечается, что удовлетворить одновременно требованиям пп. 1 и 2 нелегко.

3. ПН в той или иной форме должны быть применимы к изделиям с многими уровнями. ПН для изделий с двумя уровнями должны быть их частным случаем.

4. Для всех задаваемых ПН должны существовать методы испытаний, как определительных, так и контрольных.

5. Чем лучше изделие соответствует своему назначению (чем выше эффективность изделия), тем выше должна быть характеристика его надежности и вероятность приемки на испытаниях. Но это естественно требование не выполняется в очень распространенном случае, когда заданы одновременно два показателя надежности:  $T$  и  $T_b$ .

6. Обоснование численных значений задаваемых ПН должно быть максимально облегчено.

7. Выбор ПН для новой техники не должен зависеть от факторов, определяемых в ходе разработки. При составлении технического задания на еще не существующие изделие затруднительно, например, указать число уровней работоспособности, наличие резерва и т.д.

8. Принцип выбора ПН должен охватывать все величины, влияющие на ПН. Прежде всего это относится к времени работы, которое входит в ПН типа  $P(t)$ ,  $K_{ог}$

9. Должны существовать методы, позволяющие рассчитывать ПН на этапе разработки изделия.

10. ПН должны иметь простой физический смысл.

Выбор ПН решающим образом зависит от того, какие требования считаются наиболее важными. Предлагается считать обязательными только требование 3 (применимость результатов к изделиям с многими уровнями) и важнейшим условие: задаваемые показатели вместе с методами их проверки должны обеспечить уровень надежности, достаточный для выполнения изделием его задачи. Фактически это означает, что так или иначе должны быть обеспечены достаточные значения опе-



ративных показателей.

Однако в части выбора количественных значений показателей надежности автор /35/ пришел к ряду неутешительных выводов. Главный из них состоит в том, что при обосновании численных значений нормируемых показателей надежности существенную, а в большинстве случаев даже решающую роль играет интуиция и опыт специалистов. Относительно строгое решение проблемы существует только для изделий конкретного назначения при условии, что эффект от применения изделия и ограничивающие факторы могут быть измерены в одних и тех же единицах (обычно в денежном исчислении).

Построение оптимальной зависимости надежность - стоимость, необходимо в этом случае и желательное в остальных, требует знания слишком многих подробностей о будущем изделии - возможных вариантов структуры, надежности составных частей, системы контроля и т.п. На этапе обоснования требований к изделию, когда разработка еще не началась, все это можно знать очень и очень приближенно.

По утверждению автора /35/ причиной такого положения является не слабость теории надежности, а сама суть проблемы. Это означает, что и в будущем нет оснований ожидать здесь радикальных решений. Поэтому следует оставить иллюзии о строгом обосновании требований к изделию перед началом разработки и ориентироваться на их последовательное уточнение и корректировку по мере получения новой информации. Такой информацией являются прежде всего экспериментальные данные о результатах применения изделия и его надежности, полученные на различных этапах испытаний.

Из материалов /35/ следует также вывод о том, какое большое значение при задании требований имеет информация по изделиям-аналогам.

Это еще раз подчеркивает необходимость систематического сбора и анализа статистических данных по надежности с мест испытаний и

эксплуатации изделий, выпускаемых промышленностью.

В целом критический анализ литературных источников показал, что в настоящее время существует сравнительно немного нормативно-технических документов и книг, посвященных выбору номенклатуры и количественных значений показателей надежности технических устройств. При этом существующие нормативно-технические документы по выбору показателей надежности технических объектов не вполне взаимосвязаны между собой. А в научной литературе зачастую содержится критика нормативно-технических документов, но позитивных предложений сравнительно немного. Однако такие предложения встречаются, поэтому анализ и исследование работ, рассмотренных в настоящем разделе равно как и журнальных статей, заслуживает продолжения и углубления в процессе дальнейших исследований по теме.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ ОБОСНОВАННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К НАДЕЖНОСТИ ОТС

На этапе разработки технических средств при достигнутой технологии можно получить более надежное устройство, увеличив затраты на него. Естественно, что эти затраты необходимо привести в соответствие с требуемой надежностью ОТС, построенного на базе разрабатываемых устройств. Для ОТС большую актуальность приобретает задача такого выбора надежности устройств, для которого выполнялись бы требования по надежности основных функций при минимизации суммарных затрат на систему.

В /36/ - /40/ и некоторых других работах решалась подобная задача для однофункциональных систем в предположении, что надежность устройств есть непрерывная функция затрат. В настоящей работе должна быть решена задача в предположениях, приближенных к реальности:

- ОТС является многофункциональной:
- надежность устройств при достигнутой технологии можно изменить за счет проведения конечного числа мероприятий, поэтому затраты на устройство, как функция надежности, являются функциями дискретного аргумента;
- в ОТС могут быть несколько однотипных устройств (несколько устройств линейного двигателя, магнитного подвеса и т.д.).

##### 4.1. Постановка задачи

Пусть ОТС состоит из  $m$  устройств с номерами  $1, 2, \dots, m$  (в дальнейшем также устройства  $1$ -е,  $2$ -е,  $\dots, m$ -е). Устройства подразделены на  $q$  групп,  $q \leq m$ . Устройства, относящиеся к одной группе, однотипные. Устройства, относящиеся к различным группам, различные. Пусть  $a_{ij}$  - индикатор того, что  $i$ -е устройство принадлежит  $j$ -й группе.

$a_{ij} \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е устройство принадлежит } j\text{-й группе} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Каждое устройство может находиться только в работоспособном или неработоспособном состоянии. Отказы устройств независимы. ОТС выполняет  $Z$  функций;  $j$ -я функция считается отказавшей, если отказало хотя бы одно устройство из набора  $\mathcal{H} = (i_1, \dots, i_j)$ ,  $j = \overline{1, Z}$ ,  $1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_j \leq m$ ,  $i_k$  номер устройства. ОТС характеризуется затратами видов ресурсов (стоимость, потребление электроэнергии, вес, объем и т.д.). Пусть первый ресурс (стоимость) подлежит минимизации, причем стоимость устройства  $i$ -й группы ограничена величиной  $\underline{c}_i$  снизу и  $\overline{c}_i$  сверху,  $i = \overline{1, q}$

Пусть надежность устройств однозначно определяется их стоимостью. Пусть  $l_i(c_i)$  - показатель надежности одного устройства  $i$ -й группы при стоимости этого устройства, равной  $c_i$ , причем  $l_i(c_i)$  - монотонно убывающая функция. Этим показателем может быть логарифм вероятности безотказной работы устройства  $i$ -й группы за заданное время, взятый со знаком минус. Если функции распределения времени безотказной работы всех устройств экспоненциальные, то в качестве  $l_i(c_i)$  можно использовать интенсивность отказов устройства  $i$ -й группы,  $i = \overline{1, q}$

Пусть  $w_{ij}(l_i)$  затраты  $j$ -го ресурса на одно устройство  $i$ -й группы при его надежности, характеризующейся величиной  $l_i$ :

$$w_j(l) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^q \alpha_{ik} w_{kj}(l_k) - \text{затраты } j\text{-го ресурса в ОТС; } w_{ii}(l_i) = c_i(l_i), w_i(l) = c(l).$$

Пусть  $v_{ij}$  - индикатор того, что  $i$ -е устройство участвует в выполнении  $j$ -й функции ОТС,

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & i \in \mathcal{H}_j \\ 0, & i \notin \mathcal{H}_j \end{cases} \quad (4.1)$$

Тогда показатель надежности  $j$ -й функции  $h_j(l)$  в соответствии с критерием ее отказа представим в виде

$$h_j(l) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^q \alpha_{ik} \cdot v_{ij} \cdot l_k(c_k). \quad (4.2)$$

При введенных обозначениях задача ставится следующим образом. Надо найти набор  $l = (l_1(c_1), \dots, l_q(c_k))$ , минимизирующий стоимость ОТС при обеспечении заданной надежности функций ОТС и выполнении ограничений по выделенным типам ресурсов:

$$C(l) \rightarrow \min; \quad (4.3)$$

$$L_i(l) \leq L_i, i = \overline{1, r}; \quad (4.4)$$

$$W_j(l_i) \leq W_j, j = \overline{2, s}; \quad (4.5)$$

$$\underline{C}_i \leq C_i \leq \overline{C}_i, i = \overline{1, m}. \quad (4.6)$$

Если показатели  $L_i(l)$  и  $L_i$  есть функции времени, то условия (4.4) должны выполняться на заданном отрезке времени.

Задача (4.3 + 4.6) должна решаться при естественном предположении, что надежность устройств одной группы одинаковая и изменение надежности производится одновременно для всех устройств группы.

#### 4.2. Зависимости $W_{ij}(l_i)$

Задача (4.3 + 4.6) может быть решена, если известны функции

$$W_{ij}(l_i), i = \overline{1, q}; j = \overline{1, s}.$$

Повысить надежность устройства можно за счет проведения некоторых мероприятий. Так, для электронной аппаратуры такими мероприятиями являются золочение контактов, введение резервного элемента, использование более надежного элемента, проведение более тщательного входного контроля поставляемых другими организациями материалов для изготовления элементов, более тщательный выходной контроль изготовленных элементов, более точная технология изготовления элементов и т.д. Таких мероприятий — конечное число, и внедрение каждого из них может потребовать затраты ресурсов (например, золочение контактов повышает стоимость устройства). Поэтому в рамках некоторой фиксированной технологии можно считать, что  $W_{ij}(l_i)$  — монотонно убывающие функции дискретного аргумента.

Остановимся несколько подробнее на функциях  $li(C_i)$ . При заданных технологии и ценах эти функции строго монотонно убывающие и они определены на конечном числе точек убывания  $C_i^{(j)}, j = \overline{0, ti}$ ,

$C_i = C_i^{(0)} < \dots < C_i^{(ti)} = \overline{C_i}$  Это значит, что показатель надежности устройства  $i$ -й группы и его стоимость могут принимать только значения  $li(C_i^{(j)})$  и  $C_i^{(j)}, j = \overline{0, ti}$ , причем  $li(C_i^{(j)}) \leq P_i(C_i^{(k)})$  если  $C_i^{(j)} > C_i^{(k)}$ . Для устройства  $i$ -й группы при  $C_i = C_i^{(j)}$

возможно минимальное изменение его стоимости, равное только  $\Delta^+(C_i^{(j)}) = C_i^{(j+1)} - C_i^{(j)}$  или  $\Delta(C_i^{(j)}) = C_i^{(j)} - C_i^{(j-1)}$ .

Скажем, что функция  $li(C_i)$  выпуклая, если для любых  $\underline{C_i} \leq C_i < C_i^k < \overline{C_i}$

$$\frac{li(C_i) - li(C_i + \Delta^+(C_i))}{\Delta^+(C_i)} \geq \frac{li(C_i^k) - li(C_i^k + \Delta(C_i^k))}{\Delta(C_i^k)} \quad (4.7)$$

Ниже приведены некоторые из опубликованных в литературе зависимостей  $li(C_i)$ . Все эти зависимости представлены как функция непрерывного аргумента.

В / 36 / дается зависимость стоимости  $C_i$  от надежности  $Z_i$  (вероятность безотказной работы)  $i$ -го устройства в виде

$$C_i = \frac{K_{1i}}{1 - Z_i(C_i)} \exp\{-K_{2i}[1 - Z_i(C_i)]\}, \quad (4.8)$$

где  $K_{1i}$  и  $K_{2i}$  - некоторые коэффициенты. Уравнение (4.8) не может быть разрешено относительно  $Z_i(C_i)$ . Поэтому вместо (4.8) предлагается зависимость (4.9), которая в области  $0,9 < Z_i(C_i) < 1,0$  дает приблизительно те же значения надежности и стоимости, что и

$$(4.8) \quad Z_i(C_i) = a_i + b_i \log C_i \quad (4.9)$$

Здесь  $a_i$  и  $b_i$  - коэффициенты;  $0 < a_i < 1$ ;  $b_i > 0$ , но достаточно мало. В иллюстрационном примере

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,97910, & a_2 &= 0,97530, & a_3 &= 0,98086 \\ b_1 &= 0,00138, & b_2 &= 0,00771, & b_3 &= 0,00116 \end{aligned}$$

Ставится задача максимизации надежности системы при ограничении ее стоимости величиной 1500. Коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  получены из аппроксимации для зависимостей

$\tau_1$	$C_1$	$\tau_2$	$C_2$	$\tau_3$	$C_3$
0,999	1820	0,999	1030	0,999	6310
0,995	100	0,995	100	0,995	200

В / 37/ зависимость стоимости  $C_i$  от надежности  $i$ -го устройства в виде

$$C_i = a_i \exp\{b_i / (1 - \tau_i)\}, \quad (4.10)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  - некоторые коэффициенты. В приведенном примере

$$\begin{aligned} a_i &: 1,00 ; 3,50 ; 2,0 ; 5,00 \\ b_i &: 0,30 ; 0,55 ; 0,40 ; 0,65 . \end{aligned}$$

В / 38/ зависимость стоимости  $C_i$  от интенсивности отказов  $\lambda_i$   $i$ -го устройства представлена в виде

$$C_i(\lambda_i) = \alpha_i \lambda_i^{-\beta_i} - \beta_i, \quad (4.11)$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  - константы,  $\beta_i > 1$ . В примере  $\beta_i = 1,5$  при

$$i = 1,5, \text{ а } 10^5 \alpha_i: 2,33 ; 1,45 ; 0,541 ; 8,05 ; 1,95 .$$

В / 39/ зависимость стоимости  $C_i$  от надежности  $\tau_i$   $i$ -го устройства приводятся в виде

$$C_i = K_i \cdot \tau_i^{\alpha_i}, \quad (4.12)$$

где  $K_i$  и  $\alpha_i$  - константы. В приведенном примере  $\alpha_i = 0,6$  для

$$i = 1,4, \text{ а } K_i: 100 ; 100 ; 200 ; 150 .$$

В / 40/ рассмотрен случай, когда вероятность безотказной работы устройства имеет вид

$$\tau_i(t) = \exp\{-\lambda_i t\}^{\beta_i}, \quad \beta_i > 1, \quad (4.13)$$

(распределение Вейбулла). В этом случае стоимость  $i$ -го устройства при заданном параметре  $\beta_i$  приближается выражением

$$C_i(\lambda_i) = a_i \left\{ \log_{10} [b_i / (\lambda_{in} - \lambda_{in})] \right\}^{\alpha_i}, \quad (4.14)$$

где  $\lambda_{in}$  и  $\lambda_{in}$  - наибольшая нижняя граница и наименьшая верхняя граница  $\lambda_i$  (при данной технологии).

$a, b_i, d_i$  - константы.

В примере  $a_i = 10^2, b_2 = 1, d_i = 2, i = 1, 4$

$b_i : 1, 2 ; 1, 3 ; 1, 2 ; 1, 3 ;$

$\lambda_{ik} : 0, 1 ; 0, 1 ; 0, 08 ; 0, 08 ;$

$\lambda_{in} : 0, 5 ; 0, 5 ; 0, 5 ; 0, 5.$

Для функций ОТС, требующих высокую надежность, необходимо рассмотреть и другие способы обеспечения надежности выполнения функций за счет введения резервирования и изменения технического обслуживания. Надо рассмотреть комплексный подход одновременно учитывающий: обеспечение надежности выполнения функциональных задач комплекса за счет обоснованных требований к надежности устройств ОТС, введения резервирования, изменения технического обслуживания; обеспечение облегченных режимов функционирования для компонент (элементов, узлов, устройств); введение встроенного контроля, обеспечивающего автоматическое выявление неисправностей (диагностирование) в процессе эксплуатации и устройств, осуществляющих автоматическое устранение неисправностей или ослабление их действия; применение органических надежных принципов построения общепланетного автоматизированного комплекса (введение функциональной избыточности).



## 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ

На основании материалов разделов I-4 можно указать на следующие основные направления выполнения научно-исследовательских работ по данной теме.

### 5.1. В аспекте надежности

5.1.1. Должна быть разработана методика нормирования и расчетной оценки показателей надежности функционирования общепланетного транспортного средства (ОТС) распределенной системы управления с сетевой структурой (PCY) и общепланетного автоматического комплекса (ОАК) в целом. Методика должна устанавливать методы выбора критериев отказов и состава показателей надежности общепланетного автоматического комплекса, содержать рекомендации по определению требуемых количественных значений показателей надежности комплекса и по выбору методов (например, асимптотических) расчетной оценки показателей надежности комплекса.

5.1.2. Должна быть разработана методика распределения надежности по программно-техническим средствам с учетом требований к надежности ОТС, PCY и ОАК в целом.

Для использования методики должны быть сформированы исходные данные, необходимые при обосновании требований к надежности программных и технических средств (например, зависимости стоимости технических средств от их надежности; надежности программно-технических средств от их быстродействия и т.д.); проведена оценка влияния точности исходных данных на надежность комплекса; разработаны рекуррентные формулы для марковского процесса с конечным множеством состояний.

5.1.3. На основе исходных данных по разработанным методикам произвести расчет количественной оценки показателей надежности для

ОТС, РСУ и АОК в целом.

Работы по данному направлению заканчиваются представлением материалов в виде промежуточного отчета о научно-исследовательской работе по надежности ОТС.

5.2. В аспекте живучести и безопасности

5.2.1. Должна быть разработана логико-вероятностная модель живучести ОТС, РСУ и АОК в целом.

5.2.2. Должна быть разработана концепция методики анализа живучести ОТС, РСУ и АОК в целом.

По исходным данным должна быть проведена количественная оценка живучести технических средств и ОТС в целом.

5.2.3. Необходимо разработать модели функционирования ОТС при которых устройства защиты за расчетное время " $\tau$ " не обслуживается или обслуживается периодически.

По исходным данным аварийного характера должна быть проведена количественная оценка надежности ОТС.

Работы по данному направлению заканчиваются представлением материалов в виде промежуточного отчета о научно-исследовательской работе по живучести и безопасности ОТС.

В целом по теме будет составлен заключительный отчет, представляемый в центр "Звездный мир".

Анализ результатов, получаемых по данной теме, позволит определить пути дальнейших исследований в рассматриваемом направлении и обеспечить необходимый уровень надежности, живучести и безопасности ОТС, РСУ общепланетного автоматического комплекса в целом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа конфигураций и функционирования различных моделей ОТС выбраны основные направления исследований по установлению обоснованных требований по надежности технических средств с учетом требований к надежности ОТС, РСУ и общепланетного автоматического комплекса.

Показана сложность решений задачи, указано на необходимость комплексного подхода к проведению исследований.

Поставлены конкретные задачи перед исполнителями работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лернер Э.Дж. Альтернатива "запуску на авось" // Аэрокосмическая техника. - 1987. - № 9. - с.157-160.
2. Юницкий А.Э. В космос - без ракеты. // Техника и наука 1987. № 4. с.40-43.
3. Юницкий А.Э. Спасательный круг планеты. // "Век XX и мир". 1987. № 5. с.14-19.
4. Программа "ЭКОМИР". Гомель.: Центр "Звездный мир", 1988. 70с.
5. Зелькин Н.Г. Летающие экспрессы - Мн.: Выш.шк. 1984. 154с.
6. Генкин В.В. В поезде, как в космическом корабле. // "Энергия экономика, техника, экология". 1985. № 9. с.38.
7. Кришнев В.К. и др. Системно-функциональный подход к задачам исследования надежности и эффективности автоматизированных технологических комплексов. // Информационный бюллетень по химической промышленности. М.: Секретариат СЭВ, 1984. Вып. 4 (107).
8. Кришнев В.К., Притыка Г.М. Принципы обеспечения и повышения надежности и эффективности автоматизированных химико-технологических комплексов // В сб. трудов Всесоюзной конференции АСУ технологическими процессами и производствами в энергетике, металлургии, химии и нефтехимии. М.: ЦНИИКА, 1987 с.24-25.
9. Кришнев В.К., Ястребенецкий М.А., Мешалкин В.П. Системный подход к проблеме надежности и эффективности автоматизированных химико-технологических комплексов. // В кн.: Опыт разработки и внедрения АСУ в основной химии. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1985. с.12-13.
10. Кришнев В.К. и др. Повышение эффективности промышленных кибернетических систем // В ст. тезисов докладов научно-технической конференции "Опыт создания, внедрения, эксплуатации, исследования и повышения качества и эффективности функционирования АСУ". Минск : ЦЭТИ, 1985, с.25-26.
11. Кришнев В.К., Мешалкин В.П. Системно-функциональный подход к проблеме обеспечения надежности и эффективности автоматизированных химико-технологических комплексов. // В сб. научных трудов У Всесоюзной конференции "Математическое моделирование

- сложных ХТС (СХТС-У-88). Казань: НИУИФ, 1988. с.16-17.
12. Кришнев В.К., Ястребенецкий М.А. Системный анализ влияния надежности на эффективность автоматизированных химико-технологических комплексов // В сб. научных трудов ЦНИИКА УАСУ ТП для химических производств". М.: Энергоатомиздат, 1988. с.37-39.
13. Кришнев В.К. Методика исследования функциональной надежности АСУ серноокислотных производств. // В кн.: Опыт разработки и внедрения автоматизированных систем управления в основной химии. М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1983. с.49-50.
14. Кришнев В.К. Влияние надежности на эффективность функций непосредственного цифрового управления АСУ серноокислотных производств // Вопросы промышленной кибернетики // Труды ЦНИИКА М.: Энергия, 1980, Вып. 63. С.11-13.
15. *Gele' C., Mansion D. Les Systemes de controle - regulation pour procedes industriels presentes a Mexico - Le Nouvel Automatism 1980, Vol. 25, N11, p. 25-31*
16. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988 - 168с.
17. Прангишвили И.В. Тенденция развития вычислительной техники в период 1987-1995г.г. // Приборы и системы управления. 1987, № II с. 4-6.
18. Волков Л.И., Шихкевич А.М. Надежность летательных аппаратов. - М.: Высшая школа, 1975- 296с.
19. Инженерный справочник по космической технике. Инд. 2-е Под ред. А.В. Солодова. М.: Воениздат, 1977 - 830с.
20. Раков А.И. Надежность радиорелейных и спутниковых линий передачи. - М.: Радио и связь. 1981. - 160с.
21. Управление воздушным движением / Т.Г. Анадина, С.В. Володин, В.П. Карпов, В.И. Мокшанов. - М.: Транспорт 1988. - 299с.
22. Астров В.В., Симаков И.П., Черкесов Г.Н. Применение методов вероятностной логики и исследования операций к анализу живучести пространственно распределенных энергетических систем//

- В кн.: Методические вопросы исследования больших систем энергетики. - Вып. 20 - Иркутск: СЭ СО АН СССР, 1980. - С.32-42.
23. Горшков В.В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем // Кибернетика АН УССР. 1982. №1 с. 104-107
  24. Большая советская энциклопедия. - Т.9. - М.: Советская энциклопедия. 1972. С.569.
  25. Коган Б.М., Долкарт В.М., Каневский М.М. Управляющий вычислительный комплекс с автоматической реконфигурацией для ответственных АСУ ТП // В кн.: Кибернетические проблемы АСУ ТП: Материалы семинара - М.: Знание, МДНТП. 1978. с.3-11.
  26. Руденко Б.Н., Ушаков И.Н. Надежность систем энергетики.- М.: Наука, 1966. 252с.
  27. Методические указания МУ 3-69. Методика выбора номенклатуры нормируемых показателей надежности технических устройств. М.: Изд-во стандартов, 1970. 36с.
  28. Методика выбора норм надежности технических устройств. М.: Изд-во стандартов, 1971. 24с.
  29. Методика по выбору групп надежности промышленных изделий. М.: Изд-во стандартов, 1979. 29с.
  30. ГОСТ 23642-79 (СТ СЭВ 878-78). Надежность в технике. Нормируемые показатели надежности. Правила задания в стандартах и конструкторских документах. М.: Изд-во стандартов, 1981. 19с.
  31. Методика выбора оптимальных уровней показателя надежности элементов изделия. М.: Изд-во стандартов, 1977. 38с.
  42. Шишонко Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М.: "Сов.радио", 1964. 437с.
  33. Кулаков Н.Н., Загоруйко А.О. Методы оценки повышения надежности технических изделий по технико-экономическим показателям. Новосибирск: "Наука", Сибирское отделение, 1969. 124с.

