

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

На правах рукописи

Петров Андрей Владимирович

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ
МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРАКТОВ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Специальность

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Буряк Юрий Иванович

Москва – 2023

Оглавление

| | стр. |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ, РЕМОНТА И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ | 13 |
| 1.1 Анализ развития подходов к созданию систем технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения авиационной техники с использованием технологий интегрированной логистической поддержки..... | 13 |
| 1.2 Обзор существующих методов, алгоритмов и информационных систем синтеза структуры и параметров системы материально-технического обеспечения..... | 27 |
| 1.2.1 Методы и алгоритмы анализа уровней ремонта составных частей изделий..... | 27 |
| 1.2.2 Методы определения рационального количества ремонтных ячеек в сервисном центре..... | 29 |
| 1.2.3 Методы и алгоритмы расчета параметров материально-технического обеспечения..... | 33 |
| 1.2.4 Информационные модели данных интегрированной логистической поддержки..... | 39 |
| 1.3 Особенности обеспечения технической эксплуатации авиационной техники при переходе к контрактам жизненного цикла..... | 42 |
| 1.3.1 Существующие проблемные вопросы в области послепродажного обслуживания авиационной техники..... | 42 |
| 1.3.2 Основные условия контрактов жизненного цикла..... | 45 |
| 1.3.3 Постановка задачи синтеза многоуровневой системы материально-технического обеспечения..... | 50 |
| 1.4 Выводы..... | 56 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2 | МОДЕЛЬ, МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ | 58 |
| 2.1 | Модель описания многоуровневой системы материально-технического обеспечения эксплуатации..... | 58 |
| 2.2 | Методика расчета суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации..... | 64 |
| 2.3 | Информационная модель для описания многоуровневой системы материально-технического обеспечения..... | 78 |
| 2.4 | Алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения..... | 90 |
| 2.5 | Алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения и производственных мощностей региональных сервисных центров | 101 |
| 2.6 | Выводы | 109 |
| 3 | ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО АПРОБАЦИИ | 112 |
| 3.1 | Программный комплекс синтеза многоуровневой системы материально-технического обеспечения..... | 112 |
| 3.2 | Анализируемые варианты размещения региональных сервисных центров для обслуживания и ремонта парка вертолетов | 128 |
| 3.3 | Результаты апробации программного комплекса на примере бортового оборудования вертолета VRT500 | 134 |
| 3.4 | Выводы | 139 |
| 4 | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 141 |
| | СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ | 144 |
| | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 145 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы и степень разработанности темы. Одним из ключевых условий конкурентоспособности авиационной техники (АТ) на мировом рынке является обеспечение заданного уровня готовности парка изделий при минимизации эксплуатационных затрат. Возможность достижения указанных требований определяется как характеристиками самого изделия, так и системы его технической эксплуатации (ТЭ), включающей в себя взаимосвязанные системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и материально-технического обеспечения (МТО).

В связи с увеличением сложности современных изделий АТ, поддержание требуемого уровня готовности парка в рамках существующей системы, т.е. исключительно силами инженерно-авиационных служб эксплуатирующих организаций, становится недостаточно эффективным.

В этой связи, в соответствии с Постановлением Правительства от 28.11.2013 №1087, эти задачи возлагаются на предприятия промышленности на основе т.н. контрактов жизненного цикла. Особенностью таких контрактов является то, что на предприятия промышленности возлагается новая задача по обеспечению не только поставок изделий АТ, но и поддержки их ТЭ. При этом производитель гарантирует эксплуатанту достижение заданных эксплуатационно-технических характеристик и стоимостных параметров.

Необходимость достижения заданных директивными требованиями контракта жизненного цикла значений эксплуатационной готовности, величины удельных затрат и ограничений на стоимость сервисной инфраструктуры требует создания силами предприятий промышленности новой системы ТЭ, включающей: линейные станции по техническому обслуживанию (уровень 1), авиационно-технические базы (уровень 2), региональные сервисные центры (уровень 3) и заводы-изготовители (уровень 4), а также оптимальное распределение между

этими уровнями объемов запасных частей, работ по ТОиР и необходимого для их выполнения оборудования.

В настоящее время задачи минимизации затрат на обеспечение ТЭ при обеспечении требуемого уровня готовности парка изделий решаются с применением технологий интегрированной логистической поддержки (ИЛП), включающих в себя следующие дисциплины: анализ видов и последствий отказов, методы планирования ТОиР и МТО, расчет эксплуатационно-экономической эффективности и т.п. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов интегрированной логистической поддержки для изделий АТ внесли работы Далецкого С.В., Деркача О.Я., Петрова А.Н., Чинючина Ю.М., Заковряшина А.И., Кулешова А.А., Гипича Г.Н., Фролкова А.И., Арустамова М.А., Шаламова А.С., R. Basten, С. Sherbrooke, Судова Е.В. и др.

При этом решение задачи минимизации затрат на обеспечение ТЭ только за счет применения технологий ИЛП недостаточно эффективно. Очевидно, что суммарные затраты на обеспечение ТЭ включают в себя также расходы на создание региональной инфраструктуры (сервисных центров), формирование и пополнение складов запасных частей и материалов, приобретение необходимого оборудования для ТОиР, оплату труда технического персонала и т.п. Величина перечисленных затрат зависит от принятых решений в отношении структуры и параметров многоуровневой системы МТО, а именно: состава оборудования и производственных мощностей региональных сервисных центров, объемов запасов комплектующих изделий на каждом уровне системы ТЭ, стратегий их пополнения и т.п. Это, в свою очередь, приводит к необходимости решения задачи структурно-параметрического синтеза такой многоуровневой системы МТО с использованием аппарата системного анализа.

Таким образом, актуальность настоящей работы определяется необходимостью решения задачи синтеза новой многоуровневой системы МТО, обеспечивающей выполнение условий контрактов жизненного цикла, что является важной составляющей повышения конкурентоспособности отечественной АТ на внутреннем и внешнем рынках.

Целью работы является повышение технико-экономической эффективности процессов технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения эксплуатации парка ВС за счет создания новой, интегрированной с предприятием-производителем АТ, системы ТЭ в соответствии с требованиями контрактов жизненного цикла.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие **основные задачи:**

1. Анализ существующих подходов к обеспечению ТЭ АТ и выявление направлений повышения эффективности процессов ТОиР и МТО эксплуатации регионального парка ВС.

2. Разработка модели описания многоуровневой системы МТО АТ.

3. Разработка методики и алгоритмов синтеза многоуровневой системы МТО для заданного парка ВС в рамках контрактов жизненного цикла, основными из которых являются:

- алгоритм совместной оптимизации параметров системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров, обеспечивающий оптимальное распределение работ по ремонту индивидуальных составных частей (СЧ) ВС по уровням;

- алгоритм оптимизации параметров системы МТО по критерию минимизации затрат в условиях организации хранения и ремонта СЧ ВС в региональных сервисных центрах при ограничениях на величину эксплуатационной готовности;

- методика расчета зависимости показателей затрат на обеспечение ТЭ от структуры и параметров системы МТО.

4. Разработка информационной модели и программного комплекса, позволяющих на основе обработки информации в базе данных анализа логистической поддержки (АЛП) синтезировать оптимальные структуру и параметры системы МТО.

5. Экспериментально-промышленная апробация программного комплекса, реализующего предложенные модель, методику и алгоритмы.

Объектом исследования являются процессы технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения эксплуатации изделий АТ.

Предметом исследования являются характеристики изделий АТ и системы материально-технического обеспечения их эксплуатации, обуславливающие величину затрат на ТЭ и уровень эксплуатационной готовности парка изделий АТ.

Научная новизна работы состоит в разработке оригинальных подходов к созданию новой системы поддержки ТЭ, отражающей особенности ее организации предприятиями-производителями АТ в рамках контрактов жизненного цикла, а именно:

1. Разработана модель описания многоуровневой системы МТО, позволяющая организовать такое распределение работ и связанных с ними ресурсов (запасные части, оборудование) по ее уровням, которое обеспечивает оптимальную эффективность системы по критерию суммарных затрат. Основное отличие разработанной модели заключается в возможности описания зависимости показателя суммарных затрат от распределения работ по уровням системы МТО, а также согласованной оптимизации параметров системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров.