34. Кузьмин Ф.Н. Задачи и методы оптимизации показателей надежности. М.: "Сов.радио", 1972. 143с.
35. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. М.: "Радио и связь", 1981. 232с.
36. Kulshrestha D. K, Gupta M.C. Use of Dynamic Programme for Reliability Engineers IEEE Trans on Reliab, v. R-22, NO4, pp.240-241, Oct, 1973
37. Misra K.B, Ljubojevic M.D Optimal Reliability Design of a system: A New look IEEE Trans, on Reliab., v R-22, NO5, pp 255-258, Dec., 1973
38. Tillman F.A, Hwang C.W, Kuo W. Determining Component Reliability and Redundancy for Optimum System Reliability IEEE Trans on Reliab, v R-26, NO3, pp. 162-165, Aug. 1977
39. Sheela B.V. Optimization of System Reliability by sequential Weight Increasing Factor Technique IEEE Trans on Reliab., v R-26, p.p 339-341 Dec., 1977
40. Inagaki T, Inoue K., Akashi H Optimal Reliability Allocation Under Preventive Maintenance Schedule IEEE Trans on Reliab, v. R-27, No1, pp. 39-40, Apr., 1978.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Центра  
"Звездный мир"



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Проведение исследований и разработка требований  
по надежности, живучести и безопасности ОТС и  
его моделей

НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИО-  
НИРОВАНИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА  
(промежуточный)

Руководитель темы  
к.т.н., с.н.с.

A handwritten signature in black ink, which appears to be "В.К. Кришнев".

В.К. Кришнев



СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

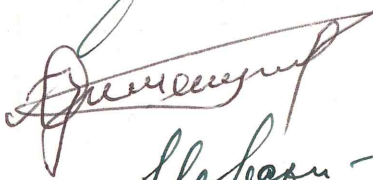
Ответственный исполнитель  
к.т.н., с.н.с.



В.К. Кришнев

Исполнители

д.т.н., профессор



В.П. Мешалкин

д.т.н., профессор



М.А. Ястребенецкий

Научный руководитель,  
программы "Экомир"



А.Э. Юницкий

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение	6
1.	Анализ качества функционирования высоко- скоростного наземного транспорта (ВСНТ)	8
2.	Методика нормирования показателей надежности функционирования общепланетного транспортного средства	15
2.1.	Процедура нормирования функциональной надежности ОТС	15
2.1.1.	Выбор критериев отказов целенап- равленных функций	17
2.1.2.	Выбор состава показателей надеж- ности для восстанавливаемых ус- тройств общепланетных транспортных средств ОТС	18
2.1.3.	Задание требуемых количественных (предельно допустимых) значений показателей функций и устройств ОТС	18
2.1.4.	Оценка влияния точности исходных данных по надежности ОТС	23
2.1.5.	Разработка рекуррентных формул для марковского процесса с конечным множеством состояний	24
3.	Нормируемые показатели надежности функций обще- планетного транспортного средства и целевых задач общепланетного автоматического комплекса (ОАК)	26
3.1.	Показатели надежности функций ОТС.	26
3.2.	Показатели надежности целевых задач ОАК	26
	Заключение	33
	Список использованных источников	34
	Приложение 1. Интервальная оценка интенсивности отказов элементов.	37
	Приложение 2. Поправочные коэффициенты к интен- сивности отказов в зависимости от условий эксплуатации	43
	Приложение 3. Технические характеристики линейного асинхронного двигателя (ЛАД) обще- планетного транспортного средства	45

Приложение 4. Технические характеристики системы электрообеспечения ОТС	51
Приложение 5. Анализ систем электрообеспечения ОТС и АОН в целом (термоядерная, химическая, ядерная)	52

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

- ВСНТ - высокоскоростной наземный транспорт с линейным тяговым электроприводом и магнитным подвесом (бесконтактный и бесколесный)  
Альтернатива колеса - магнитный подвес (электромагнитный, электродинамический, постоянный магниты)
- ФР - феррорельса
- МП - магнитный подвес
- ЭМ - электромагнит
- ЭМП - электромагнитный подвес (зазор между ЭМ и ФР составляет 15 мм)
- ЭДП - электродинамический подвес (рабочий зазор 150 - 200 мм при  $V = 400 - 500$  км/ч)  
(В ЭДП используют криогенное оборудование и сверхпроводящие материалы. При скоростях менее 80 км/час недостаточна подъемная сила  $F_z$  вследствие высокого магнитного сопротивления движению).
- ППМ - подвес на постоянных магнитных (рабочий зазор 10-15мм)
- Левитация - подвешивание бесконтактное (зависание в воздухе)
- СПЭМ - сверхпроводящие электромагниты ( $T_{ср} \geq 3 \cdot 10^5$  час)
- СПОВ - сверхпроводящая обмотка возбуждения  
(СПЭМ и СПОВ используются в ЭДП, при этом зазор между СПЭМ и ФР достигает 150-200 мм при скоростях 400-500 км/ч)
- ДЛЛД - двусторонний линейный асинхронный двигатель (по сравнению с роторным не требует кинематических цепей для преобразования вращательного движения в линейное)
- ЛСД - линейный синхронный двигатель
- ЛДПТ - линейный двигатель постоянного тока
- РШ - реактивная шина (сплошная токопроводящая полоса-ротор)

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет является промежуточным по теме: "Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей". По данной теме выпущен промежуточный отчет [1], в котором сделана постановка задачи и выбор направления работ.

Отмечается, что проблема надежности решалась и в далеком прошлом. Мы являемся свидетелями того, насколько надежны создававшиеся древними пирамиды и сфинксы в Египте, буддийские храмы в Индии, ритуальные храмы ацтеков и майя, насколько прочны и долговечны дороги и акведуки древнего Рима. Несомненно, что на современном этапе одной из важнейших является проблема обеспечения высокой надежности технических устройств, особенно тех из них, с функционированием которых связаны жизнь и здоровье людей, а также материальные ценности.

Повышение надежности элементной базы на практике, обычно отстает от требований жизни, при этом системы становятся все более сложными, включают в свой состав все большее число комплектующих деталей работают все в более напряженных и сложных условиях. Эти обстоятельства в совокупности приводят к необходимости разработки и использования различных методов повышения надежности, в том числе резервирования, введения избыточности на структурном и функциональном уровнях. При этом отказы системы, объекта становятся достаточно редкими событиями на фоне сравнительно часто возникающих отказов отдельных элементов.

Возникает вопрос [2]: "Можно ли создавать сложнейшие инженерные сооружения, системы, комплексы, на которые возложены ответственнейшие общечеловеческие политические, социальные и экономические задачи, если заранее тщательнейшим образом не продумать вопросы надежности, живучести и безопасности этих систем, не разработать научных рекомендаций по обеспечению этих важнейших свойств ОТС". Ответ

очевиден - нельзя. И это ставит новые задачи перед теорией надежности, ибо нет ничего практичнее хорошей теории [2].

Проблема обеспечения надежности общепланетного транспортного средства (ОТС) и общепланетного автоматического комплекса в целом на стадии их разработки включает этап нормирования требуемых уровней надежности функциональных задач комплекса, функций распределенной системы управления и основных компонент ОТС. Решение вопросов нормирования ставит задачу разработки концепции методики нормирования показателей надежности и установления уровней надежности.

В настоящем отчете дан анализ качества функционирования ВСНТ, приведена разработанная методика нормирования показателей надежности функционирования ОТС, а также нормируемые показатели надежности функций и целевых задач ОТС и комплекса в целом.

## I. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА (ВСНТ)

В результате разработок различных бесконтактных систем наземного транспорта, теоретических исследований, создания и испытания лабораторных моделей и макетных экипажей установлено [8], что наиболее полно требованиям бесшумности и малого загрязнения окружающей среды отвечает высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ) с магнитным подвесом экипажа, линейным тяговым электроприводом и автоматизированной системой стабилизации его положения в пространстве при движении. Некоторые данные основных зарубежных проектов ВСНТ приведены в таблице I.

Основными компонентами ВСНТ выступают: магнитный подвес и линейный тяговый электропривод (линейный двигатель) [9-12, 16].

Электромагнитный подвес (ЭМП) основан на эффекте магнитного притяжения электромагнита к феррорельсу. Применением двух независимых систем ЭМП обеспечивается магнитное подвешивание экипажа в вертикальной плоскости и его движение по направляющей. Электромагниты подвеса и электромагниты направления характеризуются подъемным усилием  $F_n$ , массой электромагнита  $M_M$  с учетом массы системы охлаждения, мощностью  $P_M$  обмотки электромагнита [17], количественные характеристики которых с учетом нелинейности магнитной цепи магнитопровода, вихревых токов и краевых эффектов рассчитываются на стадии проектирования с использованием математических моделей и программ расчета на ЭВМ ЕС.

Существующие системы управления ЭМП обеспечивают поддержание зазора  $S_{ном} = 15$  мм между полюсами электромагнита и феррорельсом с максимально допустимым отклонением  $\pm 3$  мм в вертикальной и горизонтальной плоскости за счет обратных связей по реальному зазору " $\delta$ ", скорости и ускорения изменения зазора ( $v_\delta, a_\delta$ ); скорости и ускорения электромагнита ( $v_\varepsilon, a_\varepsilon$ ), а также по току электромагнита. Обратная связь по току позволяет компенсировать колебания напряжения

питания, исключая изменение зазора.

По данным эксперимента [18] наилучший результат дает применение обмотки из высокочистого алюминия, охлаждаемого жидким водородом с температурой 20 К. При этом масса электромагнита составляет 8,2 % полной массы экипажа, а транспортная масса - 17,8 %.

Американская система MEL ВСНТ [16] (таблица I) с использованием постоянных магнитов предусматривает перемещение экипажа массой 29 тонн в трубе с вакуумом с помощью линейного асинхронного двигателя. Путевая структура системы MEL с транспортными трубопроводами диаметром 3,66 м располагается в тоннеле на глубине в среднем 50 м. Нормальное давление в транспортном трубопроводе составляет 0,1 кПа, что обеспечивается 4000 насосов, которые размещены по трассе длиной 4000 км (через 20 км размещается насосная станция с 20 насосами).

При эстакадном варианте путевой структуры подвижной состав ВСНТ при массе каждого экипажа 40 т и длина 25 м создает при движении равномерные, временные нагрузки на пролетные строения и опоры высотой до 20 м, не превышающие 9,6 т. на 1 м.

Пролетные строения эстакад должны представлять блочно-неразрывные конструкции, выполненные из отдельных балок длиной 200-300 м (расстояние между температурными швами), установленных на опорах в виде железобетонных столбах глубокого погружения или забивных сваях.

Установлено [19], что основным фактором, влияющим на эффективность ВСНТ, является стоимость эстакады.

По данным Японской железнодорожной Карпорации система с ЭДП и ЛСД при использовании СПЭМ является самой подходящей несмотря на технические трудности ее разработки.

Согласно [20] из способов магнитного подвеса и видов электродвигателей для ОТС отмечается электродинамический подвес (тезис - нормальный металл и источник переменного магнитного поля всегда отталкивается. Согласно правилу Лоренца, ток, индуцированный в проводящем контуре магнитным полем, направлен таким образом, чтобы



Таблица I

Технические характеристики ВСНТ

Название проекта	: Страна	: Тип маг-нитного : подвеса	: Скорость : экипажа : км/ч	: Длина : км	: Стоимость : I км/млн. : долларов
Проект Магнеплан [5]	США	ЭДП	480	420	5,5
Токио-Осака [4]	Япония	ЭДП	500	475	4,72
Монреаль-Оттава-Горонто [8]	Канада	ЭДП	500	594	0,605
Лондон-Эдинбург [3]	Англия	ППМ ЭМП	480	710,4	3,6
Мюнхен-Гамбург (проект "Транспранид ЕМС") [3]	ФРГ	ЭМП	500	800	0,77
Проект Планетран [5]	США	ЭДП	9600	10000	20,0
Проект МЕI [10]	США	ППМ	960	4000	6,26
Проект Ленде [5]	ФРГ	ЭДП	1000	-	-
"Союз - Д" [6]	СССР	ЭДП	400	40	-

Проект Планетран реализуется в вакуумированном транспортном трубопроводе

сохранить постоянным магнитный поток. Магнитное поле индуцированного тока противоположно внешнему переменному магнитному полю, и между магнитом и контуром возникает сила отталкивания. С увеличением частоты изменения поля индуцированный ток возрастает асимптотически).

При электродинамическом подвесе (системы с отталкиванием) возникает проблема диссипации (рассеяния) энергии вследствие конечной проводимости проводника, которая как и индукционный нагрев зависит от частоты изменения поля (максимум на определенной частоте).

Система отталкивания и диссипации (рассеяния) энергии в случае ротора ОТС, движущегося относительно оболочки, на которой размещены контура из диамагнитного материала (алюминия) (сверхпроводящие магниты) такова, что при малых скоростях ротор должен опираться на колеса (ролики) из сверхпрочного НЕИДОНА, допускающего нагрузку до  $10^3$  кг/см<sup>2</sup>. При этом будут использоваться сверхпроводники, работающие при температуре жидкого азота.

Электродвигатель рассматривается с двух позиций: как ротативный и как линейный. Диаметр ротора  $D_p = \pm 12756320$  м (диаметр земли с угловой частотой вращения ротора в конце разгона  $\Pi p = 1,5 \cdot 10^{-2}$  об/мин [20]) рассматривается при выборе электромагнитных нагрузок. В качестве линейного этот двигатель представляет собой ротор с поперечным сечением (размером) 50 - 500 мм, движущийся относительно оболочки со скоростью  $10^4$  м/сек. С таких позиций его следует рассматривать, когда речь идет о магнитном подвесе. При этом краевые эффекты в такого рода линейном двигателе отсутствуют.

При сравнении трех типов электродвигателей [21] (асинхронного, синхронного и коммутаторного постоянного тока) для привода в движение ротора ОТС рекомендуется двигатель постоянного тока с тиристорным коммутатором.

При переходе от скоростей ВСНТ (150 м/с) до скоростей ОТС (10 км/с) встают трудности:

- необходимость увеличения напряжения на статорной обмотке двигателя для компенсации противо ЭДС, зависящей от скорости вращения ротора по линейному закону ;

- сложность отвода тепла от статорных обмоток (в ВСНТ секции обмотки нагружены током только в момент прохождения над ними поезда, в ОТС они должны работать непрерывно в течение нескольких недель) ;

- проблема больших полюсных делений.

Предложено использовать полюсное деление тягового двигателя ОТС через 100 м, а структуру двигателя выбирать с учетом минимизации потерь от вихревых токов в системах магнитного подвеса ротора.

Учитываются четыре рабочих цикла в разгоне ротора:

1) изменение скорости ротора от нуля до 100 м/с (сила торможения в системе подвеса максимальна). Подвеска ротора осуществляется вспомогательной магнитной системой ;

2) изменение скорости до 8 км/ч (ротор в невесомости). Электродинамическая система подвеса работает ;

3) при  $V \geq 8$  км/с ротор оказывает давление на периферийную часть статора, при  $V = 10$  км/с электродинамическое усилие девиации составит 0,6 веса ротора ;

4) промежуток времени от момента отключения тягового двигателя до момента освобождения ротора от вакуумной оболочки на высоте 100 км.

Во время подъема ротора зазор между ним и вакуумным кожухом статора поддерживается за счет автономной системы ЭДП.

Таким образом, тяговый двигатель работает на протяжении первых трех этапов.

Особенности конструкций ЭДП:

- на вакуумной оболочке ротора смонтированы короткозамкнутые катушки ЭДП, образующие два рода сдвинутых друг относительно друга в направлении движения ротора на половину шага намотки катушек ;

- каждая катушка состоит из 2-х петель уголкового профиля, расположенных в вертикальной плоскости одна над другой ;

Особенности конструкции двухстороннего линейного электродвигателя постоянного тока:

- статорные обмотки закреплены на обеих вертикальных стенках эстакады ;
- обмотка имеет катушечную конструкцию, подключение секций катушек к фидерной линии производится посредством полупроводникового коммутатора, ключевые элементы которого равномерно распределены вдоль эстакады.

Подготовка и функционирование тяговой линейной системы ОТС:

- 1) постоянным током запитываются сверхпроводящие обмотки возбуждения ;
- 2) размыкают катушки подвеса для уменьшения потерь при разгоне ротора ;
- 3) переменным током с частотой 6 кгц запитывается статорная обмотка линейного электродвигателя, ротор приходит в движение находясь на роликах ;
- 4) при скорости ротора 100 м/с катушки подвеса замыкают "на коротко", в СПОВ наводятся вихревые токи и осуществляется подвеска ротора относительно вакуумной оболочки ;
- 5) при  $V \leq 8$  км/с взаимодействие СПОВ с короткозамкнутыми катушками носит характер отталкивания ;
- 6) при  $V > 8$  км/с ротор оказывает давление на периферийную часть оболочки ;
- 7) при  $V = 10$  км/с освобождаются захваты ; ротор, расширяясь, действует на оболочку - выход в открытый космос.

Согласно [ 22 ] при технических характеристиках ОТС:

Масса ротора - 200 тыс.т,

Скорость движения ротора - 10 км/с,

Напряжение питания - 38,5 кВ,

Частота напряжения - 8 кгц,

Пиковая активная мощность - 8 млн. квт.

двигателя за 1000 час,

обеспечивается К.П.Д. двигателя не хуже 0,9 при коэффициенте мощности для варианта с фазно-короткозамкнутой обмоткой на роторе 0,65. При этом предлагается схема электропитания асинхронного двигателя с электромеханическим преобразователем на базе высокочастотного индукторного генератора. Количество каналов подвода электроэнергии к двигателю ОТС должно быть равно количеству параллельных ветвей статорной обмотки асинхронного двигателя.

Рассмотрен асинхронный электродвигатель ОТС имеющий 14000 параллельных ветвей при значении питающего напряжения 22,25 кВ частотой 8 кГц.

Кажущаяся (полная) мощность электродвигателя  $S = 12,4 \cdot 10^6$  кВт.

Полная мощность одного канала

$$S_k = 886 \text{ кВт.}$$

По отношению к тиристорным и транзисторным преобразователям наиболее приемлемым для решения поставленной задачи являются индукторные преобразователи.

Технические характеристики ОТС и системы электрообеспечения по данным [20] приведены в приложении 4,5.

Анализ качества функционирования в аспекте надежности систем магнитного подвеса и линейных тяговых двигателей показывает [7], что наработка на отказ сверхпроводящего электромагнита подвешивания экипажа (СПЭМ)  $T_{ср} > 3 \cdot 10^5$  час. Располагать дополнительными данными по надежности компонент ВСНТ и ОТС не представляется возможным, поскольку последние находятся в стадии отладки либо разработки. В качестве аналогов предполагается использовать агрегаты атомных электростанций.

## 2. МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Методика распространяется на общепланетные транспортные средства, функционирующие в составе общепланетного автоматического (автоматизированного) комплекса (далее - ОТС, комплекс) и рекомендуется к применению в отраслях промышленности социалистических и капиталистических стран при экономическом и научно-техническом сотрудничестве организаций и предприятий в области совместного создания ОТС и комплекса в целом.

Методика устанавливает методы выбора критериев отказов и состава показателей надежности ОТС, содержит рекомендации по определению требуемых количественных значений показателей надежности ОТС.

Материал может использоваться на стадии "Технического задания" для установления требований к надежности ОТС и основных компонент комплекса; при разработке требований по надежности в процессе подготовки контрактов, соглашений на поставку компонент комплекса; для составления проспектов на ОТС и комплекса в целом.

Материал ограничивается:

нормированием надежности технического обеспечения ОТС, не рассматривая иные виды обеспечения и персонал комплекса.

Терминология, используемая в настоящем материале, соответствует словарю терминов "программы ЭКОМИР".

### 2.1. Процедура нормирования функциональной надежности ОТС.

Основные определения надежности ОТС и комплекса в целом приведены в [1]. В дальнейшем будем считать, что ОТС включает распределенную систему управления, но без человека-оператора.

Надежность ОТС является комплексным свойством, включающим в себя безотказность, ремонтпригодность и долговечность.

ОТС являются восстанавливаемыми и обслуживаемыми средствами,

предназначенным для кратковременного (в течение 10-14 суток) функционирования в режиме разгона и запуска и длительного функционирования на орбите космического базирования после их запуска.

ОТС могут обладать аппаратурной, информационной, временной и функциональной избыточностью, в результате чего надежность ОТС может быть выше надежности его составляющих.

Надежность ОТС зависит от установленного разработчиком и реализуемого пользователем порядка его технической эксплуатации (обслуживания).

Уровень надежности ОТС непосредственно влияет на технико-экономическую эффективность ОТС и комплекса в целом: снижение надежности ОТС вызывает рост потерь от отказов, а повышение надежности ОТС, как правило, требует увеличения его стоимости (или) затрат на эксплуатацию.

Процедура нормирования надежности ОТС включает в себя следующие этапы:

- составление перечня функциональных задач комплекса (включающего оператора-человека) и функций ОТС, для которых задаются показатели надежности (без учета человека-оператора);
- выбор критериев отказов для каждой функции;
- выбор состава показателей надежности функций;
- задание требуемых количественных (предельно допустимых) значений показателей надежности функций.

Количественные значения показателей надежности ОТС должны устанавливаться с учетом:

- требований и надежности (эффективности) общепланетного автоматического комплекса в целом;
- требований в надежности компонент путевой структуры ОТС;
- особенностей технических и функциональных структур распределенной системы управления ОТС (PCY OTC);
- состава технических и программных средств КСУ ОТС.

## 2.1.1. Выбор критериев отказов целенаправленных функций.

Из совокупности всех требований к выполнению функций, приводимых в технической документации на ОТС и комплекс в целом, выбираются основные, наиболее важные для достижения частной цели управления. Отказом функции считается событие, заключающееся в нарушении хотя бы одного их основных требований к выполнению функции, возникшее при заданных условиях эксплуатации.

К условиям эксплуатации могут относиться: температура, влажность, вибрация и т.п. в местах, где установлены технические средства, участвующие в реализации функций;

- параметры режима энергообеспечения (величина и частота напряжения, давление, разрежение воздуха) этих средств;

- параметры технического обслуживания этих средств,

Нарушение требований к выполнению функций при несоблюдении заданных условий эксплуатации (например, при повышении температуры в ОТС, снижении напряжения питания) может не засчитываться отказом функции. (Устойчивость функционирования ОТС и комплекса в целом при неблагоприятных условиях эксплуатации будет рассмотрена при изучении свойства "живучести").

Критерием отказа являются признаки, позволяющие установить факт наступления отказа, то есть нарушение требований к выполнению функций. Назначение критерия отказа сводится к выбору вида требований к выполнению функции, выбору числового значения величины, характеризующей это требование, и к однозначному определению заданных условий эксплуатации.

Отказы функций могут быть классифицированы по следующим признакам;

- по виду последствий;

- по степени нарушения работоспособности;

- по наличию внешних проявлений.

Критерии отказов подлежат согласованию между разработчиком



и заказчиком ОТС.

2.1.2. Выбор состава показателей надежности для восстанавливаемых устройств общепланетных транспортных средств.

Описание надежности ОТС по функциям осуществляют:

- по отдельным составляющим надежности - единичными показателями ;
- по нескольким составляющим надежности совместно-комплексными показателями надежности.

Номенклатура показателей надежности ОТС приведена в таблице 2.1. Эти показатели могут задаваться по различным видам отказов и по различным состояниям.

Для описания надежности ОТС по непрерывным и дискретным функциям используют различные показатели, приведенные в таблице 2.2.

2.1.3. Задание требуемых количественных (предельно допустимых) значений показателей надежности функций и устройств ОТС.

Основными путями определения требуемых количественных значений показателей надежности являются:

- оптимизация ОТС по экономическим критериям (С) с учетом надежности (R) (рис. 2.1) ;
- максимизация надежности при наличии ограничений на суммарные затраты и ресурсы ;
- установление значений показателей надежности путем сопоставления со значениями показателей надежности агрегатов атомных электростанций, аварийно опасных химических производств [ 3-6 ] ;
- установление значений показателей надежности путем сопоставления с ОТС - аналогами.

Повышение надежности технических средств ОТС, введение избыточности приводит к увеличению единовременных затрат на создание ОТС ; введение дополнительного технического обслуживания увеличивает текущие затраты ; повышение надежности путем улучшения условий эксплуа-

Номенклатура показателей надежности

Описываемое свойство надежности	Вид показателя	Наименование показателя	Обозначение
Безотказность	Единичные	Средняя наработка ОТС на отказ в выполнении функции	$T_0$
		Средняя наработка ОТС до отказа в выполнении функции	$T_I$
		Параметр потока отказов ОТС в выполнении функции	
		Вероятность безотказной работы ОТС при выполнении функции в течение заданного времени	$P(t)$
Ремонтпригодность	Единичные	Среднее время восстановления работоспособности ОТС к выполнению функции	$T_B$
		Вероятность восстановления в течение заданного времени способности ОТС к выполнению функции	$F_B(t)$
		Среднее время простоя, вызванного отказом функции	$T_{пр}$
Безотказность и ремонтпригодность	Комплексные	Коэффициент готовности ОТС к выполнению функции	$K_g$
		Коэффициент оперативной готовности ОТС к выполнению функции	$K_{ог}$
		Вероятность успешного выполнения ОТС заданной процедуры действий при поступлении запроса	$\mathcal{L}$
		Средняя наработка ОТС до попадания в некоторое состояние	$\tilde{T}$
		Вероятность попадания ОТС в некоторое состояние в течение заданного времени $t$	$P(t)$
Долговечность	Единичный	Назначенный срок службы	$T_{с.н.}$
		Средний срок службы	$T_c$

Таблица 2.2.

Нормируемые показатели надежности функций ОТС

Вид функции	Типовые показатели			
	комплексные	безотказности	ремонта	пригодности
Непрерывные	$K_r$	$T_0, T_I, P(t)$	$T_B$	$\int_B(t)$
Дискретные	$L, K_{ог}, K_r$	$T_0$	$T_{пр}$	

Обобщенная схема оптимального варианта повышения надежности

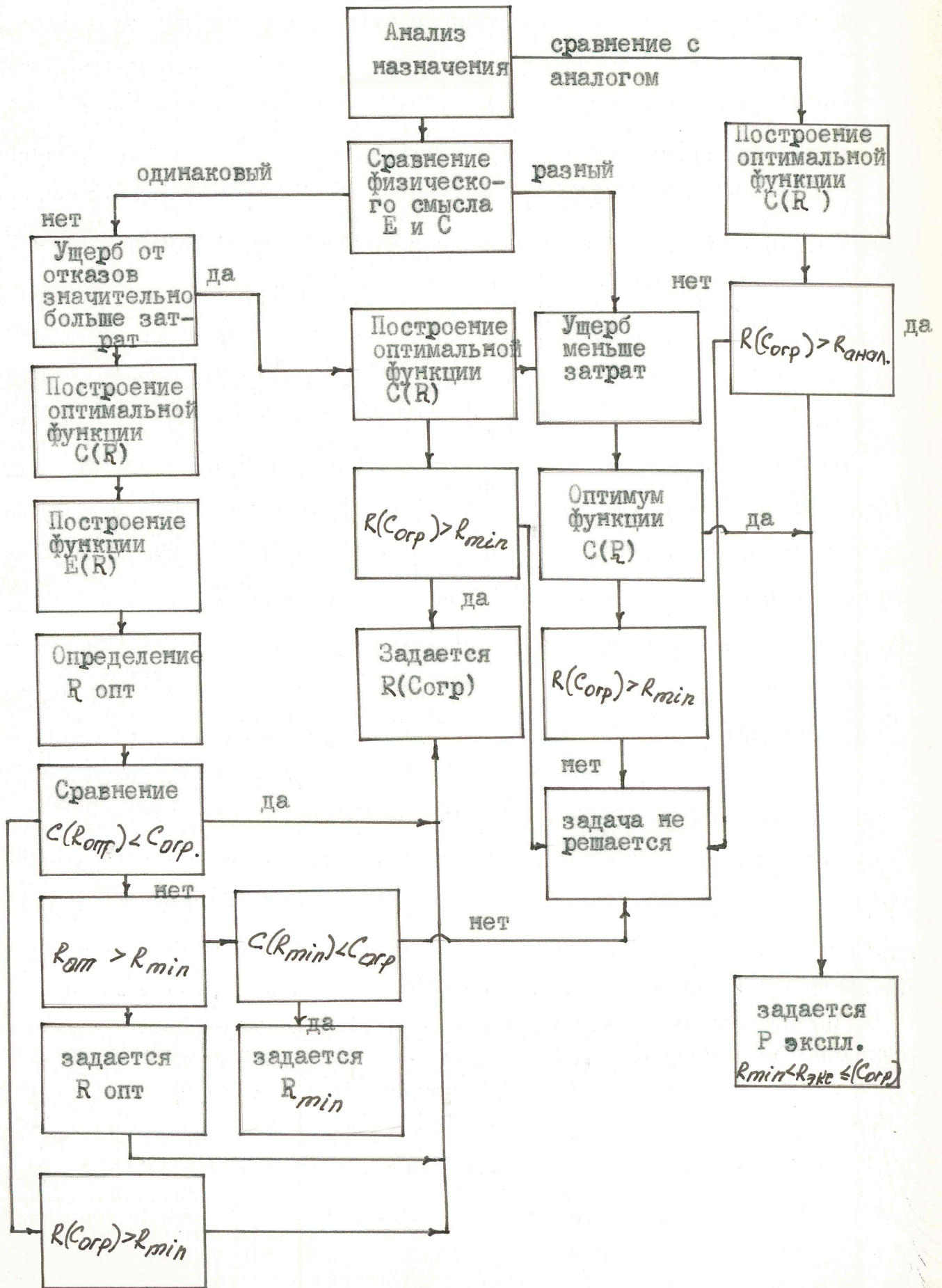


Рис. 2.1.

тации с помощью специального оборудования повышает как единовременные затраты на его приобретение, так и текущие затраты на содержание и обслуживание.

С другой стороны, отказы ОТС приводят к снижению эффективности  $E$ , причем такое снижение может быть значительным. Поэтому задача выбора требований к надежности должна решаться исходя из экономических критериев с введением ограничений по критерию безопасности.

Зависимость экономических показателей эффективности  $E$  от надежности  $R$  обычно имеет экстремум (рис. 2.2)

Выходной эффект - это экономический эффект; затраты на обеспечение надежности - это денежные расходы ( $C(R)$ ).

Максимум абсолютного значения эффекта определяется по результирующей эффективности  $\Delta E(R)$  (рис. 2.2).

$$\Delta E(R) = E(R) - C(R), \quad (2.1)$$

где  $R_{\text{опт}}$  - оптимальный уровень надежности, т.е. максимум  $R$  достигается при максимуме  $\Delta E(R)$ .

Максимум эффекта на единицу затраченных средств  $K_{\text{п}}$  (относительная эффективность) определяется из соотношения

$$K_{\text{п}} = E(R) / C(R). \quad (2.2)$$

Определяется выполнение ограничения по стоимости.

Если  $C(R) > C_{\text{огр}}$ , то обеспечивается максимальная надежность, достижимая при данном ограничении, т.е.  $R(C_{\text{огр}})$ .

Если  $R(C_{\text{огр}})$  не обеспечивает приемлемого выходного эффекта, проверяется выполнение ограничения  $R(C_{\text{огр}}) > R_{\text{мин}}$ . Если оно не выполняется, пересматриваются исходные данные, ограничения.

Для сокращения расчетов (эвычислений) построение зависимости  $C(R)$  ограничивают зоной допустимых значений  $C$  или зоной оптимума, если последний приблизительно известен и начинается с проверки неравенства  $R(C_{\text{огр}}) \geq R_{\text{мин}}$ . При этом, построение зависимости  $C(R)$  ведется от начальной точки. Исходными данными для оптимизации решений этой задачи (без учета надежности программного обеспечения и деятель-

Нормирование надежности по заданному критерию  
эффективности

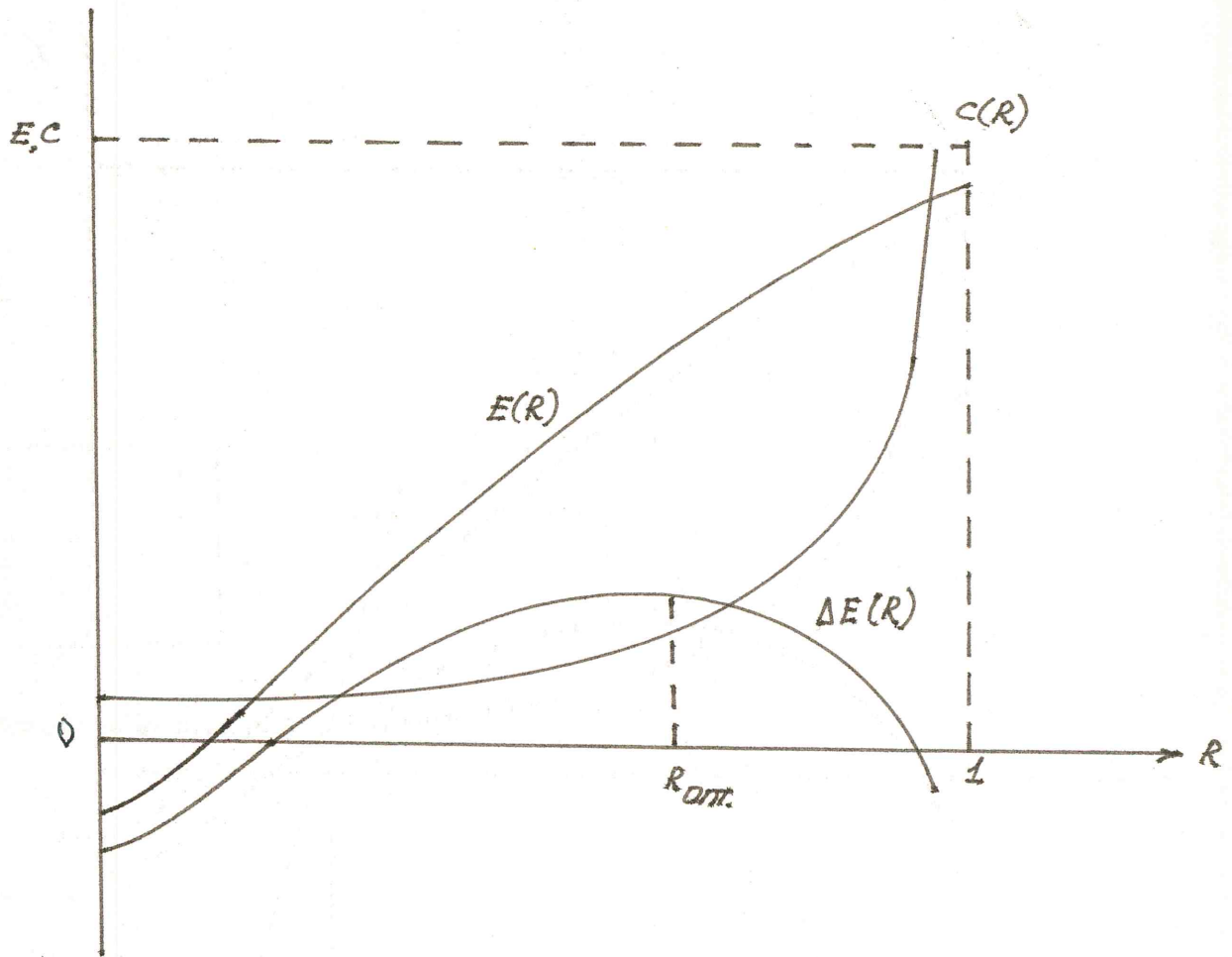


Рис. 2.2.

ности оперативного персонала) являются:

- перечень целенаправленных функций ОТС, критерии отказов по каждой функции;
- последствия отказов функции (потери энергоресурсов, повышение расхода материалов, топлива, энергии) и соотношения, связывающие экономические и технические показатели;
- соотношения, связывающие капиталовложения и стоимость технического обслуживания с показателями надежности функций.

Решение поставленной задачи, как правило, ведется методами перебора (ограниченного и направленного).

Если известны сведения о надежности ОТС - аналога, ВСНТ - прототипа, то требования по надежности могут задаваться исходя из этих сведений или с учетом их определенного повышения ("планирование от достигнутого").

#### 2.1.4. Оценка влияния точности исходных данных по надежности ОТС.

Располагая интегральными оценками интенсивности отказов  $\lambda_i$   $i$ -х компонент ОТС (Приложение I,2) представляется возможным вывести явные аналитические выражения для вероятности отказа

$$Q(t) = 1 - P(t) = Q(t; \lambda_1, \dots, \lambda_k). \quad (2.3)$$

Учитывая, что  $\lambda_i$ , приведенные в приложении I являются статистическими оценками  $\hat{\lambda}_i$ , то получим приближенное значение

$$\hat{Q}(t) = Q(t) + \delta. \quad (2.4)$$

Погрешность  $\delta$  может быть оценена обычным методом линеаризации: если  $\hat{\lambda}_i = \lambda_i + \xi_i$ , где  $\xi_i$  - независимые погрешности с дисперсиями  $\sigma_i^2$ , то

$$D\delta \approx \sum_{i=1}^k a_i \sigma_{i,\lambda}^2 \quad (2.5)$$

где  $a_i = (\partial Q / \partial \lambda_i)^2$  ( $\lambda_i = \hat{\lambda}_i, 1 \leq i \leq k$ ).

Учитывая, что  $\hat{\lambda}_i$  получены в результате усреднения большого числа независимых наблюдений, используем нормальную аппроксимацию и построим для  $Q(t)$  приближенный доверительный интервал

$$\hat{Q}(t) \pm \left( \sum_{i=1}^K a_i \sigma_i^2 \right)^{1/2} Z, \quad (2.6)$$

где при заданной достоверности  $1 - \alpha$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{\alpha}{2} \quad (2.7)$$

Альтернативный подход основан на использовании доверительных интервалов для параметров  $\lambda_i$ . Поскольку показатели типа  $Q(t)$  монотонны относительно  $\lambda_i$  (увеличение  $\lambda_i$  ухудшает компоненту ОТС), то если  $(d_i, a_i)$  - доверительные интервалы для  $\lambda_i$ , построенные с доверительностью  $1 - \alpha_i$ , тогда для  $Q(t)$  получим доверительный интервал

$$Q(t; d_1, \dots, d_K), Q(t; a_1, \dots, a_K) -$$

с достоверностью  $1 - (\alpha_1 + \dots + \alpha_K)$ . При условии, что доверительные интервалы параметров получены по независимым для различных  $i$  наблюдениям, достоверность равна  $(1 - \alpha_1) \dots (1 - \alpha_K)$ . Необходимо учитывать, что с увеличением числа параметров достоверность указанного доверительного интервала снижается.

2.1.5. Разработка рекуррентных формул для марковского процесса с конечным множеством состояний.

В ряде случаев функционирование компонент и реализации функций описываются марковским процессом  $G(t)$  с конечным множеством состояний  $Z$ , интенсивностями перехода  $\lambda_{ij}(t), j \neq i$  и интенсивностями выхода  $\lambda_i(t) = \sum_{j \neq i} \lambda_{ij}(t)$ . При  $t = 0$  процесс находится в состоянии  $i$  с вероятностью  $P_i^{(0)}$ . Введем допущение, что  $\lambda_{ij}(t)$  - интегрируемые функции. Тогда вероятности  $P_j(t) = P\{G(t) = j\}$  однозначно определяются решением системы дифференциальных уравнений Колмогорова

$$P_j'(t) + \lambda_j(t) P_j(t) = \sum_{i \neq j} \lambda_{ij}(t) P_i(t), i \in Z, \quad (2.8)$$

при начальном условии

$$P_i(0) = P_i^{(0)}, i \in Z.$$

При большом числе состояний решение данной системы уравнений пред-



ставляет вычислительные трудности. Поскольку компоненты ОТС должны быть высоконадежными на конечных интервалах времени (время разгона запуска ротора ОТС, время нахождения ОТС на орбите космического базирования) можно "разомкнуть" систему уравнений (2.8), сведя ее решение к рекуррентной схеме вычислений. Для этого положим

$$P_j(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_j^{(n)}(t), j \in Z, \quad (2.9)$$

где  $P_j^{(n)}(t)$  - вероятность события, состоящего в том, что  $\sigma(t)=j$  и в интервале  $(0, t)$  произошло  $n$  скачков процесса  $\sigma(t)$ . Для новых функций имеем систему уравнений

$$\partial / \partial t P_j^{(n)}(t) + \lambda_j(t) P_j^{(n)}(t) = \sum_{i \neq j} \lambda_{ij}(t) P_i^{(n-1)}(t), \quad (2.10)$$

при начальном условии

$$P_i^{(0)}(0) = P_i^{(0)}; P_i^{(n)}(0) = 0, n \geq 1, \text{ и очевидном условии}$$

$$P_i^{(-1)}(t) = 0.$$

В результате анализа системы уравнений (2.10) очевидны следующие рекуррентные формулы

$$P_j^{(0)}(t) = P_j^{(0)} \cdot \exp\left\{-\int_0^t \lambda_j(\tau) d\tau\right\}; \quad (2.11)$$

$$P_j^{(n)}(t) = \sum_{i \neq j} \int_0^t P_i^{(n-1)}(\tau) \lambda_{ij}(\tau) \exp\left\{-\int_{\tau}^t \lambda_j(u) du\right\} d\tau, \quad (2.12)$$

$n \geq 1.$

Критерий окончания итерационного процесса вычисления  $P_j(t)$  на отрезке  $[0, T]$  имеет вид

$$0 \leq \sum_j [P_j(t) - \sum_{n=0}^{(i+1)m} P_j^{(n)}(t)] \leq \eta, \quad 0 \leq t \leq T,$$

где  $m$  - число отказов компонент ОТС на отрезке  $[0, T]$ ,

$\eta$  - требуемая точность вычисления результата.

### 3. НОРМИРУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИЙ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА И ЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ОАК)

Согласно [1] надежность ОАК - это свойство комплекса выполнять поставленные целевые задачи в заданном интервале времени и при заданных условиях эксплуатации. Перечень целевых задач, поставленных перед ОАК, приведен в таблице 3.1.

Для выполнения целевых задач ОАК, распределенной системой управления реализуются простые функции, перечень которых приведен в таблице 3.2.

#### 3.1. Показатели надежности функций ОТС.

Простые функции (измерения, регулирования, индикации, регистрации, сигнализации) по одному информационному каналу являются неразложимыми на составляющие.

В таблице 3.3 приведены нормируемые показатели надежности простых функций распределенной системы управления ОТС и сравнительные оценки показателей надежности функций - аналога, полученные в атомной энергетике и спецхимии [24,25].

#### 3.2. Показатели надежности целевых задач ОАК.

Функционирование путевой структуры ОТС представим в виде технологической линии, включающей последовательно соединенные компоненты, в которой происходят процессы создания электромагнитной бегущей волны.

Согласно [1] к основным компонентам путевой структуры ОТС относятся компоненты, приведенные в таблице 3.4. Здесь же приведены нормируемые показатели надежности для участка путевой структуры, равному 100 м, что соответствует полюсному делению тягового двигателя постоянного тока с тиристорным коммутатором, устройство которого при ведено на рис. 3.1 [21] и нормируемые показатели надежности для участка путевой структуры, охваченной одной из 14000 параллельной

Целевые задачи ОАК и признаки их невыполнения

Наименование задачи	: Критерий невыполнения задачи
1. Своевременный пуск и останов (при необходимости) ОТС	Отказ одной из компонент: линейного двигателя, магнитного подвеса, наземных и подводных конструкций, корпуса ОТС, вакуумной системы, системы термостатирования.
2. Соблюдение норм регламентной безопасности при разгоне ротора в ОТС	Отказ распределенной системы управления (РСУ)
3. Предотвращение (устранение) предаварийной (аварийной) ситуации на ОТС.	Отказ технологической защиты или распределенной системы управления
4. Обеспечение электроэнергией общепланетных энергопотребителей (режим аккумуляторной электростанции).	Отказ аккумуляторных агрегатов.
5. Вывод на околоземную орбиту вакуумированной трубы оболочки с ротором.	Отказ автоматических захватов корпуса ОТС в момент отсоединения от путевой структуры
6. Восстановление озонового слоя земли	Отказ автоматической системы распыления воды в момент прохождения озонового слоя.
7. Фиксация ОТС на заданной орбите в космическом пространстве	Отказ тормозных систем ОТС
8. Обеспечение научно-технических исследований состояний путевой структуры ОТС и его использование в качестве высокоскоростного наземного транспорта	Отказ эстакад, понтонов, систем электрообеспечения

Таблица 3.2.