2. Разработан алгоритм совместной оптимизации параметров системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров. Алгоритм отличается возможностью поиска с использованием методов комбинаторной оптимизации рационального баланса между формированием достаточного объема запасов и развертыванием производственных мощностей по ремонту СЧ ВС в региональных сервисных центрах. Это обеспечивает возможность одновременно определить оптимальные номенклатуру, объем запасов предметов снабжения и состав оборудования региональных сервисных центров для ТОиР заданного парка ВС при заданных требованиях к величине коэффициента эксплуатационной готовности.

3. Предложен модифицированный алгоритм оптимизации параметров системы МТО по критерию минимизации затрат на обеспечение ТЭ АТ при

ограничениях на величину эксплуатационной готовности. Основным отличием разработанного алгоритма является использование в качестве критерия оптимизации суммарной величины затрат на ТЭ в течение всего срока службы ВС, в том числе затрат на создание и пополнение ремонтных комплектов при организации ремонта составных частей ВС в региональных сервисных центрах. Это обеспечивает возможность поиска оптимальных параметров системы МТО для длительного периода эксплуатации, в течение которого различные компоненты затрат (хранение, транспортировка и т.п.) могут оказывать различный вклад в их общую величину.

4. Разработана методика расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ регионального парка ВС. Отличие полученных результатов от известных заключается во включении в общую структуру затрат расходов на создание инфраструктуры региональных сервисных центров разной производственной мощности, выполнение ремонтов составных частей в этих сервисных центрах, создание запасов имущества, их хранение и транспортировку. Это позволяет отдельно рассчитывать начальные, периодические, прямые и косвенные затраты на ТЭ в зависимости от требуемой величины коэффициента эксплуатационной готовности, что дает возможность использования методики при обосновании стоимости контрактов жизненного цикла.

5. Разработана информационная модель АЛП, поддерживающая описание данных о ВС, процессах их ТОиР, дислокации, сценариях эксплуатации, производственных мощностях региональных сервисных центров и логистических потоках. Основным отличием разработанной модели является организация хранения информации о парке ВС переменного состава, а также ее обработка прикладными программными комплексами, реализующими алгоритмы поиска оптимальных структуры и параметров системы МТО по критерию минимальной стоимости.

Теоретическая значимость работы состоит в совершенствовании методик и алгоритмов структурно-параметрического синтеза многоуровневой системы МТО эксплуатации парка ВС.

Практическая значимость полученных научных результатов заключается в создании на их основе программного комплекса для планирования и организации послепродажного обслуживания АТ предприятиями-производителями и холдинговыми структурами в рамках контрактов жизненного цикла.

Практическая значимость подтверждается актами внедрения основных научных результатов диссертации в АО «НЦВ Миль и Камов» и ОКБ Сухого ПАО «ОАК».

Материалы диссертационной работы были использованы при подготовке и проведении учебных занятий и разработке учебных пособий в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт».

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы общей теории систем и системного анализа в управлении, объектно-ориентированного анализа и проектирования больших систем, математические методы в экономике, методы теории массового обслуживания, математической статистики, дискретной оптимизации.

При решении перечисленных выше задач **получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров, обеспечивающий оптимальное распределение работ по ремонту индивидуальных СЧ ВС по уровням ТОиР.

2. Алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы МТО по критерию минимизации суммарных затрат за период эксплуатации парка АТ, включающих в себя затраты на ремонт, хранение и транспортировку СЧ ВС.

3. Методика расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ регионального парка воздушных судов в течение заданного периода эксплуатации, включающих в себя расходы на создание инфраструктуры региональной системы ТЭ, обеспечивающей заданные требования в отношении коэффициента эксплуатационной готовности ВС.

4. Информационная модель АЛП, обеспечивающая поиск оптимальных структуры и параметров системы МТО для парка ВС переменного состава по критерию минимальной стоимости.

5. Результаты применения разработанного программного комплекса, реализующего предложенные метод и алгоритмы, на этапе планирования ТЭ легкого многоцелевого вертолета VRT500.