Целенаправленные простые функции РСУ ОТС и признаки их отказов

---

Наименование простых функций	Критерий отказа
1. Непосредственное цифровое управление процессом разгона ротора	Отказ измерительного или управляющего канала; отказ ЭВМ
2. Аварийная технологическая защита с включением резервных компонент	Отказ канала оповещения аварийной ситуации или средств включения резервной компоненты по одному каналу
3. Логическое управление состоянием ОТС	Отказ двух и более каналов сравнительных параметров, характеризующих состояние ОТС
4. Сигнализация (звуковая и световая) отклонений значений параметров от норм технологического регламента	Отказ канала измерения, ЭВМ или канала сигнализации по одному параметру
5. Непрерывная регистрация значений параметров основных компонент путевой структуры ОТС	Отсутствие текущих значений параметра по одной компоненте ОТС
6. Расчет событий и процессов по данным технической диагностики состояний компонент ОТС	Отказ ЭВМ, средства отображения информации

Таблица 3.3.

Нормируемые показатели надежности простых функций ОТС РСУ и сравнительные оценки показателей надежности простых функций - аналогов в атомной энергетике и химии

Наименование функции	: Атомная энергетика				: Химия				: ОТС			
	: $T_0, \text{ч}$	: $T_{\text{в}}$ мин:	Кг	: $P(\pm)$	: $T_0, \text{ч}$	: $T_{\text{в}}$ , мин:	Кг	: $P(\pm)$	$T_0, \text{ч}$	: $T_{\text{в}}$ : Кг	: $P(\pm)$	
1. Непосредственное цифровое управление	$10^5$	45	0,9999	-	$3 \cdot 10^3$	120	0,9980	-	$10^6$	20	0,99999	-
2. Аварийная технологическая защита	$10^6$	30	0,99999	-	$10^4$	60	0,9983	-	$10^8$	20	0,999999	-
3. Логическое управление	$2 \cdot 10^4$	60	-	0,925	$10^3$	40	-	0,815	$10^5$	20	0,99999	-
4. Сигнализация отклонений значений параметров от норм	$5 \cdot 10^4$	240	-	0,931	$6 \cdot 10^3$	50	-	0,912	$10^5$	30	0,9999	-
5. Непрерывная регистрация значений параметров	$55 \cdot 10^3$	120	-	0,986	$8 \cdot 10^3$	110	-	0,935	$10^5$	30	0,9999	-
6. Расчет событий и процессов по данным технической диагностики	$6 \cdot 10^3$	240	0,998	-	$2 \cdot 10^3$	45	0,9986	-	$10^6$	20	0,9999	-

Вероятность безотказной работы  $P(\tau)$  рассчитана исходя из наработки  $\tau = 820 \text{ ч.}$

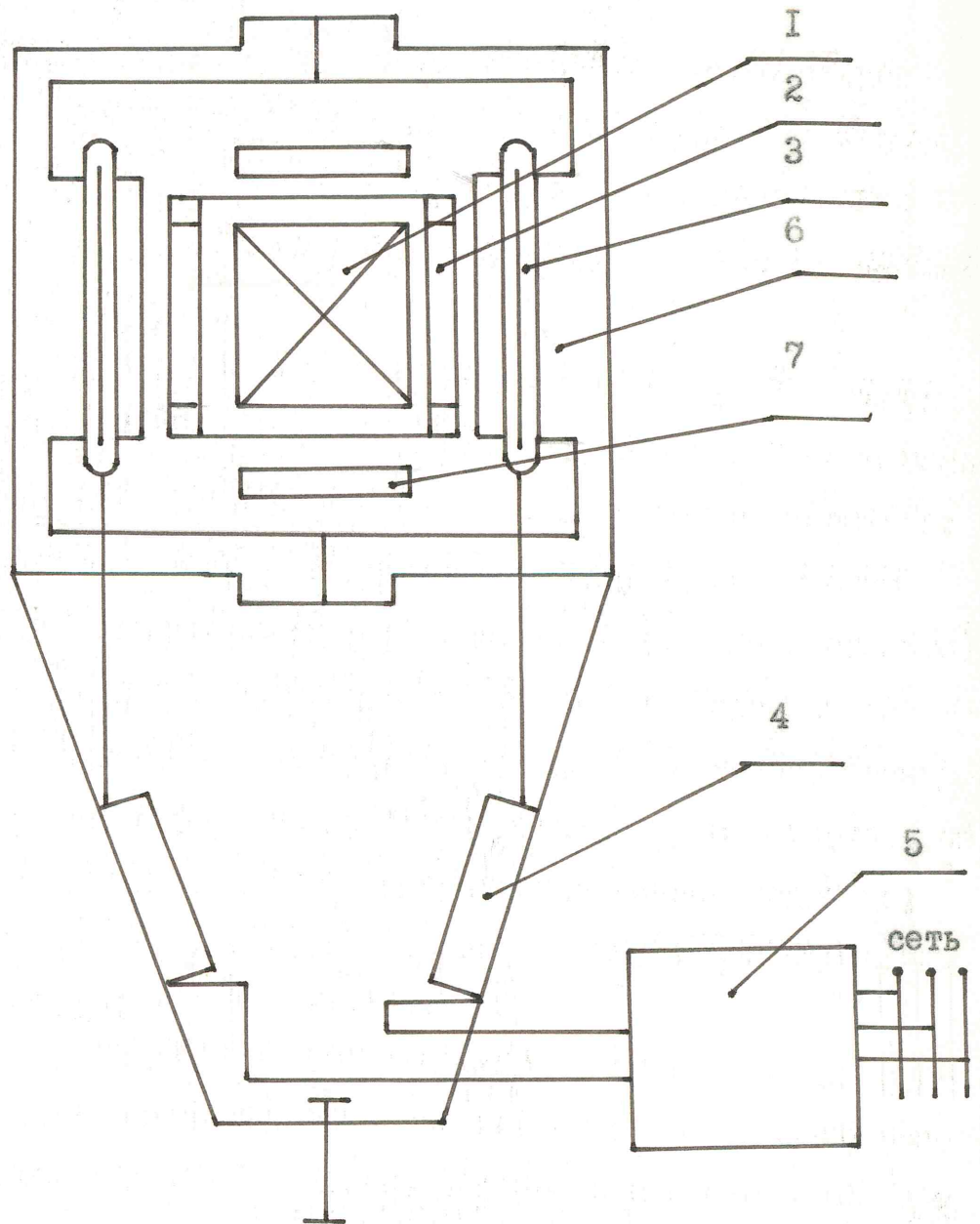
ч - час, мин - минуты

Таблица 3.4.

Нормируемые показатели надежности компонент путевой структуры для двух реализаций тяговых двигателей ОТС

Наименование компоненты	: Нарботка :(в течение : года в ч):	Электродвигатель			
		постоянного тока		: асинхронный	
		: $\omega, 1/4$	: $P(\pm = 300ч) \omega, 1/2$	: $P(\pm = 300ч)$	
1. Корпус	$2 \cdot 10^3$	$10^{-10}$	0,9998	$10^{-8}$	0,9996
2. Линейный двигатель	$2 \cdot 10^3$	$10^{-12}$	0,9999	$10^{-10}$	0,9998
3. Электродинамический подвес	$2 \cdot 10^3$	$10^{-12}$	0,9999	$10^{-10}$	0,9998
4. Ротор	$2 \cdot 10^3$	$10^{-15}$	0,999999	$10^{-12}$	0,99999
5. Эстакады, понтоны	$2 \cdot 10^3$	$10^{-8}$	0,998	$10^{-6}$	0,996
6. Тормозная система	$2 \cdot 10^3$	$10^{-15}$	0,999999	$10^{-12}$	0,99999

# Устройство коммутаторного двигателя с ЭДП



- 1 - ротор, 2 - сверхпроводящая обмотка возбуждения (источник магнитного поля), 3 - обмотка якоря, 4 - коммутатор с фидерной линией, 5 - выпрямитель, 6 - вакуумная оболочка, 7 - короткозамкнутые катушки ЭДП

Рис. 3.1.

ветвью ( $40000 : 14000 = 2,857$  км) линейного асинхронного электродвигателя с высокочастотным (8 кГц) индукторным преобразователем.

Критерием отказа компоненты путевой структуры является событие (состояние) при котором требуется ремонт или настройка соответствующей компоненты.

В качестве нормируемой наработки для расчета вероятности безотказной работы компонент ОТС принят интервал времени равный времени разгона ротора (14 суток  $\times$  24 ч. = 336 ч).

Наработка ОАК принята из расчета 5 запусков ОТС в год.

В таблице 3.5. приведены нормируемые показатели надежности целевых задач общепланетного автоматического комплекса.



Таблица 3.5.

Нормируемые показатели надежности целевых задач ОАК

Наименование задачи	$\omega, 1/ч$	$P(\pm)$	Ког	Кг
1. Своевременный пуск ОТС	$10^{-10}$	-	0,999999	-
2. Соблюдение норм регламентной безопасности при разгоне ротора в ОТС	$10^{-12}$	-	-	0,9999
3. Предотвращение (устранение) предаварийной (аварийной) ситуации на ОТС	$10^{-15}$	-	-	0,999999
4. Обеспечение электроэнергией общепланетных энергопотребителей	$10^{-10}$	-	0,99999	-
5. Вывод на околоземную орбиту вакуумированной трубы-оболочки с ротором	$10^{-14}$	0,99999	-	-
6. Восстановление озонового слоя земли	$10^{-12}$	-	0,99999	-
7. Фиксация ОТС на заданной орбите в космическом пространстве	$10^{-15}$	0,999999	-	-
8. Обеспечение научно-технических исследований состояний путевой структуры ОТС и его использование в качестве высокоскоростного наземного транспорта	$10^{-10}$	-	-	0,9999

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ конфигураций ВСНТ, тяговых двигателей, подвеса путевой структуры ОТС позволил выделить как перспективные для использования и анализа в аспекте надежности линейных асинхронных двигателей с индукторными преобразователями и электродинамическим подвесом, а также тягового двигателя постоянного тока с тиристорным коммутатором.

На основе разработанной методики нормирования показателей надежности функционирования ОТС, РСУ и ОАК установлены критерии отказов для функций и целевых задач РСУ и АОК, для компонент ОТС. Приведен состав наиболее приемлемых показателей безотказности и ремонтпригодности, а также комплексных показателей.

В качестве исходных данных по надежности приняты оценки показателей надежности элементов машиностроения и радиоэлектроники и поправочные коэффициенты к ним для условий эксплуатации ОТС. Используются сравнительные оценки показателей надежности функций систем управления объектами атомной энергетики и химии.

Проведена оценка влияния точности исходных данных на надежность, разработаны и приведены рекуррентные формулы для марковского процесса с конечным множеством состояний.

На основе исходных данных проведено нормирование показателей надежности компонент ОТС, функций РСУ и целевых задач ОАК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техническое задание на проведение работ по надежности, живучести и безопасности ОТС. Отчет о НИР. /Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей/ Гомель: Центр "Звездный мир", 1989. 61с.
2. Гнеденко Б.В., Ушаков И.А. Современная теория надежности: состояние, проблемы, перспективы. / Надежность и контроль качества / № 1, 1989. с. 6-22.
3. Кришнев В.К., Ястребенецкий М.А., Мешалкин В.П. Системный анализ функциональной надежности АСУ ТП объектов основной химии. М: ВИНТИ. Деп. № 8567 от 16.12.1986г. с.35-39.
4. Ястребенецкий М.А. Надежность технических средств АСУ технологическими процессами. М.: Энергоиздат, 1982. - 232с
5. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств. Академик В.В.Кафаров, В.П.Мешалкин, Г.Грун, В.Нойман. - М: Химия, 1987. - 272с.
6. Надежность систем управления химическими производствами / Б.В.Палух, В.К.Кришнев, Г.М.Притыка и др./ - М.: Химия, 1987. - 178с.
7. Сверхпроводящие машины и устройства. Под ред. С.Фенера и Б.Шварца. М.: Мир, 1977. 763с.
8. Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом. В.И.Бочаров, В.А.Винокуров, В.Д.Нагорский и др.; Под ред. В.И.Бочарова и В.Д.Нагорского. - М.: транспорт, 1985. 279с.
9. *Motor Lineal y Systationacion magnetica en La R.F. Alemana (del informe presentado por el Ministerio Federal para la investigation y la Technologie). - Revista ALT, 1973, Nr 30, p. 19-34.*
10. *Middleton W.D. Japan's maglev train hits new speed record JRI. 1980, t. xx, Nr., 2, p. 37-38.*
11. *Powell J.R., Danby G.R. Magnetic suspension for levitated tracklet vehicle. - Cryogenics, 1971, VII, N2, 3 p. 192-204.*

12. Фальк В.Э., Нестеров В.А. О перспективах применения высокоскоростного наземного транспорта. - В кн.: Перспективы применения линейных электродвигателей на новых видах транспорта Киев, 1979. с.12-19.
13. *Eltehuber E.E. Transrapid-06 y ellirrenizo experimental del Emstand. - Revista ALL, 1979 Nr.30, p.44-48.*
14. *Proceedings 7-th National Symposium on Reliability and Quality Control in Electronics, 1981, p.20-36*
15. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е Под ред. В.В.Солодова. М.: Воениздат, 1977. - 430с.
16. *Lutz Baur und W.J. Mayer. Die Magnetbahnenentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland Eisenbahntechnische Praxis, 1982, Nr.3, p24-31.*
17. *Gotzein E. Meisinger R, Miller H. Anwendung des "Magnetischen Rades" in Hochgeschwindigkeitsmagnetschwebbahn - ZEV - Glasi, 1979, 103, Nr.5, p.227-230.*
18. Электромагниты подвеса и направления для макета экипажа ВСНТ массой 3т / В.В.Дубов, С.П.Куликова, Н.А.Курочка и др. - Тр. Всесоюз.н. - исслед. проектно-конструкт. и технол. ин-та электровозостроения, 1980, т.19, с.43-49.
19. Нестеров В.А., Фальк В.Э. Сферы применения высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) на магнитном подвешивании. - Тр. Ин-та комплексн. трансп. проблем, 1981, вып.83, с.23-36.
20. Юровицкий В.М. Вопросы электрообеспечения проекта ОТС на сухопутном и морском участках. Отчет о НИР. Небит-Даг.: Центр "Звездный мир", 1989. - 51с.

21. Омеляненко В.И. Анализ систем тяги и электродинамического подвеса линейных электромеханических преобразователей энергии с использованием сверхпроводящих обмоток и выбор схемы для ОТС". Отчет о НИР. Харьков: Центр "Звездный мир", 1989. - 47с.
22. Поляшов Л.И. Анализ ТС, обеспечивающих разгон объекта неограниченной длины в вакуумном канале до скорости 10 км/с. Отчет о НИР. М.: Центр "Звездный мир", 1989. - 124 с.
23. Юровицкий В.М. Выход из порочного круга энергетики. / Изобретатель и рационализатор / № 7, 1988. - с.25-27.
24. Головная автоматизированная система управления многоблочной атомной электростанции с реактором ВВЭРи1000 АСУ АЭ-В1000.01. Техническое задание - М. - Харьков ЦНИИКА, 1988. - 217с.
25. Обеспечение функциональной надежности и технологической эффективности АСУ "Аmmoфос" ГХЗ. Отчет о НИР. : ЦНИИКА 1987. - 48с.

Интервальная оценка интенсивности отказов элементов [I4]

Элементы	: Интенсивность отказов, $\times 10^{-6}$		
	: max	: средняя	: min
Амортизаторы	3,17	1,0	0,3
Включатели быстродействующие	2,1	0,4	0,09
Выпрямители	0,75	0,6	0,28
Выпрямители селеновые	1,60	1,1625	0,32
Генераторы переменного тока	2,94	0,7	0,033
Генераторы	2,41	0,9	0,40
Гнезда	0,02	0,01	0,002
Дроссели фильтров	0,25	0,03	0,012
Детекторы кристаллические	0,371	0,20	0,03
Диоды	1,42	0,20	0,16
Диоды кремниевые	0,25	0,20	0,15
Держатели плавких предохранителей	0,10	0,02	0,008
Датчики высоты	7,50	3,397	1,67
Датчики температуры	6,40	3,30	1,50
Искатели линейные поверочные	0,082	0,05	0,02
Изоляция	0,72	0,50	0,011
Изоляторы	0,08	0,05	0,03
Инверторы	0,0	40,0	10,70
Кабели в комплекте	0,170	0,02	0,002
Конденсаторы постоянной емкости до 600 В	0,018	0,01	0,001
Конденсаторы постоянной емкости свыше 600 В	0,486	0,20	0,02
свыше 1000 В	2,385	1,325	0,1325
керамические	0,213	0,10	0,063
керамические до 600 В	0,113	0,0625	0,040
электрические	0,054	0,035	0,003
слюдяные	0,132	0,075	0,018
до 600 В	0,066	0,0375	0,009
пуговичные	0,057	0,03	0,003
посеребренные	0,141	0,083	0,025
Конденсаторы высоковольтные надежные нейлоновые 300-600 В	0,014	0,01	0,006

Продолжение приложения I

Элементы	: Интенсивность отказов, $\times 10^{-5}$		
	: max	: средняя	: min
Конденсаторы масляные	0,48	0,30	0,12
бумажные	0,034	0,025	0,016
бумажные до 600 В	0,4	0,0125	0,01
высоковольтные надежные фарфоровые	1,02	0,09	0,04
Конденсаторы танталовые	0,83	0,600	0,27
Конденсаторы танталовые фольговые неполярные	2,00	0,100	0,08
Конденсаторы танталовые фольговые полярные	2,10	0,100	0,075
Конденсаторы танталовые полярные травленной фольги	2,20	0,100	0,07
Конденсаторы переменной емкости	0,28	0,1625	0,09
Конденсаторы переменной емкости керамические	0,35	0,155	0,08
Катушки	0,088	0,050	0,038
дрессельные	0,100	0,02	0,01
обмоток (роторов, статоров)	0,045	0,03	0,01
Катушка высокой частоты	0,05	0,01	0,005
Катушка настроечные	0,2858	0,25	0,0142
Контакты	0,4	0,25	0,1
Лампы	35,0	8,625	3,45
Лампы электронные, одиночный диод	2,20	0,80	0,24
Лампы электронные, двойной диод	1,04	0,60	0,32
Лампы электронные, триод двойной триод (1/2)	2,26	1,3	0,07
триод (1/2)	1,74	1,0	0,52
двойной триод связанный	3,88	2,0	1,17
тетрод	2,9	1,6	0,88
усилитель мощности	40,0	20,0	12,0
тиратрок малой мощности	15,0	6,0	3,5
тиратрон большой мощности	41,0	15,0	13,0
стабилизатор напряжения	7,0	0,35	0,13
Лампы электронные, мощные	13,5	10,0	3,8
Лампы электронные, тетрод	2,90	1,6	-
Лампы электронные, приемные газонаполненные	6,5	3,9	-

Продолжение приложения I

Элементы	: Интенсивность отказов, $\times 10^{-6}$		
	: max	; средняя	: min
Лампы сверхминиатюрные, диод	2,2	1,1	-
Лампы, тетрод	3,62	2,15	0,69
Лампы сверхминиатюрные, тиратрон	4,41-11,05	2,6-6,5	0,79-1,95
Муфты	1,1	0,4	0,06
электромагнитные	0,93	0,6	0,45
предохранительные			
фрикционные	0,84	0,3	0,07
соединенного управления	3,21	1,6375	0,065
соединенного вращения	0,049	0,025	0,001
Магниты	7,11	5,65	2,02
Ослабители (аттенюаторы)	1,30	0,6	0,15
Оси	0,62	0,35	0,15
Оконечные заделки приводов (между арматурой)	0,27	0,05	0,041
Приводы	13,7	5,1	0,35
сервомеханизмов двигателей	33,6	12,5	0,86
следящих систем	33,6	12,5	0,86
Подшипники	1,0	0,5	0,02
шариковые высокоскоростные тяжелой серии	3,53	1,8	0,072
Подшипники шариковые низкоскоростные легкой серии	1,72	0,875	0,035
Подшипники качения	1,0	0,5	0,02
Прерыватели	0,80	0,50	0,31
Прокладки пробковые	0,77	0,04	0,003
Передачи зубчатые	0,20	0,12	0,0118
Передача зубчатая винтовая	0,098	0,05	0,002
зубчатая повышающая	4,3	2,175	0,087
зубчатая понижающая	1,75	0,9	0,093
многократная	6,01	1,2	0,82
Переключатели	0,14	0,05	0,009
кулачковые	0,12	0,075	0,048
заблокированные	1,0	0,5	0,25
кнопочные	0,11	0,063	0,023
поворотные	0,660	0,175	0,118
с приводом от двигателя	0,292	0,190	0,128



Продолжение приложения I

Элементы	: Интенсивность отказов, $\times 10^{-6}$		
	: max	: средняя	: min
Предохранители проволочные	0,83	0,50	0,38
Потенциометры	12,5	3,0	0,7
счетно-решающих механизмов	14,7	5,0	1,18
Потенциометры со специаль- ным профилем	15,7	8,0	4,4
Потенциометры	2,05	1,4	0,65
миниатюрные	2,00	1,2	0,72
миниатюрные 10 кОм	1,92	1,19	0,53
Потенциометры миниатюрные 20 кОм	2,04	1,23	0,88
Потенциометр с приводом от двигателя	12,60	5,485	1,71
Рукоятка	0,10	0,075	0,02
Реле электромагнитные	0,5	0,3	0,11
общего назначения	0,48	0,25	0,10
с соленоидными катушками	0,81	0,5	0,30
Реле термически закрытые	0,19	0,04	0,02
малогабаритные	0,54	0,25	0,145
миллисекундные	0,84	0,44	0,18
на контакт			
миниатюрные	0,25	0,06	0,03
на контакт			
миниатюрные быстродействующие	0,13	0,7	0,42
на контакт			
Реле миниатюрные мощные	4,10	0,30	0,15
на контакт			
высококчувствительные	0,89	0,40	0,22
на контакт			
задержки времени	0,749	0,39	0,156
на контакт			
Решающие устройства	0,07	0,04	0,02
Реле времени электронные	1,80	1,20	0,24
Реле времени электромехани- ческие	2,57	1,50	0,79
<b>Счетчики</b>	5,25	4,2	3,5
Светофильтры	3,0	3,345	0,140
Секторы зубчатые	1,8	0,9125	0,051
Счетчики электрические	5,77	1,375	1,35

Элементы	Интенсивность отказов, $\times 10^{-6}$		
	max	средняя	min
Схемы	4,3	1,5	0,51
Сопротивления	0,57	0,25	0,11
угольные композиц.	0,15	0,43	0,017
Сопротивления пленочные	0,058	0,03	0,017
постоянные	0,07	0,03	0,01
постоянные многоваттные	0,065	0,028	0,009
Сопротивления прециз.	0,292	0,125	0,041
линейные (тириты	0,153	0,10	0,047
проволочные	0,165	0,087	0,046
проволочные точные	0,191	0,091	0,052
Сопротивления проволочные мощные	0,076	0,04	0,021
прецизионные	0,114	0,06	0,032
Сервомеханизмы	3,4	2,4	1,1
Соленоиды	0,55	0,05	0,036
Сельсины	0,61	0,35	0,09
решающих устройств	1,94	1,1125	0,29
Термисторы	1,40	0,6	0,20
Трансформаторы	0,62	0,2	0,07
Трансформаторы звуковой частоты	0,04	0,02	0,01
промежуточной частоты	0,31	0,1	0,035
Трансформаторы развязывающие	0,093	0,03	0,011
выходные	2,08	1,04	0,46
силовые	2,08	1,04	0,46
силовые низкого напряжения	0,60	0,3	0,13
импульсные высокого напряжения	0,235	0,15	0,065
силовые высокого напряжения	1,88	0,94	0,407
Трансформаторы импульсные низкого напряжения	0,235	0,15	0,065
Трансформаторы прецизионные	0,814	0,2625	0,092
Транзисторы	1,02	0,61	0,38
Транзисторы используемые как усилители	0,84	0,5	0,31
Транзисторы германиевые	1,91	0,9	0,60
Транзисторы переключатели	0,71	0,4	0,1
Фильтры электрические	3,0	0,345	0,140
Штепсельные разъемы (для блоков)	0,70	0,175	0,10

Продолжение приложения I

Элементы	:Интенсивность отказов, $\times 10^{-6}$		
	: max	: средняя	: min
Штифт	2,60	1,625	0,65
Электродвигатели	7,5	0,625	0,15
вентиляторов	5,5	0,2	0,05
электрические	0,58	0,3	0,11
гидравлические	7,15	4,3	1,45
Электродвигатели (сервомоторы)	0,35	0,23	0,11
шаговые	0,71	0,37	0,22

Поправочные коэффициенты к интенсивности отказов в зависимости от условий эксплуатации [15]

Элементы	:Лабораторные условия:	:Самолетная аппаратура: (воздух)	:Аппаратура ра ракет (космос)	:Аппаратура АОК: наземная	:Оборудование ОТС (космос)
<b>Конденсаторы</b>					
обычные	0,92	2	5	10	10 <sup>3</sup>
танталовые	0,85	4	25	50	5 10 <sup>3</sup>
переменной емкости	0,83	5	42	100	6 10 <sup>4</sup>
Штепсельные разъемы	0,76	10	220	300	3 10 <sup>5</sup>
<b>Диоды:</b>					
переключающие	0,95	1	2	10	6 10 <sup>3</sup>
Зенера	0,95	1	2	10	6 10 <sup>3</sup>
мощные	0,85	4	25	50	5 10 <sup>3</sup>
параметрические	0,80	7	100	200	6 10 <sup>3</sup>
<b>Электромеханические устройства:</b>					
счетчики	0,71	20	1000	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>
двигатели	0,73	15	550	1000	10 <sup>5</sup>
Предохранители	0,83	5	42	80	8 10 <sup>3</sup>
Катушки индуктивности	0,82	6	70	120	2 10 <sup>4</sup>
Гироскопы и сервомоторы	0,76	10	220	200	3 10 <sup>5</sup>
Моторы приводов	0,71	20	1000	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>
Механизмы	0,76-0,67	10-30	220-2800	3000	3 10 <sup>5</sup>
<b>Элементы микроэлектроники</b>					
Резисторы:	0,90	2,5	8,5	20	2 10 <sup>5</sup>
угольные и др.	0,92	2	5	10	10 <sup>3</sup>
мощные	0,88	3	13	20	2 10 <sup>3</sup>
переменные	0,85	4	25	50	5 10 <sup>3</sup>
Реле: миниатюрные	0,74	12	340	500	6 10 <sup>5</sup>
мощные	0,73	15	550	900	8 10 <sup>5</sup>
Переключатели (тумблеры, кнопки, роторные)	0,83	5	42	100	10 <sup>3</sup>
<b>Соединения:</b>					
пайки	0,76	10	220	500	6 10 <sup>5</sup>
скрутки	0,71	20	1000	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>
сварные	0,65	40	5500	5 10 <sup>5</sup>	5 10 <sup>7</sup>
сварные свернутые	0,60	100	8000	8 10 <sup>5</sup>	8 10 <sup>7</sup>
Трансформаторы	0,82	6	70	150	2 10 <sup>4</sup>

Продолжение приложения 2

Элементы	:Лабораторные условия:	:Самолетная аппаратура: (воздух)	:Аппаратура ра ракет (космос)	:Аппаратура наземная	:Оборудования ОТС (космос)
Транзисторы:					
переключающие	0,90	2	8,5	20	50
мощные	0,85	4	25	50	5 10 <sup>3</sup>
Лампы:					
приемные	0,81	6,5	80	140	3 10 <sup>3</sup>
передающие	0,71-0,65	20-4	1000-5500	5 10 <sup>5</sup>	5 10 <sup>7</sup>

Приложение 3

Технические характеристики линейного асинхронного двигателя (ЛАД) общепланетного транспортного средства [22]

Наименование параметра	Ед. изм.	Условное обозначение	Исходное расчетное значение
<b>I. Исходные данные</b>			
Фазное напряжение	В	$U_{1н}$	$22,25 \cdot 10^3$
Номинальная мощность	Вт	$P_n$	$3 \cdot 10^9$
Число фаз статора	шт	$m_1$	3
Число фаз ротора	шт	$m_2$	3
Частота вращения	об/с	$n$	$2,5 \cdot 10^4$
Зазор	м	$\delta$	0,01
Частота питания	Гц	$f_1$	8000
Длина статора	м	$l$	0,2
Число пар полюсов			
$P = \frac{f}{n} = \frac{8000}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 32 \cdot 10^6$	шт	P	$32 \cdot 10^6$
Полюсное деление			
$\tau = \frac{\pi D}{2P} = \frac{40 \cdot 10^6}{64 \cdot 10^6} = 0,625$	м	$\tau$	0,625
Число пазов на полюс и фазу	шт	$q_1$	2
Число пазов статора	шт	$Z_1$	$384 \cdot 10^6$
$Z_1 = 2m_1 p q_1 = 2 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 10^6 = 384 \cdot 10^6$			
Зубцовое деление статора,	м	$t_1$	0,1
$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{40 \cdot 10^6}{384 \cdot 10^6} = 0,104$			
Число параллельных ветвей	шт	$a_1$	$14 \cdot 10^3$
Число последовательных витков фазы статора (волновая обмотка)	шт	W	4571
$W_1 = p q_1 \frac{S_{z1}}{a_1} = 32 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \frac{1}{14 \cdot 10^3} = 4571$			
Магнитный поток	В	$\Phi$	$1,37 \cdot 10^4$
$\Phi = \frac{U_{1u}}{4,44 f_1 W_1 K_{o1}} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{4,44 \cdot 8000 \cdot 4571}$			
Индукция в зазоре	Тл	$B_\delta$	$15,66 \cdot 10^{-4}$
$B_\delta = \frac{\Phi}{2 \delta \tau l K_{oc1}} = \frac{1,37 \cdot 10^{-4}}{0,7 \cdot 0,625 \cdot 0,2}$			

Наименование параметра	: Ед. изм.:	Условное обозначение	Исходное значение
------------------------	-------------	----------------------	-------------------

Магнитное напряжение зазора $F_{\delta} = 1,6 \text{ В } 10^6 = 1,6 \cdot 15,66 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2} \cdot 10^6$	А	$F_{\delta}$	25,1
--	---	--------------	------

Общий коэффициент насыщения $K_M = \frac{F}{F_{\delta}}$		$K_M$	1,16
---	--	-------	------

Индуктивное сопротивление взаимной индукции	Ом	$X_M$	0,27
---	----	-------	------

$$X_M = \frac{4,8}{10^0} \cdot \frac{\tau l_1 W_1^2 f_1 K_o^2 \delta_1}{K_M \delta \rho} =$$

$$= \frac{4,8}{10^0} \cdot \frac{0,625 \cdot 0,2 (4751)^2 \cdot 800}{1,16 \cdot 0,01 \cdot 32 \cdot 10^0}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора	Ом	$X_I$	0,03
---	----	-------	------

$$X_I = 0,158 \frac{f_1}{100} \left( \frac{W_1}{100} \right) \frac{2b}{\rho q_1} \cdot \lambda$$

$$= 0,158 \cdot 80 (45,71)^2 \frac{0,2}{32 \cdot 10^0 \cdot 2} \cdot 3,68$$

где принято  $\lambda = 2$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1 (b_{л1} - 0,64 \text{ В } \tau)}{l} =$$

$$= 0,34 \frac{2}{0,2} (0,94 - 0,64 \cdot 0,625)$$

		$\lambda_{л1}$	1,84
--	--	----------------	------

Длина лобовых частей	м	$l_{л1}$	0,94
----------------------	---	----------	------

$$l_{л1} \approx 1,5 \tau = 0,94 \text{ м};$$

$$\beta = 1$$

Активное сопротивление обмотки статора	Ом	$r_1$	$1,47 \cdot 10^{-3}$
--	----	-------	----------------------

$$r_1 = \frac{l}{46} \cdot \frac{\rho_1}{S_{сн \text{ эл}} \cdot d_1} =$$

$$\frac{1}{46} \cdot \frac{10,42 \cdot 10^3}{11 \cdot 14 \cdot 10^3}$$

где средняя длина полувитка обмотки статора	м	$l_{ср1}$	1,14
---	---	-----------	------

$$l_{ср1} \approx l + 1,5 \tau = 0,2 + 1,5 \cdot 0,625$$

Сечение провода обмотки	мм <sup>2</sup>	$S_{сн \text{ эл}}$	11
-------------------------	-----------------	---------------------	----

Общая длина проводников фазы обмотки статора	м	$l_1$	$10,42 \cdot 10^3$
--	---	-------	--------------------

$$l_1 = 2 W_1 l_{ср} = 2 \cdot 4751 \cdot 1,4$$

Наименование параметра	Ед. : :изм.	Условное: обозначе ние	Исходное: расчетное значение е
Число пазов ротора с короткозамкнутой клеткой		$Z_2$	$310 \cdot 10^6$
Сопротивление стержня клетки	Ом	$Z_c$	$10,3 \cdot 10^{-5}$
$Z_c = \frac{l_2}{l_c} \frac{I}{46} \cdot \frac{0,2}{42,0}$			
где сечение стержня	мм <sup>2</sup>	$S_c$	42
Сопротивление кольца клетки	Ом	$Z_k$	$5,84 \cdot 10^{-5}$
$Z_k = S \frac{\pi D k}{Z_2 (ab)} = \frac{I}{46} \cdot \frac{40 \cdot 10^6}{310 \cdot 10^6 (6 \cdot 8)}$			
Сопротивление фазы ротора	Ом	$Z_2$	$4 \cdot 10^{-4}$
$Z_2 = Z_c + \frac{Z_k}{\Delta^2} = 10,3 \cdot 10^{-5} + \frac{5,84 \cdot 10^{-5}}{0,4}$			
где $\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \sin \frac{32 \cdot 10^6}{310 \cdot 10^6}$			
$= 0,64$			
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора	Ом	$X_2$	0,14
$X_2 = 7,9 \pi l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 11,1 \cdot 10^{-8}$			
где коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки ротора размеры в см)		$\lambda_2$	11,1
$\lambda_{12} = \frac{2,3 \text{ Дк}}{Z_2 b \Delta^2} \frac{l_0}{\gamma} = \frac{4,7 \text{ Дк}}{a + 2b}$			
$\frac{2,3 \cdot 12,7 \cdot 10^8}{310 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 0,4} \frac{l_0}{\gamma} = \frac{4,7 \cdot 12,7 \cdot 10^8}{0,6 + 1,6}$			
$\lambda_2 \approx \lambda_{12}$			
Коэффициент приведения	Кпр		0,81
$K_{пр} = \frac{4 m_1 (X_1 K_{01})^2}{Z_2} = \frac{4 \cdot 3 (4,571)^2 \cdot 10^6}{310 \cdot 10^6}$			
Сопротивление фазы ротора, приведенное к статору	Ом	$Z_2'$	$3,24 \cdot 10^{-4}$
$Z_2' = K_{пр} Z_2 = 0,81 \cdot 4 \cdot 10^{-4}$			
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к статору	Ом	$X_2'$	0,11
$X_2' = K_{пр} X_2 = 0,81 \cdot 0,14$			
Коэффициент рассеяния		$G$	1,11



Наименование параметра	:Ед. :Условное: :изм. обозначе: : : ние : значение	Исходное расчетное значение
------------------------	--	-----------------------------------

$$G \approx I + \frac{X_I}{X_m} = I + \frac{0,03}{0,27}$$

Параметры П-образной схемы замещения

$R_1 = G_1 Z_1 = 1,11 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3}$	Ом	$R_I$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
---	----	-------	---------------------

$X_1 = G_1 X_1 = 1,11 \cdot 30 \cdot 10^{-3}$	Ом	$X_I$	$33 \cdot 10^{-3}$
---	----	-------	--------------------

$X_2 = G_1^2 X_2' = 1,23 \cdot 0,11$	Ом	$X_2$	0,135
--------------------------------------	----	-------	-------

$R_2 = G_1^2 R_2' = 1,23 \cdot 0,324 \cdot 10^{-3}$	Ом	$R_2$	$0,4 \cdot 10^{-3}$
---	----	-------	---------------------

Потери в меди статора	Вт	$P_{M1}$	$0,124 \cdot 10^9$
-----------------------	----	----------	--------------------

$$P_{M1} = m_1 I_1^2 Z_1 = 3(0,17)^2 \cdot 10^{12} \cdot 1,44 \cdot 10^{-3}$$

(задан ток статора  $I = 0,17 \cdot 10^6$ )

Потери в меди ротора	Вт	$R_{M2}$	$0,2 \cdot 10^8$
----------------------	----	----------	------------------

$$R_{M2} = 2 Z_2 I_2^2 Z_2 = 3 \cdot 10 \cdot 10^6 (12,8)^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4}$$

где ток ротора	А	$I_2$	12,8
----------------	---	-------	------

$$I_2 = I_1 \frac{6 W K_{o1}}{Z_2} = 0,85 \cdot 0,17 \cdot 10^6 \frac{6 \cdot 4571}{310 \cdot 10^6}$$

Потери в стали принимаем	Вт	$P_c$	$0,2 \cdot 10^9$
--------------------------	----	-------	------------------

$$P_c = 0,2 \cdot 10^9$$

Электромагнитная мощность	Вт	$P_{эм}$	$4,216 \cdot 10^9$
---------------------------	----	----------	--------------------

$$P_{эм} = P_I - P_{M1} - P_c = 3 \cdot 22,25 \cdot 10^3 - 0,17 \cdot 10^6 - 0,4$$

$$- 0,124 \cdot 10^9 - 0,2 \cdot 10^9 = 4,54 \cdot 10^9 - 0,324 \cdot 10^9$$

(задан коэфф. мощности  $\cos \phi_1 = 0,4$ )

Полезная мощность при подсинхронной скорости	Вт	$P_2$	$4,2 \cdot 10^9$
--	----	-------	------------------

$$P_2 = B_m = P_{M2} = 4,216 \cdot 10^9 - 0,2 \cdot 10^8$$

Скольжение при посинхронной скорости	$S_H$		$4,74 \cdot 10^{-3}$
--------------------------------------	-------	--	----------------------

$$S_H = \frac{P_{M2}}{P_{эм}} = \frac{0,2 \cdot 10^8}{4,216 \cdot 10^9}$$

К.п.д. без учета добавочных потерь (оценка)	$\eta_H$		0,925
---	----------	--	-------

$$\eta_H = \frac{P_2}{P_I} = \frac{4,2 \cdot 10^9}{4,54 \cdot 10^9}$$

Наименование параметра	Ед. изм.:	Условное обозначение	Исходные данные	Расчетное значение
Активное сопротивление главной ветви П-образной схемы замещения при	Ом	$R_s$		0,086
$R_s = R_I + \frac{R_2}{S_2} = 1,6 \cdot 10^{-3} + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{4,74 \cdot 10^3}$				
Индуктивное сопротивление главной ветви	Ом	$X_s$		0,168
$X_s = X_k = X_1 + X_2 = 33 \cdot 10^{-3} + 135 \cdot 10^{-3}$				
Полное сопротивление главной ветви	Ом	$Z_s$		0,189
$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$				
			$\cos \varphi'_2$	0,45
			$\sin \varphi'_2$	0,888
$\cos \varphi'_2 = \frac{R_s}{Z_s} = \frac{0,086}{0,189}$				
$\sin \varphi'_2 = \frac{X_s}{Z_s} = \frac{0,168}{0,189}$				
Ток в главной ветви	А	$I_2''$		$0,118 \cdot 10^6$
$I_2'' = \frac{U_1}{Z_s} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{0,189}$				
Активная составляющая тока статора	А	$I_{1a}$		$0,053 \cdot 10^6$
$I_{1a} = I_2'' \cos \varphi'_2 = 0,118 \cdot 10^6 \cdot 0,45$				
Индуктивная составляющая тока статора	А	$I_{1p}$		$0,179 \cdot 10^6$
$I_{1p} = I_m + I_2'' \sin \varphi'_2 = 0,074 \cdot 10^6 + 0,118 \cdot 10^6 \cdot 0,888$				
где намагничивающий ток	А	$I_m$		$0,074 \cdot 10^6$
$I_m \approx \frac{U_1}{X_1 + X_m} = \frac{22,25 \cdot 10^3}{0,03 + 0,27}$				
Ток статора	А	$I_1$		$0,186 \cdot 10^6$
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \sqrt{(0,053^2 + 0,179^2)} \cdot 10^6$				
Коэффициент мощности			$\cos \varphi_1$	0,28
$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} = \frac{0,053 \cdot 10^6}{0,186 \cdot 10^6}$				
Масса меди статора	Мнс кг			$0,43 \cdot 10^8$ (43 тыс. т)
$M_{mc} = Z_1 S_{m1} \rho_{\text{эл}} S_{\text{сверст}} \cdot 10^{-5}$				
$M_{mc} = 384 \cdot 10^6 \cdot 1,11 \cdot 114 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5}$				

Наименование параметра	Ед. изм.:	Условное обозначение:	Исходное расходное значение:
Масса стержней клетки ротора $M_c = L_2 \cdot \beta_e \cdot \rho \cdot \delta_m \cdot 10^{-5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 42 =$ $= 20 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5}$	$M_c$	кг	$0,23 \cdot 10^8$ (23 тыс. т.)
Масса колец клетки ротора $M_k = 2 \cdot \pi \cdot R_{sk} \cdot \delta_m \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 40 \cdot 10^8$ $48 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5}$	$M_k$	кг	$0,34 \cdot 10^8$ (34 тыс. т.)
Масса клетки ротора	$M_{кл}$	кг	$0,57 \cdot 10^8$

**Условные обозначения**

- |                          |                |
|--------------------------|----------------|
| В - вольт                | Тл - тесла     |
| Вт - ватт                | А - ампер      |
| об/с - обороты в секунду | кг - килограмм |
| м - метр                 | шт. - штука    |
| Гц - герц                |                |
| Вб - вебер               |                |

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЯ  
О Т С [20]

1. Производительность - I млн. тонн грузов в год (5 запусков через 72 дня - сезонный ритм).
2. Конструкция ротора состоит из отдельных цилиндрических секций.
3. Погонный вес одного метра ротора - 10 кг.
4. Средняя плотность роторной конструкции - 1000 кг/м<sup>3</sup>
5. Поперечный размер ротора 100 см<sup>2</sup>.
6. Диаметр ротора - 12 см.
7. Диаметр трубы ОТС - 20 см.
8. Масса ротора по экватору 40000 x 10 = 400 10<sup>3</sup> тонн.
9. Длительность разгона ротора до скорости 8 км/с - 10 суток.
10. Удельная теоретическая энергия для доставки груза на орбиту - 42 МДж/кг.
  - с учетом статора и МП - 55 МДж/кг
  - с учетом необходимой внутренней энергии для всплывания - 60 МДж/кг.
  - с учетом энергии для записки магнитного подвеса вакуумированной установки, на нейтрализацию сопротивления остаточного воздуха в процессе разгона и на возможные потери в системе - 100 МДж/кг
11. Масса статора с магнитным подвесом составляет 30 % от массы ротора.
12. Общие энергозатраты на один запуск
$$E = 0,1 \text{ ГДж/кг} \cdot 4 \cdot 10^8 \text{ кг} = 4 \cdot 10^7 \text{ ГДж}$$
13. Необходимая мощность электростанций - 20 Гвт.
14. Рабочая мощность электростанций - 30 Гвт.
15. Погонная мощность эл. станций - 1,5 вт/ 1000 км.

АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЯ ОТС и АОК в ЦЕЛОМ

(термоядерная, химическая, ядерная) [20]

1) Термоядерная энергия за счет преобразования тепла с сотен млн. градусов (режим термоядерной реакции в условиях сверхвысокого вакуума) до сотен и тысяч градусов с последующим термоэлектропреобразованием (низкий КПД, тепловое загрязнение окружающей среды выделение газообразного трития, накопление радиационных элементов в поглотителе [20]).

Целесообразность использования термоядерной энергии для межпланетного транспорта, т.е. где уже существует глубокий вакуум.

2) Химическое топливо ограничено (нефть, масло), одновременно загрязнители атмосферы.

3) Ядерная энергетика (топливо дьявола). Первая атомная электростанция в СССР в 1954 году мощн. 5000 квт. Доля энергии на ядерных эл. станциях в СССР составл. 10 %, во Франции - 50 %.

Прекращено строительство Краснодарской АЭС, Крымской АЭС, происходит ликвидация Армянской АЭС.

Достоинство ядерной энергетики:

- 1) высокая энергоемкость,
- 2) отсутствие газообразных и жидких отходов,
- 3) безлюдная технология,
- 4) большие запасы ядерного топлива,

Недостатки:

- 1) радиоактивное излучение в процессе его использования;
- 2) высокая опасность отходов;
- 3) катастрофизм всемирный (при гипотетической аварии ядерной энергетики),
- 4) в аспекте надежности "узкие места" - ядерный паровой котел, турбины влажного пара;
- 5) КПД ниже КПД тепловых станций на химическом топливе на

25-30 %.

6) сложные (с низкой надежностью) подсистемы безопасности, (Затраты на реализацию системы безопасности составляют половину общей стоимости АЭС) ;

7) взрыв реактора приводит к максимальной гипотетической аварии. При больших мощностях реактора бетонный колпак усугубляет аварийную ситуацию.

Существующий путь развития ядерной энергетики есть величайшая инженерно-техническая ошибка XX -го века [20].

Согласно первого закона "гуманистической инженерии" никакая инженерно-техническая разработка недопустима, если в ней максимальная гипотетическая авария есть катастрофа всепланетного масштаба.

Предлагается использовать гравитационно-термодинамическую ядерную энергетику включающую ядерный реактор (один или несколько) расположенных под землей ниже уровня артезианского бассейна [20]. Тепло от ядерных реакторов подводится через радиационную развязку к вблизи находящемуся пароводяному баку, связанному с поверхностью двумя вертикальными каналами (по одному каналу подводится вода, по другому отводится пар к системе утилизации пара, размещенного на поверхности земли).