Обоснованность и достоверность результатов исследований:

- обеспечивается корректным применением методов математической статистики, дискретной оптимизации, теории массового обслуживания, а также объектно-ориентированного анализа и проектирования информационных систем;
- удостоверена практикой применения предлагаемых решений в составе комплекса средств интегрированной логистической поддержки, в том числе в ОКБ Сухого ПАО «ОАК» и АО «НЦВ Миль и Камов».

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и мероприятиях:

1. Конференции «Системы PLM авиационных и космических предприятий» (г.Москва, 16.02.2012);
2. XI-й Международной научно-технической конференции «Актуальные задачи каталогизации продукции» (г.Москва, 05-06.06.2012);
3. Научно-техническом совете по информационным технологиям АО «Рособоронэкспорт» (г.Ростов-на-Дону, 07-08.06.2017);
4. Научно-практическом семинаре «Цифровые технологии разработки и обеспечения эксплуатации продукции» (г.Москва, 06.06.2019);
5. IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем» (г.Москва, 26-27.11.2020)

Реализация результатов. Результаты выполненных исследований нашли практическое использование в нормативно-технических документах:

- ГОСТ Р 56130-2014 Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Оценка затрат на техническую эксплуатацию на стадии разработки;

- ГОСТ Р 58302-2018 Управление стоимостью жизненного цикла. Номенклатура показателей для оценивания стоимости жизненного цикла изделия. Общие требования;

- ОСТ 1 02799–2012 Воздушные суда гражданского назначения. Прямые затраты на техническое обслуживание при эксплуатации. Методика расчета;

- ГОСТ Р 58297-2018 Интегрированная логистическая поддержка. Многоуровневое техническое обслуживание и ремонт. Основные положения;

- ГОСТ Р 57104-2016 Интегрированная логистическая поддержка. Программа обеспечения технической эксплуатации. Общие требования.

Публикации. По теме диссертации опубликовано лично и в соавторстве 15 работ, в том числе две монографии (в соавторстве) и учебное пособие для ВУЗов (в соавторстве), в том числе четыре статьи в изданиях, включенных ВАК в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий. Имеется четыре свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ Федерального агентства по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Объем и структура работы. Работа состоит из оглавления, введения, трех глав, заключения, списка литературы из 110 позиций, 32 рисунков, 6 таблиц. Объем работы составляет 155 страниц машинописного текста.

В первой главе проведен анализ существующих подходов к созданию систем технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения авиационной техники, рассмотрены особенности обеспечения технической эксплуатации на основе контрактов жизненного цикла.

Во второй главе описана математическая модель и методика расчета суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации, алгоритмы синтеза многоуровневой системы МТО, а также информационная модель для хранения и обработки данных о системе МТО.

В третьей главе приведено описание программного комплекса, реализующего предложенные методике и алгоритмы, а также результаты его апробации при планировании эксплуатации парка легких вертолетов VRT500.

В заключении сформулированы научные результаты, полученные в работе, и предложения по их дальнейшему использованию.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ, РЕМОНТА И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

1.1 Анализ развития подходов к созданию систем технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения авиационной техники с использованием технологий интегрированной логистической поддержки

В настоящее время конкурентоспособность разрабатываемых воздушных судов определяется не только их летно-техническими характеристиками, но и, в значительной степени, эксплуатационно-техническими характеристиками (ЭТХ), определяющими, в свою очередь, стоимость владения воздушным судном и его техническую готовность в эксплуатации. Так, например, зарубежные покупатели отечественных воздушных судов все больше внимания уделяют вопросам стоимости владения приобретенной техникой (для авиационной техники эту характеристику часто называют «стоимостью летного часа») при проведении тендерных процедур, при этом стоимость владения часто является ключевым критерием при выборе зарубежным покупателем того или иного образца авиационной техники [50].