УТВЕРЖДАЮ



Директор Центра  
"Звездный мир"

А.Э.Юницкий

1989г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Проведение исследований и разработка требований  
по надежности, живучести и безопасности ОТС и его  
моделей

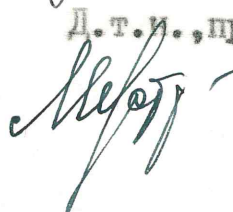
НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО  
СРЕДСТВА

СОГЛАСОВАНО


Д.т.н., профессор

 В.П.Мешалкин

Д.т.и., профессор

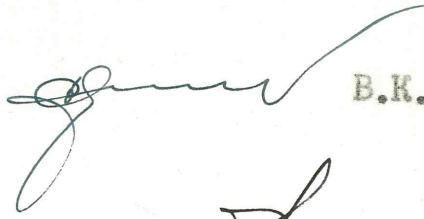
 М.А.Ястребенецкий

Руководитель темы  
К.Т.Н., С.Н.С.

 В.К.Кришнев

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

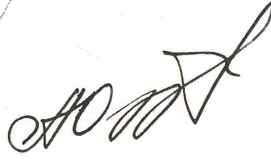
Ответственный исполнитель  
к.т.н., с.н.с.



В.К. Кришнев

Исполнитель

Научный руководитель  
программы "Экомир"



А.Э. Юницкий



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Эволюция общепланетного транспортного средства в аспекте живучести	8
1.1. Факторы определяющие живучесть ОТС	9
1.2. Выбор показателей живучести ОТС.	14
1.3. Анализ моделей живучести	16
2. Методика оценки и нормирования живучести ОТС	20
2.1. Логико-вероятностная модель живучести	20
2.2. Оценка живучести по состоянию ОТС	23
2.3. Оценка живучести ОТС по результатам выполнения задания	24
3. Нормируемые показатели живучести ОТС, РСУ и ОАК в целом	26
4. Обеспечение безопасности функционирования ОТС	37
4.1. Модели надежности систем защиты от аварии	39
4.2. Нормируемые показатели "неотъемлемой безо- пасности" ОТС	42
Заключение.	45
Список использованных источников	46
Приложение. Факторы обеспечения живучести гравита- ционно-термодинамической АЭС	48

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

- НВ - неблагоприятные воздействия
- СОЖ - средства обеспечения живучести
- ПП - первичные последствия
- ВП - вторичные последствия
- ОТС - общепланетное транспортное средство
- РСУ - распределенная система управления
- ОАК - общепланетный автоматический комплекс
- ФРС - логическая функция работоспособности ОТС
- Вк - событие, состоящее в  $K$  - кратном появлении НВ
- $Q$  (к) - вероятность потери работоспособности ОТС при условии  $K$  - кратного НВ (условный закон уязвимости)
- $R$  (к) - вероятность сохранения работоспособности ОТС при условии  $K$  - кратного НВ (выживаемость ОТС)
- $d$  - минимальное число дефектов (единиц измерения ущерба) "С" появление которых приводит к потере работоспособности ОТС, уменьшенное на единицу ( $d = C - 1$ ) (запас живучести)
- $\gamma$  - максимальное число дефектов, которое еще может выдержать ОТС без потери работоспособности (запас живучести)
- $A_p$  - число работоспособных структур ОТС
- $S_0$  - базовая структура ОТС
- $S_i$  - новая структура ОТС, возникнувшая в результате НВ
- $S^p$  - множество работоспособных структур ОТС
- $P(t/S_i)$  - вероятность выполнения ОТС целевой задачи на интервале  $(0, t)$  после его реконфигурации, в результате НВ, в новую структуру  $S_i$
- $P(t/S_0)$  - вероятность выполнения задачи на интервале  $(0, t)$  при базовой структуре ОТС
- $Y_i(t)$  - условная функция живучести
- $P_k(n)$  - вероятность возникновения структуры  $S_n$  после  $K$ -крат-

ного НВ

- $Y(t, K)$  - усредненная функция живучести
- $P(S_i)$  - безусловная функция живучести
- $P(B_k)$  - вероятность возникновения структуры  $S_i$
- $m$  - вероятность  $K$  - кратного НВ
- $Z_j(k)$  - число компонент ОТС
- число случаев, в которых возникает структура  $S_j$  при  $K$ -кратном НВ
- $L_{mn}$  - число перестановок из  $m$  компонент  $n$  типов
- $V_{nj}$  - число различных векторов, приводящих к структуре  $S_j$   
(максимальное число  $V_{nj} = j \cdot A_p$ )
- $\bar{R}(k)$  - вероятность сохранения работоспособности ОТС, при равновероятном попадании компонент в область действия НВ.

## ВВЕДЕНИЕ

Учитывая глобальность масштабов и стоимость общепланетного транспортного средства, простои ОТС приводят к значительному ущербу от длительного отключения даже части путевой структуры ОТС, поскольку нарушения работоспособности любого технологически связанного участка ОТС приводит к "поражению" всей ОТС и общепланетного комплекса в целом. Сложность и трудоемкость восстановительных операций при этом должна быть сведена до оптимального минимума.

Поскольку в ОТС присутствует непосредственная связь между отдельными энергетическими установками (вакуумными, криогенными), атомными электростанциями и т.п., значительную роль играют вторичные последствия нарушений работоспособности компонент ОТС. Поэтому возникает также проблема устранения или ограничения вторичных последствий отказа компоненты ОТС.

Существует также проблема быстрого и оптимального включения имеющихся в ОТС резервов, вследствие нарушения основных агрегатов путевой структуры либо технических средств системы управления, в интересах выполнения жизненно важных функциональных задач ОАК.

В традиционной цепочке: причины изменений состояния ОТС - последствия этих изменений - способы и средства предотвращения нежелательных последствий, существенные, не решенные проблемы есть в каждом звене. Однако наиболее трудные из них сопряжены с анализом безопасности и ее обеспечением на стадиях разработки, проектирования и эксплуатации.

Если свойства надежности и живучести различаются главным образом, по признаку "причина отказа", то свойство безопасности, по признаку "последствия отказа".

Вопросы связанные с нормированием показателей надежности ОТС исследованы и приведены в [1] согласно разработанной постановки задачи [2]

В данном отчете приведены результаты научного исследования

и нормирования показателей живучести и безопасности разрабатываемого, по программе "Экомир", общепланетного транспортного средства и общепланетного автоматического комплекса, включающего как единое целое ОТС и распределенную систему управления.

## 1. ЭВОЛЮЦИЯ ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В АСПЕКТЕ ЖИВУЧЕСТИ

Согласно [2] под живучестью понимается свойство ОТС сохранить и восстанавливать способность к обеспечению выполнения целевых задач ОАК путем реализации целенаправленных функций в заданном объеме и в течение заданной наработки при изменении структуры ОТС, комплекса и (или) алгоритмов и условий его функционирования вследствие неблагоприятных воздействий (НВ).

В результате неблагоприятных воздействий возникают первичные последствия (ПП), выражающиеся в нарушении работоспособности компонент ОТС (корпуса опорного кольца, линейного двигателя, электродинамического подвеса, ротора-маховика, эстакады, понтон, мачт, тормозных систем и т.д.) или функциональных связей между ними, в искажении алгоритмов функционирования.

Живучесть ОТС проявляется в свойстве постепенной деградации, возникающем благодаря введению как пассивных, так и активных средств обеспечения живучести (СОЖ), к которым относятся средства контроля работоспособности, средства аварийной защиты средства реконфигурации и управления. Таким образом действие СОЖ оказывает влияние на развитие первичных последствий и в зависимости от интенсивности процессов в ОТС, конкретных внешних условий функционирования (на земле, ближнем космосе), эффективности СОЖ, ОТС в конечном счете переходит в одно из возможных устойчивых состояний. По своей природе этот переходный процесс является стохастическим. После перехода ОТС в новое состояние выполняется оценка первичных последствий, в результате которой состояние ОТС относят к одному из трех классов; работоспособное, неработоспособное (аварийное), аварийное. По результатам этой классификации проводится оценка живучести по состоянию ОТС. При работоспособном состоянии, ОТС возвращается к выполнению задания немедленно. Если состояние неработоспособное, то ОТС может вернуться к выполнению задания пос-

ле некоторых процедур восстановления. Перевод ОТС в новое устойчивое состояние (путем подключения резервных обмоток линейного двигателя, резервных участков электродинамического подвеса, резервных агрегатов электропитания, систем термостатирования и вакуумирования и т.д.) не завершает борьбы за живучесть, так как при дальнейшем функционировании ОТС до фиксации оболочки с ротором на космической орбите могут проявляться и вторичные последствия НВ, более отдаленные, но не менее опасные, чем первичные. Скорость развития вторичных последствий (температурное, расширение, растяжение, вибрация, угловые смещения, коррозия и др.) и конечный результат также существенно зависят от работы СОЖ.

Таким образом, в процессе борьбы за живучесть выделяет два этапа: на первом этапе идет борьба за сохранение работоспособности ОТС, на втором этапе - борьба за успешный выход в дальний космос оболочки с ротором и фиксации ее на космической орбите. Соответственно этому будем рассматривать и две задачи оценки и обеспечения живучести ОТС.

Во всех возможных схемах траектории эволюции ОТС существенную роль играет "эффект гонок": процессы развития последствий НВ и процессы борьбы за живучесть, поскольку они протекают во времени. Поэтому тяжесть НВ, состояние ОТС во многом определяются возможностями СОЖ, их быстродействием, оперативностью и эффективностью.

#### 1.1. Факторы, определяющие живучесть ОТС.

Неблагоприятные воздействия воспринимаются ОТС везде: на земле, при подъеме ротора с оболочкой в ближний космос (до 100 км) и нахождения ротора в дальнем космосе (300-500 км) в качестве базовой космической площадки (оболочка фиксируется на заданной космической орбите с вращающимся в ней ротором - маховиком) или в качестве промышленного сырья и материалов (оболочка автоматически отсоединяется и возвращается на парашютах на землю для повторного

ее использования; ротор, как источник сырья продолжая увеличиваться в диаметре, разрывается в заданных местах на части, которые затем перехватываются космическими аппаратами и транспортируются на космический полигон (две-три базовые космические площадки соединенные между собой сеткой с жесткими перемычками).

На земле путевая структура ОТС в виде опорного кольца крепится на эстакадах (сухопутный вариант) и на понтонах, мачты которых крепятся к поплавкам и якорям (морской вариант). Получив необходимую угловую скорость (8 км/с) оболочка вместе с ротором отделяется от опорного кольца и расширяется, увеличиваясь в диаметре. Поскольку ротор вращается в вакуумной среде, то будет увеличиваться и вакуумный объем оболочки, а значит и сила атмосферного давления. Но учитывая, что с высотой атмосферное давление уменьшается, колебания атмосферного давления при подъеме ротора с оболочкой в ближний космос, как неблагоприятное воздействие, из рассмотрения исключено.

При фиксации оболочки с ротором на космической орбите, существенное влияние на живучесть будет оказывать трудно предсказуемая скорость вращения самой оболочки вокруг земли. Но учитывая, что на поверхности оболочки перпендикулярно ее оси будут установлены тормозные диски для предотвращения вращения оболочки, фактор скорости вращения оболочки, как неблагоприятное воздействие, из рассмотрения исключено.

Автономная система термостатирования режима вращения ротора должна обеспечить рабочую температуру внутри оболочки, поскольку температура; как неблагоприятное воздействие существенно влияет на магнитные свойства электромагнитного подвеса. Предполагается, что снижению температуры будет способствовать конструкция самого ротора в оболочке, где поверхность ротора и оболочки изготавливается из отдельных точечных магнитов, используя полимерную прослойку между ними из эластичного полиуретана. При этом электродинамический подвес подвержен отказу только при остановке ротора, что также способствует



нейтрализации температуры, как неблагоприятного воздействия.

Разновидность основных неблагоприятных воздействий при нахождении ОТС на земле, при подъеме оболочки с ротором в ближний космос (до 100 км от земли), при фиксации оболочки с ротором на космической орбите (300-500 км от земли) приведена в таблице I.

Устойчивость ОТС к развитию последствий НВ определенного типа (высокотемпературные тепловые процессы, пожары, размножение ошибок в вычислительных системах распределенной системы управления (PCY); механические разрушения ротора, линейного двигателя, системы подвеса, опорного кольца, оболочки и др.) является также внутренней характеристикой компонент и ОАК и зависит от свойств материалов, конструктивных решений, схем соединений, наличия и своевременного срабатывания, средств аварийной защиты и характеризуется как возможность появления тех или иных последствий НВ, зависящих от интенсивности НВ, так и скоростью протекания процессов, вызванных НВ.

Действия СОЖ являются одним из главных факторов учитываемых при оценке и обеспечении живучести. При этом СОЖ разделяются на внутренние, встроенные в опорное кольцо и PCY ОТС и внешние средства созданные для обслуживания путевой структуры ОТС в виде "спасательной службы" подключаемые по заявке по мере необходимости.

Основными направлениями борьбы за живучесть, обеспечиваемыми СОЖ, являются своевременное оповещение об опасности появления и результатах НВ, противоаварийная защита, резервирование (структурное резервирование, использование запасов производительности систем энергообеспечения, термостатирования, вакуумирования и их мощности); восстановление. К средствам восстановления работоспособности компонент путевой структуры ОТС, PCY относятся также средства локализации и устранения вторичных последствий отказов, средства восстановления прочности, огнестойкости, устойчивости и др. технических характеристик компонент ОАК.

Таблица I

Разновидность основных неблагоприятных воздействий (НВ)

Наименования НВ	Последствия НВ
на Земле	
1. Ураганный ветер	Повреждения (трещины, изломы) опорного кольца, эстакады сухопутной путевой структуры
2. Штормовые волны в океане	Повреждения опорного кольца, мачт опорного кольца, систем крепления (поплавковый, якорный) мачт, понтонов морской путевой структуры
3. Пожары	Повреждение опорного кольца, систем энергоснабжения, термостатирования, вакуумирования
4. Чрезмерные осадки	Повышенная вибрация опорного кольца, мачт, эстакад, понтонов и их разрушение
5. Землетрясения	Сверхвысокие вибрации и колебания земли и морские стихии, передающиеся в равной степени на эстакады, мачты, понтоны с последующим их разрушением
6. Удары шаровых и линейных молний	Прожог кабельных и воздушных линий электропередач, нарушения в системе электрообеспечения (первичные последствия)
7. Неисправность систем энергоснабжения	Отказ РСУ ОТС, внутренних и встроенных СОЖ, потери работоспособности ОАК
8. Неисправность систем термостатирования	Потеря работоспособности ОАК при подготовке к запуску оболочки с ротором
9. Неисправность систем вакуумирования	Потеря готовности ОАК к запуску
10. Терроризм	Разрушение (огнестрельным оружием, взрывом) опорного кольца, эстакад, мачт.
На подъеме оболочки с ротором в ближний космос (до 100 км)	
1. Ураганный ветер	Вибрация, нарушение защитного слоя оболочки ротора (первичные повреждения)
2. Чрезмерные осадки	Вибрация, нарушение защитного слоя оболочки ротора
3. Удары шаровых и линейных молний (при подъеме и прохождении атмосферы)	Повреждение корпуса оболочки ротора (первичные последствия)

Наименование ВВ	: Последствия НВ
4. Столкновение с птицами, твердыми летающими объектами	Повышенная вибрация, трещины, изломы корпуса оболочки (первичные последствия)
5. Неравномерное расширение (растяжение) оболочки	Образование трещин на поверхности корпуса оболочки (первичные последствия), разгерметизация корпуса (вторичные последствия)
Дальний космос (300-500 км)	
I. Столкновение с метеоритами, летающими объектами	Повышенная вибрация (первичные последствия), нарушение герметизации (вторичные последствия)

Внешние СОЖ выполняют функции спасательных служб и мобильного централизованного резервирования, используемого на время выполнения восстановительных работ ОТС.

Если по встроенным и внешним СОЖ имеется возможность как то получить исходные данные (из технической документации, с помощью физического эксперимента), то по внутренним СОЖ ОТС большинство данных отсутствует и их невозможно получить. Это значит, что анализ живучести необходимо вести в условиях неопределенности.

### 1.2. Выбор показателей живучести ОТС

Разделим все показатели на две группы: показатели, используемые для нормирования и оценки живучести по состоянию ОТС и по результатам выполнения задания ОАК. Показатели первой группы оценивают свойство ОТС сохранять работоспособность после НВ. Показатели второй группы оценивают способность не только противостоять НВ, но и в дальнейшем, несмотря на НВ, успешно выполнять установленное задание.

Для нормирования живучести по состоянию ОТС обозначим  $[9,10]$  через  $V_k$  событие, состоящее в  $K$  - кратном появлении НВ, а через  $X$  - функцию работоспособности ОТС, принимающую значение 1, если ОТС работоспособен, и 0, если неработоспособен. Тогда условный закон уязвимости ОТС

$$Q(K) = P(X = 0/V_k) \quad (1.1)$$

есть вероятность потери работоспособности ОТС при условии  $K$  кратного НВ.

Выживаемость ОТС при  $K$  - кратном НВ

$$R(K) = 1 - Q(K) = P(X = 1/V_k) \quad (1.2)$$

Запас живучести  $J$  есть максимальное число дефектов, которое еще может выдержать ОТС без потери работоспособности

$$J = \max_{(i)} J_i$$

Критическим называют минимальное число дефектов, появление которых приводит к потере работоспособности ОТС. (Дефект - это единица

измерения ущерба, нанесенного ОТС неблагоприятным воздействием).

Среднее число неблагоприятных воздействий, приводящих к потере работоспособности

$$\bar{Z} = \sum_{k=0}^{\infty} R(k) \quad (1.3)$$

есть математическое ожидание числа НВ, задаваемого распределением (1.1)

Средний запас живучести

$$d = \bar{Z} - 1 \quad (1.4)$$

есть критическое число НВ, уменьшенное на единицу

Для нормирования и оценки живучести ОТС и ОАК по результатам выполнения задания рассмотрим базовую структуру ОАК  $S_0$  выполняющую одну из целевых задач в течение времени  $t$ . В результате НВ в ОАК может возникнуть новая структура  $S_i$ , вследствие подключения СОЖ, из множества работоспособных структур  $S^p = \{S_i, i = \overline{1, A_p}\}$  или неработоспособных структур  $S^{np} = \{S_i, i = A_p+1, A\}$ .

После  $K$  - кратного НВ ОАК с новой структурой должен приступить к выполнению установленной целевой задачи и выполнить ее за время  $t$ . Нормирование и оценка живучести по результатам выполнения целевой задачи ОАК проводится с помощью следующих показателей.

Условная функция живучести

$$Y(t, S_i) = Y_i(t) = P(t/S_i) / P(t/S_0) \quad (1.5)$$

есть отношение вероятностей выполнения целевой задачи ОАК, определяемых для двух случаев: для базовой и новой структур. Считаем, что для новой структуры целевая задача не меняется по содержанию. Однако при этом должно выполняться условие  $Y_i(t) < 1$ . При наличии восстановления рассматриваем и неработоспособные структуры ( $i > A_p$ ) поскольку и для них может быть  $P(t/S_i) > 0$ .

Функция выживаемости ОАК при  $K$  - кратном воздействии (событие

$B_K$ ):

$$Y(t/B_K) = Y(t, K) = \sum_{n=1}^N P_K(n) Y_n(t) \quad (1.6)$$

есть усредненная по всем возможным структурам функция живучести ;  
 $P_k(n)$  - вероятность возникновения структуры  $S_n$  после  $K$  - кратного  
 НВ.

Безусловная функция живучести

$$Y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} P(B_k) Y(t/B_k) = \sum_{n=1}^N P(S_n) Y_n(t) \quad (1.7)$$

есть усредненная по всем возможным событиям  $B_k$  функция выживаемости  
 ОАК. Вероятность  $P(S_n)$  в формуле (1.7) определяется по формуле

$$P(S_n) = \sum_{k=1}^{\infty} P(B_k) P_k(n). \quad (1.8)$$

Показатели (1.6) и (1.7) относятся к классу адаптивных и обеспечива-  
 ют свертку векторного показателя  $\{Y_n(t), n = \overline{1, A}\}$  в скалярный.

При отсутствии уверенной информации о вероятностях  $P_k(n)$  и  $P(S_n)$   
 они могут заменяться на весовые коэффициенты  $\alpha_n, \beta_n$ , назначаемые  
 экспертно.

В случаях затруднения получения экспертной оценки необходимо  
 переходить к минимальным показателям.

Последовательность  $Y(t, k)$  является убывающей функцией  $K$   
 и изменяется от 1 при  $n = 0$  до 0 при  $n = \infty$ . Поэтому среднее число  
 НВ, приводящее к невыполнению целевой задачи, определяется по форму-  
 ле

$$\bar{Z}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} k \{Y(t, k-1) - Y(t, k)\} = \sum_{k=0}^{\infty} Y(t, k) \quad (1.9)$$

При  $t = 0$  или  $\lambda_i = 0$  (компоненты идеально надежны) формулы (1.6) и  
 (1.9) переходят соответственно в (1.2) и (1.3). Поскольку при  $t = 0$

функция  $Y_n(0) = 1$  для  $n \leq A_p$  и  $Y_n(0) = 0$  для  $n > A_p$ .

Из (1.6) имеем  $Y(0, A_k) = \sum_{n=1}^{A_p} P_k(n) = R(k)$ , а из (1.7)

$$Y(0) = R = \sum_{k=1}^{\infty} P(B_k) R(k).$$

### 1.3. Анализ моделей живучести

Модель живучести ОТС и ОАК в целом в реальности представляет  
 собой совокупность частных моделей их компонент (корпуса опорного  
 кольца, эстакад, мачт, понтонов, систем крепления оболочки с ротором  
 в опорном кольце и самого опорного кольца к эстакадам и мачтам, си-  
 стем электрообеспечения, термостатирования, вакуумирования и др.)

В свою очередь модели неблагоприятного воздействия разделяются на точечные и пространственные. В точечных моделях предполагается что НВ точно поражает одну или несколько компонент. Число компонент в ОТС и ОАК в целом больше, чем точек в области действия НВ, поэтому для каждой компоненты задается вероятность попадания в область действия НВ. При одноточечной области задают распределение  $\{G_i, i = \overline{1, K}\}$ , где  $K$  - число компонент ОТС,  $G_i$  - вероятность того, что  $i$ -й компонент попадет в область действия НВ.

При равномерном распределении  $G_i = 1/K$

Для многоточечной области задается распределение  $\{Y_i = P(X = i), i = \overline{1, K}\}$ , где  $Y_i$  - вероятность того, что в область действия попадает ровно  $i$  компонентов.

При усеченном биномиальном распределении

$$Y_i = C_K^i p^i (1-p)^{K-i} / (1-p^K), i = \overline{1, K} \quad (1.8)$$

При усеченном пуассоновском распределении

$$Y_i = \frac{b^i}{i!} / \sum_{j=1}^K \frac{b^j}{j!}, i = \overline{1, K} \quad (1.9)$$

В пространственных моделях задается двумерное распределение декартовых координат эпицентра НВ  $R_2(X_0, Y_0)$  и распределение радиуса круга  $R_0$  ( $Ч_0$ ), в котором действует НВ.

Различают НВ с бесконечной интенсивностью и постоянной интенсивностью "  $J$  " по всей площади области действия и с убывающей от эпицентра по определенному закону  $J(\xi, \ell)$  интенсивностью.

В частности, для закона Релея

$$J(\xi, \ell) = J_0 \exp(-\xi^2 / a \xi_0^2), \quad (1.10)$$

где  $J_0$  - максимальная интенсивность в эпицентре  $\xi$  - радиус круга - области действия НВ,  $a$  - постоянный параметр,  $\xi, \ell$  - полярные координаты точки при расположении начала координат в эпицентре.

По продолжительности действия НВ можно разделить на: импульсные (нулевая длительность), с постоянной  $\mathcal{T}$  и случайной длительностью  $T$ , задаваемой распределением  $G(t) = P(T < t)$ .

При постоянной длительности амплитуду возмущенной  $J_0$  зададим

как функцию времени с помощью формул:

$$J_0(t) = J_0^0 (1 - t/\tau); \quad (I.II)$$

$$J_0(t) = J_0^0 \exp(t^2 - 1/b\tau^2)$$

где  $B = 0,3 + 0,5$  постоянный параметр.

Аналогичные зависимости задаются и при случайной длительности, при этом  $\tau$  заменяется на случайную величину  $T$ .

При многократном НВ наиболее простыми стратегиями выбора характеристик очередного НВ, являются стратегия независимых НВ (стратегия № 1) и стратегия с исключением пораженных компонент из области действия очередного НВ (стратегия № 2). Из сочетания стратегий, области действия, продолжительности действия и интенсивности формируется модель НВ. Некоторые модели НВ, характерные для компонент ОТС приведены в таблице 2.

Модель живучести ОТС при выполнении целевой задачи получается в результате объединения пяти моделей:

- модель описания технической и функционально-алгоритмической структуры ОТС; моделей функционирования компонент, топологии ОТС, маршрутов информационных, материальных и энергетических потоков, функциональной и структурной иерархии, дерева целей функционирования;

- модель физических переходных процессов в ОТС после НВ (описание траектории процесса функционирования, получаемой вследствие собственного движения ОТС);

- модель надежности (применяется для оценки живучести ОТС по результатам выполнения целевой задачи);

- модель восстановления содержит описание аварийных ресурсов, правил и способов их использования в экстремальных ситуациях (модель развития ОТС после окончания НВ);

- модель вторичных последствий НВ (увеличение времени выполнения целевой задачи, скорости старения и износа компонент ОТС, дополнительно размножение ошибок в распределенной системе управления



ОТС, повышенный расход энергии и материалов для выполнения той же целевой задачи и другие последствия направленные на дальнейшее ухудшение технических характеристик ОТС).

Таблица 2

Модели НВ на ОТС

Факторы	Модель НВ		
	1	2	3
Область действия	точка	группа точек	площадь
Интенсивность	$\infty$	$\infty$	$\mathcal{I}_0$
Продолжительность действия	Имп	Имп	$\mathcal{C}$
Стратегия	1	2	1

## 2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И НОРМИРОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ОТС

При описании функционирования компонент ОТС полагаем, что каждая компонента находится в одном из трех состояний:  $S_0$  - компонента работоспособна и включена в работу;  $S_1$  - компонента работоспособна и отключена от ОТС по различным причинам (например, резервная компонента);  $S_2$  - компонента неработоспособна. Переходы из состояния в состояние определяются четырьмя группами факторов: естественными отказами компонент, восстановлением работоспособности, отключениями при срабатывании средств аварийной защиты и реконфигурации, действиями внешних возмущений.

Связи между компонентами (эстакада, понтон, мачта, опорное кольцо, оболочка, линейный электродвигатель, электродинамический подвес, тормозные диски, электроемкостные накопители, криогенные охладители) ОТС определены и стационарны на заданных интервалах времени, так что в любой момент времени состояние компоненты можно установить по состоянию работоспособности этой компоненты и состоянию других компонент. Признаки работоспособности ОТС неизменны во времени и позволяют однозначно определить состояние ОТС по совокупности состояний его компонент.

### 2.1. Логико-вероятностная модель живучести

В логико-вероятностной модели живучести предполагается двужначная логика поведения компонент и ОТС в целом, т.е. компоненты и ОТС имеют два множества состояний: работоспособные и неработоспособные. Результат действия возмущения также оценивается по двоичной схеме. Вводится допущение о независимости событий в ОТС, происшедших в различные моменты времени, что позволяет использовать описание ОТС с помощью статической модели не содержащей время в числе независимых переменных. Функциональные зависимости между переменными отражаются с помощью функций алгебры логики. Компоненты ОТС являются точечными объектами, соединенными между собой неуязвимыми

линиями связи. Последовательность НВ импульсного типа образует поток независимых событий. Вторичные последствия НВ отсутствуют, поэтому устойчивое состояние ОТС известно непосредственно после НВ. Средства обеспечения живучести (СОЖ) контролируют необходимые отключения и переключения в технической и функционально-алгоритмической структуре с тем, чтобы обеспечить работоспособность ОТС с помощью оставшихся работоспособных компонент с учетом их взаимозаменяемости.

2.1.1. Этапы методики анализа живучести ОТС на основе логико-вероятностной модели.

Этап. 1. Описание состояний компонент. Для каждой компоненты вводятся две логические переменные:  $Y_i$  - индикатор работоспособности  $i$ -й компоненты ( $Y_i = 1$ , если она работоспособна и  $Y_i = 0$  в противоположном случае);  $Z_i$  - индикатор состояния работоспособной компоненты ( $Z_i = 1$ , если компонента работает,  $Z_i = 0$  в противоположном случае). Для отражения воздействия возмущений на компоненты вводятся индикаторы  $X_{ij}$  и  $X_i = \vee X_{ij}$ , где  $X_{ij} = 1$ , если возмущение  $j$ -го типа действует на  $i$ -ую компоненту,  $X_{ij} = 0$  в противоположном случае.

Индикаторы трех состояний компоненты имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} I_{i0} &= 1[S_0] = Y_i, Z_i, \bar{X}_i; \\ I_{i1} &= 1[S_1] = Y_i, \bar{Z}_i, X_i; \\ I_{i2} &= 1[S_2] = \bar{Y}_i, Z_i, X_i; \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Этап 2. Составление логических зависимостей.

На основе предварительного анализа динамических моделей физических процессов протекающих в ОТС с учетом действий средств аварийной защиты, реконфигурация и управления составляются логические управления относительно неизвестных состояний работоспособных компонент:

$$Z_i = f_{zi}(y_k, z_j, x_k, k = \overline{1, N}; j \in M_i), \quad (I.13)$$

где  $N$  - число компонент в ОТС,  $M$  - множество компонентов, смежных в  $i$ -ой компонентой.

Совокупность выражений типа (I.13) образует замкнутую систему логических уравнений в векторной форме

$$Z = f_Z(Y, Z, X). \quad (I.14)$$

Работоспособность ОТС определяется работоспособностью его компонент и зависимости (I.14)

### Этап 3. Решение систем логических уравнений

Система уравнений (I.14) является линейной и может быть приведена к виду:

$$Z_i = a_i \vee a_{i1} Z_1 \vee \dots \vee a_{iN} Z_N, \quad i = \overline{1, N}, a_{ii} = 0$$

где  $a_i$  и  $a_{ij}$  - коэффициенты, выражаемые явно через  $y_i$  и  $x_i$ . Для решения систем логических уравнений используются [II]; метод определителей, метод подстановки, матричный метод. При этом решение уравнений проводится многократно: один раз для базовой структуры  $S_0$ , когда все  $X_{ij} = 0$  и еще столько раз, сколько различных видов возмущений. В конечном счете, перебирая все виды возмущений при однократном и многократном НВ, удается получить полный набор работоспособных структур в ОТС.

### Этап 4. Вероятностное описание компонент и внешних возмущений

Каждая компонента представлена в вероятностной модели вероятностью  $P_i = P(y_i = 1)$  того, что в данный или в произвольный момент времени компонента работоспособна. При появлении возмущения  $X_{ij} = 1$  стойкость  $i$ -ой компоненты к  $j$ -му возмущению учитывается с помощью вероятностей  $\alpha_{ij}$  того, что компонента сохранит работоспособность при появлении возмущения. Задаются вероятности  $\varphi_{kj}$  попадания компоненты в область действия  $j$ -го фактора НВ.

Этап 5. Преобразование логической функции работоспособности (ФРС) к форме перехода к замещению.

Различаются формы перехода [II] к полному и частичному замещению. Формами перехода к полному замещению являются совершенная дизъюнктивная нормальная форма и неповторная форма в базисе "конъюнкция - отрицание" и дизъюнкция ортогональных неповторных форм. После приведения к одной из этих форм проводится одношаговое замещение логических переменных и логических операций на вероятности и арифметические операции. Если такие преобразования затруднительны из-за их большой сложности, необходимо воспользоваться формой перехода к частичному замещению [II].

Этап 6. Запись смешанной формы.

В преобразованной ФРС некоторые логические переменные и операции замещаются на вероятности и арифметические операции, а остальные переменные и операции переходят в показатели степени арифметических выражений. Полученная таким образом форма называется смешанной формой, поскольку содержит одновременно логические переменные и вероятности и две группы операций: логические и арифметические. Описание смешанной формы приведено в [II].

Этап 7. Определение показателей живучести.

С помощью многошаговой процедуры замещения логических переменных в смешанных формах, составленных для базовой структуры  $S_0$  и других работоспособных структур  $S_i$  находят вероятности  $P(t/S_0)$  и  $P(t/S_i)$ , а затем по формуле (1.5) - условную функцию живучести  $Y_i(t)$ . Далее по формулам (1.6) - (1.9) - функцию выживаемости, безусловную функцию живучести, среднее число НВ.

## 2.2. Оценка живучести по состоянию ОТС.

Пусть ОТС подвергается  $n$  - кратному воздействию потока независимых точечных НВ с равновероятным поражением каждой компоненты при появлении НВ. По базовой структуре  $S_0$  определяются все возможные работоспособные структуры  $S_i, i = 1, \dots, A_p$

$$\text{Тогда } \bar{R}(K) = \sum_{j=1}^{A_p} z_j(K) / A^k, \quad (1.16)$$

где  $\tilde{z}_j(K)$  - число случаев, в которых возникает структура  $S_j^i$  при  $K$  - кратном НВ. Это число определяется по формуле

$$\tilde{z}_j(K) = \sum_{(n)} l_{mn} B_{nj}, \quad (I.17)$$

где  $l_{mn}$  - число перестановок из  $m$  компонент  $n$  типов

$B_{nj}$  - число различных векторов  $X$  с  $n$  нулями, приводящих к структуре  $S_j$ .

Числа  $l_{mn}$  связаны с числами Стирлинга второго порядка соотношением

$$l_{mn} = n! S_{mn}, \quad (I.18)$$

где  $S_{mn}$  могут быть найдены с помощью рекуррентного соотношения

$$S_{mn} = S_{m-1, n-1} + n S_{m-1, n}; \quad (I.19)$$

$$S_{m0} = S_{m, n} = 0$$

Числа  $l_{mn}$  могут быть вычислены непосредственно по формуле

$$l_{mn} = \sum_{i=1}^n C_n^i i^m (-1)^{n+i} \quad (I.20)$$

### 2.3. Оценка живучести ОТС по результатам выполнения задания

Для выполнения целевой задачи ОАК, каждая компонента ОТС должна функционировать в соответствии с установленным графиком и обеспечивать выполнение в течение времени  $t$  заданного набора функций.

Вероятность того, что  $i$ -ая компонента выполняет свою часть целевой задачи, равна  $P_i(t)$ . В частности, эта вероятность совпадает с вероятностью безотказной работы

Считаем, что все НВ завершились к началу рассматриваемого интервала времени  $(0, t)$  и в начальный момент ОАК приступает к выполнению целевой задачи, имея одну из возможных работоспособных структур.

Оценку и нормирование живучести производим в следующей последовательности.

1) Выполняем этапы 1-3 методики и записываем логическую функцию работоспособности (ФРС) в виде  $F = f(Y, Z, X)$  для базовой структуры ОТС;

2) выявляем все прочие работоспособные структуры ОТС путем

ОТС ;

2) выявляем все прочие работоспособные структуры ОТС путем подстановки в ФРС векторов, в которых одна, затем две, три и более букв заменены нулями. (Если при подстановке логическая функция не равна тождественно нулю, то она соответствует одной из работоспособных структур. Максимальное число нулей, вводимых в вектор при испытаниях, определяется показателем  $\gamma$  - живучести);

3) определяются коэффициенты  $B_{nj}$  (число различных векторов  $X$  с  $n$  нулями, приводящих к структуре  $S_j$ );

4) находится матрица коэффициентов  $Z_j(K)$  (число случаев, в которых возникает структура  $S_j$  при  $k$ -кратном НВ);

5) определяем вероятность  $P_k(t)$  того, что после  $k$ -кратного НВ возникает структура  $S_i$ ,  $i = \overline{1, A}$ ,  $\text{Ar.}(P_k(t)) = Z_j(K) / A^k$ ; (I.21)

6) для каждой из структур составляем функцию работоспособности  $F^{(i)}(X)$  и приводим к форме перехода и частичному замещению:

$$F^{(i)}(x) = X_n \left( \bigvee_{j=1}^e x_j f_j^{(i)}(x) \right), \quad (I.22)$$

где  $X_n$  - переменная, соответствующая полюсу ОТС;  $X_j$  - неповторные переменные;  $f_j^{(i)}(x)$  - функция алгебры логики произвольного вида;

7) выписываем смешанную форму логической функции работоспособности (Этап 6) типа [II]:

$$P(F^{(i)}(x) = 1) = P_k \left( 1 - \prod_{j=1}^e q_j f_j^{(i)}(x) \right),$$

где  $P_k = P(X_k = 1)$ ,  $q_j = 1 - P_j = P(X_j = 0)$

8) производим последовательное многошаговое замещение остальных логических переменных и получаем функции  $P(t/S_i)$  (вероятность выполнения целевой задачи ОТС со структурой  $S_i$ );

9) определяем  $Y_i(t)$  и  $Y(t, k)$  (условные функции живучести).

### 3. НОРМИРУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖИВУЧЕСТИ ОТС, РСУ и ОАК в ЦЕЛОМ

С учетом рассмотренных разновидностей основных НВ, приведенных в табл. I.I, нормирование живучести проводится для трех реализаций функционирования ОТС (на земле, ближнем космосе и дальнем космосе). При этом предполагается использование средств обеспечения живучести основными из которых являются:

- 1) средства контроля работоспособности, технический и функциональной диагностики ;
- 2) средства реконфигурации (подключение ненагруженного резерва в виде дополнительных обмоток линейного электродвигателя, электрических и криогенных батарей, тормозных дисков, резервных участков электродинамического подвеса) ;
- 3) средства управления (анализ и синтез в реальном времени технического состояния статических и динамических процессов в ОТС при разгоне ротора и подъеме его вместе с оболочкой в ближний и дальний космос) встроенные в распределенную иерархическую систему управления с передачей функций управления на верхних уровни мощных ЭВМ.

В стартовом режиме функционирования ОАК, нормирование живучести проводится по состоянию путевой структуры протяженностью 100 м (с учетом полезного деления тягового двигателя 15 Старорная обмотка установленной протяженностью (100 м) имеет две дополнительные обмотки, находящиеся в нагруженном мажоритарном резерве (2 из 3-х) Включение и отключение соответствующих обмоток двигателя, а также перераспределение нагрузок между смежными обмотками в случае отказа мажоритарной структуры осуществляется средствами реконфигурации, входящих в состав СОЖ.

В качестве исходных данных принимаем:

- 1) число элементов, входящих в состав компоненты путевой структуры,  $\geq 5$  ;
- 2) число работоспособных структур  $\delta_i$  ОТС, кроме базовой  $\delta_0 \geq 4$ .



Считаем, что поражение элементов при однократном НВ равновероятно и при каждом НВ становится неработоспособным ровно один элемент компоненты.

В таблице 3.1 приведены нормируемые показатели живучести по состоянию основных компонент путевой структуры ОТС при многократных одноточечных НВ на период разгона ротора (14 суток) без резервирования.

Для резервируемых компонент путевой структуры нормируемые показатели живучести приведены в таблице 3.2. Здесь нормируется не выживаемость, а условный закон уязвимости  $Q(k)$  поскольку при  $k < m$  (числа резервных компонент) функция  $Q(k) = 0$ , так как для потери работоспособности ОТС необходимо, чтобы все резервные компоненты были неработоспособны. При  $k > m$  необходимо, чтобы каждая компонента попала в область действия НВ хотя бы один раз. Из данных таблицы 3.2 видно, что уязвимость ОТС снижается, по мере увеличения избыточности, весьма заметно.

Нормирование показателей живучести для распределенной интегрированной системы управления проведено по результатам выполнения целенаправленных функций, приведенных в таблице 3.3. Усредненная функция живучести пронормирована относительно НВ ( $K = 1, K = 3$ ) и вероятности отказа ( $q$ ) программно-технических средств РСУ ОТС.

Нормирование показателей живучести для ОАК в целом проведено по результатам выполнения целевых задач, приведенных в таблице 3.4. Усредненная функция живучести пронормирована относительно НВ и вероятности отказа выполнения целевой задачи. Из данных нормирования следует, что показатели живучести во всех случаях меньше чем показатели безотказности. С увеличением отказа функции, целевой задачи функция выживаемости, т.е. отношение  $Y(t, k, q) / Y(t, k, q=0) < 1$  при всех  $q$  и  $k$ . Из этого следует, что малонадежные РСУ и ОАК в целом более уязвимы при внешних возмущениях, чем высоконадежные. При этом функция выживаемости уменьшается быстрее, чем снижается веро-

Таблица 3.1.

Нормируемые показатели живучести по состоянию компонент путевой структуры ОТС без резервирования при многократных одноточечных НВ (стартовый режим-14 суток)

Наименование компоненты	Выживаемость $P(k)$			Среднее число НВ $(\bar{Z} = \sum_{n=0}^{\infty} R(k))$	Средний запас живучести $(-d = \bar{Z} - 1)$
	$K = 2$	$K = 4$	$K = 6$		
1. Корпус (стартового опорного кольца, оболочки)	0,990	0,980	0,890	4	3
2. Линейный двигатель	0,999	0,990	0,920	4	3
3. Электродинамический подвес	0,999	0,990	0,960 <sub>ю</sub>	5	4
4. Ротор	0,999	0,990	0,980	6	5
5. Эстакады, понтоны	0,999	0,990	0,950	5	4
6. Тормозные системы	0,980	0,920	0,850	3	2

Таблица 3.2.

Нормируемые показатели живучести по состоянию компонент путевой структуры ОТС с мжоритарным резервированием (2 из 3-х) при многократных ондточечных НВ (стартовый режим - 14 суток)

Наименование компоненты	Условный закон уязвимости $O(k)$			Среднее число НВ $(\bar{Z})$	Средний запас живучести $(-d)$
	$K = 2$	$K = 4$	$K = 6$		
1. Линейный двигатель	0	0,025	0,125	7	6
2. Электродинамический подвес	0	0,030	0,130	9	8
3. Тормозные системы	0	0,020	0,120	5	4

(ближний космос до 100 км)

Таблица 3.3

Нормируемые показатели живучести РСУ ОТС по результатам выполнения целенаправленных функций

Наименование функции	: Усредненная функция живучести		: Вероятность выполнения функции	
	: $Y(t, K, q)$		: $P(t/S_0)$	
	: $K = 1, q = 0,02$	: $K = 3, q = 0,05$	$q = 0,02$	: $q = 0,05$
1. Непосредственное цифровое управление	0,9985	0,9650	0,9999	0,9995
2. Аварийная технологическая защита	0,9995	0,9920	0,9999	0,9999
3. Логическое управление	0,9960	0,9400	0,9999	0,9985
4. Сигнализация отклонений значе- ний параметров от нормы	0,9910	0,9150	0,9935	0,9920
5. Непрерывная регистрация значе- ний параметров	0,9850	0,9230	0,9940	0,9900
6. Расчет событий и процессов по данным технической диагности- ки	0,9910	0,9650	0,9995	0,9980

Таблица 3.4

Нормируемые показатели живучести общепланетного автоматического комплекса по результатам выполнения целевых задач (стартовый режим)

Наименование целевых задач	:Усредненная функция :живучести $\gamma(t, K, q)$		:Вероятность выполнения :целевой задачи $P(t, S_0)$	
	: $K=2, q=0,02$	: $K=4, q=0,05$	: $q=0,02$	: $q=0,05$
1. Своевременный пуск ОТС	0,998500	0,982000	0,999900	0,996000
2. Соблюдение норм регламентной безопасности при разгоне ротора в ОТС	0,999000	0,996500	0,999900	0,999800
3. Предотвращение (устранение) предаварийной (аварийной) ситуации на ОТС	0,999500	0,997000	0,999900	0,999900
4. Обеспечение электроэнергией общепланетных энергопотребителей	0,995000	0,983000	0,999500	0,999000
5. Вывод на околоземную орбиту вакуумированной трубы-оболочки с ротором	0,999999	0,999999	0,999999	0,999999
6. Восстановление озонового слоя земли	0,999100	0,998000	0,999990	0,999910
7. Фиксация ОТС на заданной орбите в космическом пространстве	0,999999	0,999999	0,999999	0,999999
8. Обеспечение научно-технических исследований состояний путевой структуры ОТС и его использование в качестве высокоскоростного наземного транспорта	0,998300	0,988500	0,999910	0,999500

ятность выполнения целенаправленной функции РСУ или целевой задачи ОАК. Как следствие, при одних и тех же требованиях к живучести и безотказности для обеспечения живучести требуется более высокий уровень избыточности.

При отрыве ОТС от опорного кольца ОАК и прохождении его в ближний космос существенно меняется ИВ, изменяются (ужесточаются) и требования к живучести.

В таблице 3.5 + 3,8 приведены нормируемые показатели живучести по состоянию компонент ОТС и по результатам выполнения целевых задач ОАК в период выхода ОТС в ближний и дальний космос. Предполагается периодический (1 раз в 12 дней) облет ОТС в дальнем космосе для диагностирования состояния оболочки и ротора и при необходимости проведения ремонтных (сварочных, электромеханических и др.) работ.

Таблица 3.5.

Нормируемые показатели живучести по состоянию компонент ОТС при многократных однократных  
НВ (подъем в ближний космос - 100 км)

Наименование компоненты	: Условный закон уязвимости $Q(K)$ :		Среднее число: НВ ( $\bar{z}$ )	Средний запас живучести (-d)
	: K = 1	: K = 2		
1. Корпус оболочки с лазерными отражателями	0	0,0005	5	4
2. Линейный двигатель	0	0,0010	3	2
3. Электродинамический подвес	0	0,0010	3	2
4. Ротор	0	0,0030	4	3
5. Тормозная системы	0	0,0060	3	2

Таблица 3.6.