Стоимость и техническая готовность парка воздушных судов определяется не только их конструктивными свойствами и характеристиками, такими как безотказность составных частей, топливная эффективность и т.п., но и параметрами системы технической эксплуатации, включающей в себя систему технического обслуживания и ремонта и систему материально-технического обеспечения, сформированные для обеспечения технической эксплуатации этого парка. В соответствии с определениями [10,20], система технического обслуживания и ремонта - это «совокупность взаимосвязанных средств,

документации технического обслуживания и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления (качества либо эксплуатационных характеристик) объектов, входящих в эту систему», система материально-технического обеспечения – «упорядоченная совокупность организационной структуры, документов, расчетных моделей и результатов расчетов, обеспечивающих выполнение процедур закупки и управления запасами материальных ресурсов, необходимых для технической эксплуатации финального изделия». Как видно из определения, в состав взаимосвязанных систем ТОиР и МТО входят:

- организационная структура, обеспечивающая процедуры закупки и управления запасами материальных ресурсов;
- средства эксплуатации и ремонта;
- документация технического обслуживания и ремонта;
- исполнители.

Для авиационной техники, состав документации технического обслуживания и ремонта и исполнители определяются требованиями стандартов [11]. Эта документация содержит состав и периодичность выполнения работ планового ТОиР, технологию обслуживания, сведения для поиска и устранения неисправностей и т.д. Средства эксплуатации, в соответствии с определением [16], включают в себя здания, сооружения, технические устройства, в том числе инструмент, запасные части и эксплуатационные материалы, необходимые для эксплуатации изделия.

Научные подходы к проектированию эффективных систем ТОиР и МТО для авиационной техники разрабатывались в разное время ведущими научными организациями страны – ЛИИ им. М.М.Громова, ЦНИИ ВВС, ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, МАИ, МГТУ ГА, ГосНИИ ГА.

Большой вклад в развитие научных основ планирования технического обслуживания и ремонта авиационной техники, обеспечения эксплуатационно-технических характеристик, оценки эксплуатационно-экономической эффективности воздушных судов внесли труды специалистов ЛИИ им.

М.М.Громова - Далецкого С.В., Деркача О.Я., Петрова А.Н. и др. [25-27,53]. В трудах разработаны и обоснованы методы выбора состава работ планового технического обслуживания самолетов гражданской авиации, а также предложены методы и алгоритмы выбора рациональной периодичности их выполнения. Кроме этого, большое внимание уделено вопросам влияния выбора работ и периодичности их выполнения на величину эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов.

Для гражданских воздушных судов проблемы поддержания их летной годности, в том числе за счет оптимизации процессов технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения, рассматриваются в работах ученых МАИ, МГТУ ГА и ГосНИИ ГА – Чинючина Ю.М., Заковряшина А.И., Кулешова А.А., Гипича Г.Н., Станкевича А.М., Ицковича А.А. и др. [8,30, 32,40,61,77,76]. Так, например, в работе Г.Н.Гипича [8] рассматриваются и предлагаются решения задач Марковского профилактического обслуживания, организации ремонта авиационной техники при дефиците запасных частей и определения оптимальных ресурсов стареющих агрегатов авиационных систем. В работах Ю.М.Чинючина [76,77] предлагаются новые принципы формирования режимов периодического технического обслуживания воздушных судов, а также построения технологических графиков обслуживания ВС с использованием имитационных моделей производственных процессов. В работах А.А.Кулешова [40] подробно рассматриваются вопросы построения интегрированной информационной среды процессов разработки, производства и эксплуатации воздушных судов, а также предлагается методология оценивания стоимости их жизненного цикла.

Для военной техники исследования в области организации систем ТОиР проводят институты Министерства обороны - ЦНИИ ВВС (ранее 13 ГосНИИ ЭРАТ МО РФ) и ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина (ранее ВВИА им. Н.Е.Жуковского). Значительный вклад в создание теоретических основ обеспечения технической эксплуатации и капитального ремонта авиационной техники внесли труды А.И.Фролова, М.А.Арустамова, В.А.Горшкова,

Г.И.Кудрина, Ю.М.Фадеева, А.С.Шаламова, И.Н.Синицина, В.Я.Головина и др. [9,58,59,79,82]. Так, в [79] предложены научные методы выбора стратегии технической эксплуатации авиационных комплексов и их составных частей, основанные на тяжести последствия возникновения отказов техники, а также описаны методы выбора состава работ планового технического обслуживания и периодичности их выполнения.