Нормируемые показатели живучести по состоянию компонент ОТС при многократных однократных  
НВ (подъем в дальний космос - 500 км)

Наименование компоненты	: Условный закон уязвимости $O(K)$ :		: Среднее число НВ ( $\bar{z}$ ) :	: Средний запас жи- вучести ( $\bar{d}$ ) :
	: $K = 1$	: $K = 2$		
1. Корпус оболочки с лазерными отражателями	0	0,000001	10	9
2. Линейный двигатель	0	0,000005	8	7
3. Электродинамический подвес	0	0,000005	9	7
4. Ротор	0	0,000003	7	6
5. Тормозные системы	0	0,000001	9	8



Таблица 3.7.

Нормируемые показатели живучести ОАК по результатам выполнения целевых задач (подъем в ближний космос - 100 км)

Наименование целевых задач	: Усредненная функция живучести $Y(t, k, q)$		: Вероятность выполнения целевой задачи $P(t/S_0)$	
	: $k = 1, q = 0,000001$	: $k = 2, q = 0,00001$	: $q = 0,000001$	: $q = 0,00001$
1. Предотвращение (устранение) предаварийной (аварийной) ситуации на ОТС	0,999999	0,999999	0,999999	0,999999
2. Вывод на околоземную орбиту вакуумированной трубы-оболочки с ротором	0,999999	0,999999	0,999999	0,999999
3. Восстановление озонового слоя земли	0,999995	0,999980	0,999999	0,999999

Таблица 3.8

Нормируемые показатели живучести ОАК по результатам выполнения целевых задач (выход в дальний космос - 500 км)

Наименование целевых задач	: Усредненная функция живучести:		: Вероятность выполнения целевой задачи $P(t/S_0)$	
	: $Y(t, K, q)$		: задачи $P(t/S_0)$	
	: $K=1, q=1 \cdot 10^{-6}$	: $K=2, q=1 \cdot 10^{-5}$	: $q = 1 \cdot 10^{-6}$	: $q = 1 \cdot 10^{-5}$
1. Предотвращение (устранение) предаварийной (аварийной) ситуации на ОТС	0,99999999	0,99999998	0,99999999	0,99999999
2. Фиксация ОТС на заданной орбите в космическом пространстве	0,99999999	0,99999990	0,99999999	0,99999999

#### 4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОТС

По мере усложнения технических систем обостряется противоречие между растущим уровнем потенциального ущерба в случае выхода их из строя и расходами на обеспечение безотказности. Особое значение это противоречие приобретает в пространстве состояний ОАК, где в зоне неработоспособности есть подзоны, функционируя в которых ОТС вызывает аварии по причине повреждения опорного кольца, эстакад, понтонов корпуса оболочки, разрыва ротора, снижения вакуума из-за отказов компонент вакуумных установок, повышения температуры внутри трубы-оболочки из-за отказов встроенных криогенных средств отбора тепла; повреждения элементов статорной обмотки линейного двигателя, элементов электродинамического подвеса, тормозных дисков и лазерных отражателей твердых предметов и метеоритов, емкостных и солнечных батарей, а также внешних объектов, в первую очередь людей. Кардинальным средством разрешения этого противоречия является разработка робототехнических систем, входящих во встроенные СОЖ, обладающих так называемым свойством "неотъемлемой безопасности" (НБ), а также систем защиты от аварий.

Таким образом безопасность в данном контексте, это свойство ОТС (ОАК) заключающееся в его способности не допускать таких изменений своих состояний и физических свойств, а также не вызывать изменений состояний и физических свойств, связанных с ним объектов, которые были бы опасны для людей и (или) наносили ущерб окружающей среде сверх установленной нормы

Основными проблемами безопасности являются [16]:

- 1) методы выделения и оценки полноты множества потенциально опасных состояний общепланетного автоматического комплекса;
- 2) методы количественной оценки безопасности и ее нормирования;
- 3) методы выбора способов и средств, предотвращающих переходы в потенциально опасные состояния;

4) методы определения допустимого участия человека оператора в обеспечении безопасности.

Исследования безопасности при разработке ОТС и ОАК предлагается приводить в следующей последовательности:

1) множество состояний ОТС и ОАК в целом разбивается на подмножества, упорядоченные по степени опасности или возможного ущерба методами экспертных оценок;

2) построение для выделенных подмножеств графа событий; отражающего причинно-следственные связи в ОТС, ОАК (событие высшего уровня иерархии в графе событий представляется как логическая комбинация событий более низкого уровня с использованием изобразительных средств известной методики построения деревьев неисправностей [6];

3) степень снижения аварийной опасности количественно оценивается по формуле:

$$C = Z / (1 - P) Z^A \cdot \xi;$$

где  $Z, Z^A$  - вероятность аварийной опасности отказа ОТС в исходном варианте и при добавлении робототехнических систем во встроенные СОЖ;

$P$  - вероятность трансформации аварийноопасного отказа ОТС в аварийно-безопасный;

$\xi$  - коэффициент учитывающий изменение вероятности возникновения отказов при добавлении робототехнических систем;

4) влияние надежности на безопасность и безопасности на эффективность определяется с использованием моделей надежности систем защиты от аварии.

#### 4.1. Модели надежности систем защиты от аварии

Задача защиты от аварии состоит в том, чтобы перевести отказы - аварии в ранг отказов - остановов и тем самым снизить потери от ненадежности.

Будем рассматривать отказы - аварии и отказы - остановки как независимые случайные события, описываемые заданием распределенной двух случайных величин:  $T_{ост}$  и  $T_{ав}$  - временами работы ОТС между соседними отказами и отказами - авариями соответственно. По значениям числовых характеристик строятся функции  $P_{ост}(t)$  и  $P_{ав}(t)$  - вероятности соответственно безостановочного и безаварийного функционирования ОТС в течение времени  $t$ .

$$\left. \begin{aligned} P_{ост}(t) &= 1 - Q_{ост}(t) \\ P_{ав}(t) &= 1 - Q_{ав}(t) \end{aligned} \right\}, \quad 4.1$$

где  $Q_{ост}(t)$  и  $Q_{ав}(t)$  - соответственно функции распределения времени возникновения отказа - остановки и аварийной ситуации, характеризующие собственно ОТС и внешние условия его функционирования. Считаем, что расчетное время  $\tau$  (наработки ОТС) всегда меньше среднего времени безотказной работы  $T_{ср}$  ( $\tau < T_{ср}$ ). Для характеристики надежности устройств защиты различают отказы - "несрабатываемые" и "ложное срабатывание". В качестве исходных параметров для оценки надежности ОТС с защитой задаем четыре функции распределения:

$$Q_{ост}(t), Q_{ав}(t), Q_{неср}(t) \text{ и } Q_{л.ср.}(t),$$

где  $Q_{неср}(t)$  и  $Q_{л.ср.}(t)$  - соответственно функции распределения времени возникновения отказа типов "несрабатывание" и "ложное срабатывание" устройства защиты.

В течение расчетного интервала времени  $\tau$  устройство защиты обслуживается или работает.

Рассмотрим наиболее распространенные случаи:

1) устройство защиты от аварии за расчетное время  $\tau$  не обслуживается;

2) устройство защиты от аварии за расчетное время  $\tau$  обслуживается периодически.

При этом рассмотрим две модели обслуживания ОТС: X - ОТС не обслуживается, т.е. остановившееся (или остановленное защитой) ОТС до истечения расчетного времени  $\tau$  не восстанавливается и вновь в

для модели X

$$\left\{ e^{-\omega_{ав} \frac{\tau}{n} (1-k)} + \frac{\omega_{ав}}{\omega_{неср} + \omega_{ав}} \left[ 1 - e^{-(\omega_{неср} + \omega_{ав}) (1-k) \frac{\tau}{n}} \right] \right\}^n e^{-\omega_{ав} \cdot k \cdot \tau} \quad (4.5)$$

для модели Y

$$\left( e^{-\omega_{неср} (1-k) \frac{\tau}{n}} + \frac{\omega_{неср}}{\omega_{неср} + \omega_{ав}} \left[ e^{-\omega_{ав} (1-k) \frac{\tau}{n}} - e^{-\omega_{неср} (1-k) \frac{\tau}{n}} \right] \right)^n e^{-\omega_{ав} \cdot k \cdot \tau} \quad (4.6)$$

$P_{ав}(\tau) =$  при  $\omega_{неср} \neq \omega_{ав}$

$$\left[ e^{-\omega_{неср} (1-k) \frac{\tau}{n}} + \omega_{неср} (1-k) \frac{\tau}{n} e^{-\omega_{ав} (1-k) \frac{\tau}{n}} \right] e^{-\omega_{ав} \cdot k \cdot \tau}$$

при  $\omega_{неср} = \omega_{ав}$

При  $\omega_{неср} \cdot \tau_p \ll 1$  и  $\omega_{ав} \cdot \tau_p \ll 1$

для двух моделей

получим

$$P_{ав}(\tau) = \left[ 1 - \frac{1}{2} \omega_{ав} - \omega_{неср} (1-k) \right]^2 \left( \frac{\tau}{n} \right)^2 \left( 1 - \omega_{ав} \cdot k \cdot \tau \right) \quad (4.7)$$

Если  $\tau_{пр} \ll \tau_0$ , то  $k = \frac{\tau_{пр}}{\tau_0} \approx 0$ ; тогда

$$P_{ав}(\tau) = \left[ 1 - \frac{1}{2} \omega_{ав} \cdot \omega_{неср} \left( \frac{\tau}{n} \right)^2 \right]^n, \quad (4.8)$$

где  $\tau$  - расчетное время;

$\tau_0 = \frac{\tau}{n}$  - периодичность профилактического обслуживания;

$n$  - количество профилактических проверок исправности

устройств защиты;

$\tau_{пр}$  - время профилактического обслуживания устройства защиты;

$\tau_p = \tau_0 - \tau_{пр}$  - время между началом последующей и концом предыдущей проверки.

Профилактика способна снизить вероятность  $Q_{лср}(t)$ , если параметр потока отказов типа "ложное срабатывание" расчет с увеличением времени; с другой стороны - профилактическое обслуживание уменьшает вероятность  $P_2(\tau)$  в (4.4) и тем самым снижает вероятность безостановочной работы.

#### 4.2. Нормируемые показатели "неотъемлемой безопасности" ОТС

При отсутствии средств защиты и СОЖ каждая аварийная ситуация завершается аварией. В незащищенном ОТС поток аварийных ситуаций и поток аварий как правило будут совпадать.

В качестве рабочей модели обслуживания ОТС в стартовом режиме используем вторую модель (в случае возникновения отказа - остановка, ОТС тотчас же восстанавливается и снова включается и снова включается в работу). За расчетное время  $\tau$  принимаем длительность разгона ротора (стартовый режим) - 14 суток

$$\tau = 24 \cdot 14 = 336 \text{ час.}$$

Периодичность профилактического обслуживания  $\tau_0$  составляет одни сутки с длительностью  $\tau_{пр} = 10$  мин.

В режиме выхода в ближний и дальний космос используем первую модель обслуживания (ОТС не обслуживается до возвращения его на землю в случае аварийной ситуации в ближнем космосе или не обслуживается до прибытия аварийной службы на фиксированную орбиту в дальнем космосе).

Нормируемые показатели безопасности для ОТС и ОАК в целом для трех режимов функционирования ОТС (стартовый режим, выход в ближний космос, фиксация ОТС на орбите дальнего космоса, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Нормируемые показатели "неотъемлемой безопасности" для ОТС и ОАК (функционирование в трех режимах)

Наименование комплекса, средства:	Режим функционирования:	Вероятность : безаварийной : работы : $T = 336ч$	Вероятность : безостановочной : работы : $T = 2000ч$	Степень снижения аварийной : опасности (С)
1. Общепланетный автоматический комплекс	а) стартовый	0,99999000	0,99999000	10
	б) ближний космос	-	-	100
	в) дальний космос	-	-	50
2. Общепланетное транспортное средство	а) стартовый	0,99999990	0,99999990	10
	б) ближний космос	0,99999999	0,99999999	100
	в) дальний космос	0,99999990	0,99999990	50

- 43 -



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ эволюции общепланетного транспортного средства в аспекте живучести позволил выявить неблагоприятные воздействия, определяющие живучесть ОТС на земле, при подъеме его в ближний космос (до 100 км) и дальний космос (до 300-500 км). Основное внимание уделено выбору состава и анализу функционирования средств обеспечения живучести ОТС.

При выборе показателей живучести определены показатели для нормирования и оценки живучести по состоянию ОТС и по результатам выполнения целенаправленных функций распределенной интегрированной системы управления и целевых задач ОАК.

Анализ моделей живучести комплекса позволил сформулировать модель живучести для ОТС, включающую пять автономных моделей. При этом показана разновидность моделей неблагоприятных воздействий, зависящих от области действий, интенсивности, продолжительности, а также от результатов НВ.

На основе разработанной методики нормирования живучести ОТС с использованием логико-вероятностной модели установлена зависимость живучести от числа НВ и заданы количественная оценка показателей выживаемости, средней запас живучести, усредненная функция живучести, вероятности выполнения функции РСУ и целевых задач ОАК для трех режимов функционирования ОТС (стартовый, выход в ближний космос, фиксация ОТС на орбите дальнего космоса).

Определены основные проблемы безопасности ОТС, дан анализ моделей надежности систем защиты от аварии, встроенных в СОЖ; приведены установленные показатели "неотъемлемой безопасности" для ОТС и ОАК.

Поскольку средства для обеспечения надежности, живучести и безопасности (технические и программные средства, резервы мощности и производительности и др.) выделяются из общих ресурсов и эти средства многоцелевые, то задачи обеспечения надежности, живучести, и бе-

зопасности необходимо рассматривать совместно на всех уровнях создания и эксплуатации ОТС.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нормирование показателей надежности функционирования общепланетного транспортного средства. Отчет о НИР. /Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей/ Гомель: Центр "Звездный мир", 1989. 55с.
2. Техническое задание на проведение работ по надежности, живучести и безопасности ОТС. Отчет о НИР /Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей/. Гомель: Центр "Звездный мир", 1989. 61с.
3. Моделирование живучести систем энергетики: метрология, модель, реализация: сообщения по прикладной математике/ М.В.Козлов, Ю.Е.Малашенко, В.С.Рогожин и др. - М. ВЦ АН СССР, 1986.-16с.
4. Волик Б.Г, Рябинин И.А. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем. - Автоматика и телемеханика, 1984, № 12. с.15-19.
5. Рябинин И.А., Юрлов Ю.Е. Расчет живучести сложных технических систем. Методика № К - 3626. - Л.: ВМА, 1986. - 66с.
6. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 246с.
7. Многоуровневое управление динамическими объектами / В.И.Васильев, Ю.М.Гусев, В.И.Ефанов и др./ - М.: Наука, 1987.-257с.
8. Подлесный Н.И. О живучести сложных систем управления. - Системы управления летательных аппаратов, вып. 4, 1978.с.13-16.
9. Горшков В.В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем/ Кибернетика АН УССР № 1. - 1982, - с.104-107.
10. Рябинин И.А., Парфенов Ю.И. Надежность и эффективность структуры сложных технических систем/ В кн.: Основные вопросы теории и практики надежности - Минск: Наука и техника, 1982. - с.25-40
11. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем - М.: Радио и связь, 1981. - 264с.
12. Флейшман Б.С. О живучести сложных систем. - Техническая кибернетика, № 5, 1986 с.15-18.
13. Флейшман Б.С., Крапивин В.Ф. Применение теоретико-игровых

методов к оценке живучести сложных систем. - Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, № 6, 1976, с. 9-13.

14. Надежность и живучесть систем связи Б.Я.Дудник, В.Ф.Овчаренко, В.К.Орлов и др.: Под ред. Б.Я.Дудника. - М.: Радио и связь, 1984. - 216с.
15. Омельяненко В.И. Анализ систем тяги и электродинамического подвеса линейных электромеханических преобразователей энергии с использованием сверхприводящих обмоток и выбор схемы для ОТС. Отчет о НИР Харьков: Центр Звездный мир. 1989. - 47с.
16. Волик Б.Г. Проблемы анализа и обеспечения надежности, живучести и безопасности автоматизированных комплексов / В сб. тезисов докладов IУ Всесоюзного совещания: Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов / М.: ИПУ, 1988. с.37-38.
17. Малев В.В. Определение числовых характеристик распределения вероятности исправной работы системы противоаварийной автоматики. М.: Изв. АН СССР Техническая кибернетика, 1987, №1. с.15-18.
18. Волков Л.И., Шишкевич А.М. Надежность летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1975 - 296с.
19. Вазовский И. Надежность - теория и практика /Перевод англ. под ред. Б.Р.Левина/ М.: "МИР", 1965 - 373с.
20. Barlow R.E., Proshan F. Importance of system components and fault tree events. - Stochastic processes and their application, 1975, v.3, N2, p. 153-173
21. Henby E., J., Kumamoto H. Reliability engineering and risk assesnient. - N-4 : Prentice - Hall inc., 1981. - 560p.

Факторы обеспечения живучести гравитационно-термодинамической АЭС [2]

Живучесть АЭС обеспечивает:

1) отсутствие воздействия повреждения одного ядерного реактора на любые другие, вблизи находящиеся, и работающие на один парогенератор;

2) локализацию взрыва реактора обеспечивают через трубу аварийного глушения путем подачи тампонажного раствора с добавкой поглотителя, что позволяет остановить реакцию и замолотить сам реактор;

3) исключается выход радиоактивности на поверхность;

4) функции насосов выполняет гравитационная тепловая труба, поскольку парогенератор постепенно находится под давлением столба жидкости;

5) возможность использования бескорпусной конструкции самих реакторов;

6) воздушные, паровые и жидкостные радиоактивные отходы после их очистки заканчиваются в нижележащие слои земли;

7) на одном паровом канале могут работать несколько турбогенераторов (авария в турбогенераторе Белоярской АЭС свидетельствует о необходимости развязки ядерного реактора с турбогенератором), которые могут вводиться и выводиться из работы независимо от реакторов с коэффициентом полезного использования 100 %;

8) вывод человека из зоны повышенной радиоактивной опасности;

9) возможность управлять параметрами выходного пара меняя поперечный размер вертикального парового канала по высоте.

Гравитационно-термодинамическую АЭС (ГТАЭС) необходимо использовать для теплоснабжения городов, заглубляя ее на 200-500 м под геометрическим центром города и создавая пар 20-50 атмосфер, при этом:

- исключается загрязнение воздуха выбросом всевозможных котельных ;
- потребность в таких станциях насчитывают несколько сотен ;
- каждая ГТАЭС должна включать минимум 3 реактора (два в работе, один в резерве) ;
- для получения электроэнергии пар подается на турбогенераторы, а реакторы должны размещаться на глубине 2000-2500 м ;
- обеспечиваются потребности в электроэнергии потребителей в базовом и пиковых режимах ;
- для опреснения минерализованной (подземной или морской) воды заглубление ГТАЭС достаточно на 1000 м (спасение Аральского моря).

На морском участке необходимо использовать термодинамические станции, работающие на разнице температур у дна и на поверхности. В вертикальной полый трубе, на которой базируется ОТС, помещенной в водную среду возникают конвективные потоки воды, которые утилизируются с помощью гидротурбины.

Мощности потока

$$P = \frac{\rho V^2}{2} \cdot S$$

- P - мощность
- $\rho$  - плотность среды
- V - скорость течения
- S - площадь поперечного сечения
- $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>

При  $S = 1 \text{ м}^2$ ,  $V = 10 \text{ м/с}$ ,

Получим  $P = 0,5 \text{ Мвт}$ .

Достаточно 3 тыс. таких гидродинамических труб для обеспечения необходимой мощности в 1,5 Гвт/1000 км на морском участке (3 тыс. опор на 1000 км морского участка ОТС).

Гидроэлектроагрегат должен размещаться ниже верхнего отверстия гидродинамической трубы.



## О Т З Ы В

на отчет о НИР по теме "Проведение исследований и разработка требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей", выполненной по программе "ЭКОМИР".

В постановочной части данного отчета приведено краткое описание накопителя энергии, транспортного средства (ОТС) и автоматического комплекса (ОАК) в целом. Выполнен обзор и критический анализ известных методов нормирования показателей надежности, живучести и безопасности сложных автоматизированных комплексов и технических объектов. В результате анализа конфигураций и функционирования различных моделей транспортных средств выбраны основные направления исследований по установлению обоснованных требований к надежности ОТС и ОАК в целом. Показана сложность решения задачи, указано на необходимость комплексного подхода к проведению исследований. Приведены основные математические предпосылки решения задачи нормирования надежности для типовых структур-аналогов автоматизированных комплексов, летательных аппаратов и технических объектов.

На основе разработанной авторами методики нормирования показателей надежности функционирования ОТС и ОАК установлены критерии отказов для функций системы управления, целевых задач ОАК и компонент ОТС. Приведен состав наиболее приемлемых показателей безотказности и ремонтпригодности, а также комплексных показателей надежности.

В качестве исходных данных, необходимых для нормирования надежности ОТС, приняты оценки интенсивности отказов элементов машиностроения и радиоэлектроники и поправочные коэффициенты к ним для условий эксплуатации ОТС. В качестве сравнительных оценок использованы показатели надежности функций систем управления объектами атомной энергетики и химии. Для нормирования надежности в качестве индивидуальных показателей надежности приняты наработка на отказ, вероятность безотказной работы и среднее время восстановления, в качестве комплексных - коэффициент готовности. Принятый уровень надежности для компонент ОТС,



функций системы управления и целевых задач ОАК показывает высокую степень подготовленности будущей разработки для безотказного функционирования на заданном интервале времени и соответствует требованиям последних достижений науки и техники.

Для нормирования живучести по состоянию ОТС и по результатам выполнения функций системы управления и целевых задач ОАК авторами разработана соответствующая методика с использованием логико-вероятностной модели, устанавливающей зависимость живучести от числа и разновидности неблагоприятных воздействий. В качестве показателей живучести авторами удачно использованы: вероятность выживаемости, средний запас живучести, усредненная функция живучести, условный закон уязвимости.

Нормированные значения показателей живучести, установленные для трех режимов ОТС, призваны обеспечить отсутствие повреждений на всех стадиях функционирования ОАК, включающего встроенные, внутренние и внешние средства обеспечения живучести.

Особое внимание в отчете уделено вопросам безопасности функционирования ОТС: определены основные проблемы безопасности, дан анализ моделей надежности систем защиты от аварии, встроенных в средства обеспечения живучести. Нормированные значения показателей безопасности, установленные для вероятности безаварийной работы и вероятности безостановочной работы ОТС, определяют "неотъемлемую безопасность" для людей.

В целом материал отчета по исследованию и разработке требований по надежности, живучести и безопасности ОТС и его моделей изложен корректно, по содержанию соответствует требованиям к отчетам о НИР и рекомендуется к утверждению.



Зав. кафедрой ТСОИ  
Гомельского Государственного  
университета,  
И.И., доцент



А.И.Иванюк