В работах Шаламова А.С., Бром А.Е., Клочкова В.В., Левина А.И., Судова Е.В. [6,7,9,33,35,58,63,66] отмечено, что в современных условиях основным инструментом для создания систем технической эксплуатации сложных систем (в том числе их основных подсистем – ТОиР и МТО) являются технологии интегрированной логистической поддержки.

Термин «интегрированная логистическая поддержка» появился в 1964 году в нормативных документах Министерства обороны США [88] и описывал порядок применения комплекса инженерных технологий, направленных на минимизацию затрат в ходе эксплуатации (в первую очередь, затрат на техническое обслуживание, ремонт и материально-техническое обеспечение) вооружений и военной техники при сохранении высокого уровня их технической готовности.

В зарубежных нормативных документах и некоторых отечественных научных работах [79,87,95] приводится классификация задач ИЛП, представленная в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Классификация задач интегрированной логистической поддержки

| № группы задач (подзадач) | Название группы задач (подзадач) |
|----------------------------------|---|
| 100 | Планирование и управление работами по изделию |
| 101 | Разработка предварительной стратегии логистического анализа (ЛА) |
| 102 | Планирование ЛА |
| 103 | Экспертиза проекта изделия в ходе выполнения проекта ЛА |
| 200 | Служебное назначение изделия и система поддержки его эксплуатации |
| 201 | Изучение опыта эксплуатации и обслуживания |
| 202 | Стандартизация элементов изделия и системы поддержки эксплуатации |

| № группы задач (подзадач) | Название группы задач (подзадач) |
|---------------------------|---|
| | и обслуживания |
| 203 | Сравнительный анализ |
| 204 | Технологические решения |
| 205 | Поддерживаемость и связанные с ней параметры проекта |
| 300 | Подбор и оценка альтернатив |
| 301 | Функциональные требования |
| 302 | Варианты системы поддержки |
| 303 | Оценка альтернатив и выбор решений |
| 400 | Разработка требований к ресурсам логистической поддержки |
| 401 | Оценка потребных ресурсов для обеспечения логистической поддержки |
| 402 | Предварительная оценка результатов использования (боевого применения) изделия |
| 403 | Анализ постпроизводственной поддержки |
| 500 | Оценка поддерживаемости |
| 501 | Испытания, оценка и проверка поддерживаемости |

В рамках данной классификации задача синтеза оптимальной системы МТО, рассматриваемая в настоящей работе и включающая в себя разработку методики и алгоритмов анализа уровней ремонта и оптимизации параметров материально-технического обеспечения, относится к 303 группе задач ИЛП, которая, в свою очередь, включает в себя такие задачи как [79,87,95]:

- анализ характеристик готовности (задача 303.2.4);
- анализ уровней ремонта (задача 303.2.7);
- принятые решения по оборудованию для поддержки эксплуатации и обслуживания (задача 303.2.13) и др.

В соответствии с определением, приведенным в отечественных нормативных документах [15,16], «интегрированная логистическая поддержка (процессов технической эксплуатации изделия) (integrated logistic support) – это совокупность видов деятельности, осуществляемых головным разработчиком изделия совместно с другими участниками жизненного цикла изделия и направленных на

формирование системы технической эксплуатации изделия, обеспечивающей эффективное использование изделия при приемлемой стоимости его жизненного цикла».

Указанная в определении «совокупность видов деятельности» включает в себя следующие дисциплины [15]:

- анализ логистической поддержки, включая планирование ТОиР изделия и его МТО, и формирование базы данных (БД) АЛП для ее использования при решении других задач ИЛП;
- разработку и сопровождение эксплуатационной документации (ЭД) и ремонтной документации (РД);
- разработку требований и рекомендаций по инфраструктуре системы технической эксплуатации (СТЭ) и средствам ТОиР (включая средства эксплуатационного контроля), необходимых для ТЭ изделия;
- разработку требований к численности, специализациям и квалификации эксплуатационного персонала, к техническим средствам обучения, планирование и содействие в проведении подготовки персонала;
- разработку требований к поддержке программного обеспечения и автономных вычислительных средств, планирование и организацию соответствующих мероприятий;
- планирование хранения, транспортирования и утилизации изделий;
- мониторинг эксплуатационно-технических характеристик изделия и других параметров СТЭ при испытаниях изделия и на стадии его эксплуатации (а также при необходимости в процессе капитального ремонта) с внесением необходимых изменений в БД АЛП.

В соответствии с [15], системообразующей компонентой ИЛП, обеспечивающей баланс требований в отношении затрат на техническую эксплуатацию и коэффициентом готовности, является технология **анализа логистической поддержки**.

Технологии анализа логистической поддержки подробно рассмотрены в работах Левина А.И., Чубаровой Е.В., Судова Е.В., Петрова А.Н. [42,57,65,66].

Анализ логистической поддержки выполняется подразделениями конструкторского бюро и, в настоящее время, является неотъемлемой частью проектирования наукоемких изделий. Исходной информацией для проведения анализа логистической поддержки является конструкторская документация на изделие и требования в отношении затрат и коэффициента готовности, заданные в техническом задании на проектирование.

С точки зрения формирования систем ТОиР и МТО, процесс АЛП является ключевым, так как именно на этом этапе впервые появляются формальные сведения о требуемой инфраструктуре, номенклатуре и объемах вспомогательного оборудования, материалов и запасных частей, требования к обслуживающему персоналу, объемах и периодичности проведения работ планового ТО. Эти сведения определяют затраты, которые эксплуатант (или сервисная организация) будут нести в процессе использования изделия по назначению на послепродажных стадиях жизненного цикла.

Весь процесс анализа логистической поддержки состоит из последовательно решаемых задач АЛП, подробно рассмотренных в работах Чубаровой Е.В. [57]:

Функциональный анализ изделия заключается в формальном описании структуры функций, которые должно реализовывать изделие. Функции верхнего уровня, относящиеся к изделию в целом, разбиваются на подфункции, которые, в свою очередь, разбиваются на под-подфункции и т.д. Таким образом, в результате функционального анализа формируется структура функций изделия.

Формирование логистической структуры изделия на верхнем уровне производится путем разбиения изделия на функциональные системы. Нижний уровень логистической структуры изделия (ЛСИ) строится на основе конструкторской документации и включает в себя все заменяемые в эксплуатации компоненты. По результатам формирования ЛСИ устанавливается соответствие между структурой функций и элементами ЛСИ. Таким образом, однозначно определяется, за выполнение каких функций отвечает определенный элемент ЛСИ, и наоборот, какими элементами ЛСИ реализуется та или иная функция.

В результате **анализа видов, последствий и критичности отказов** (АВПКО), строятся причинно-следственные зависимости между видами отказов конструктивных элементов и функциональными отказами изделия, заключающимися в невыполнении изделием одной или нескольких функций.

Результаты АВПКО являются исходными данными для проведения **анализа по методике MSG-3**. В результате анализа формируется перечень работ планового ТО, направленных на предупреждение и/или компенсацию возникновений функциональных отказов изделия.

На этапе **анализа технологии обслуживания** для сформированного перечня работ планового ТО определяются потребности в оборудовании, материалах, запасных частях, персонале, необходимые для их выполнения. Для определения продолжительности планового ТО, строятся типовые технологические графики выполнения работ.

На основе формализованной технологии выполнения работ планового ТО, производится **анализ требований к персоналу и средствам обучения**, в результате которого формируются программа обучения и требования к средствам обучения.

Далее, с учетом требований технического задания в отношении коэффициента готовности изделия, производится **расчет потребностей в материально-техническом обеспечении**. В результате расчета подготавливаются данные о номенклатуре и количестве запасных частей и материалов, необходимых для начального и текущего МТО. Следует отметить, что на этапе проектирования расчет потребностей в МТО выполняется для некоторого типового сценария использования изделия по назначению, а не конкретного парка и места его дислокации.

Последней задачей АЛП является **оценка прямых затрат на техническое обслуживание и коэффициента готовности**. В случае несоответствия этих показателей требованиям технического задания, принимается решение о необходимости внесения изменений в конструкцию изделия. Этим обеспечивается «обратная связь» процесса АЛП с процессами проектирования.

Последовательность решения задач АЛП показана на рисунке 1.1.

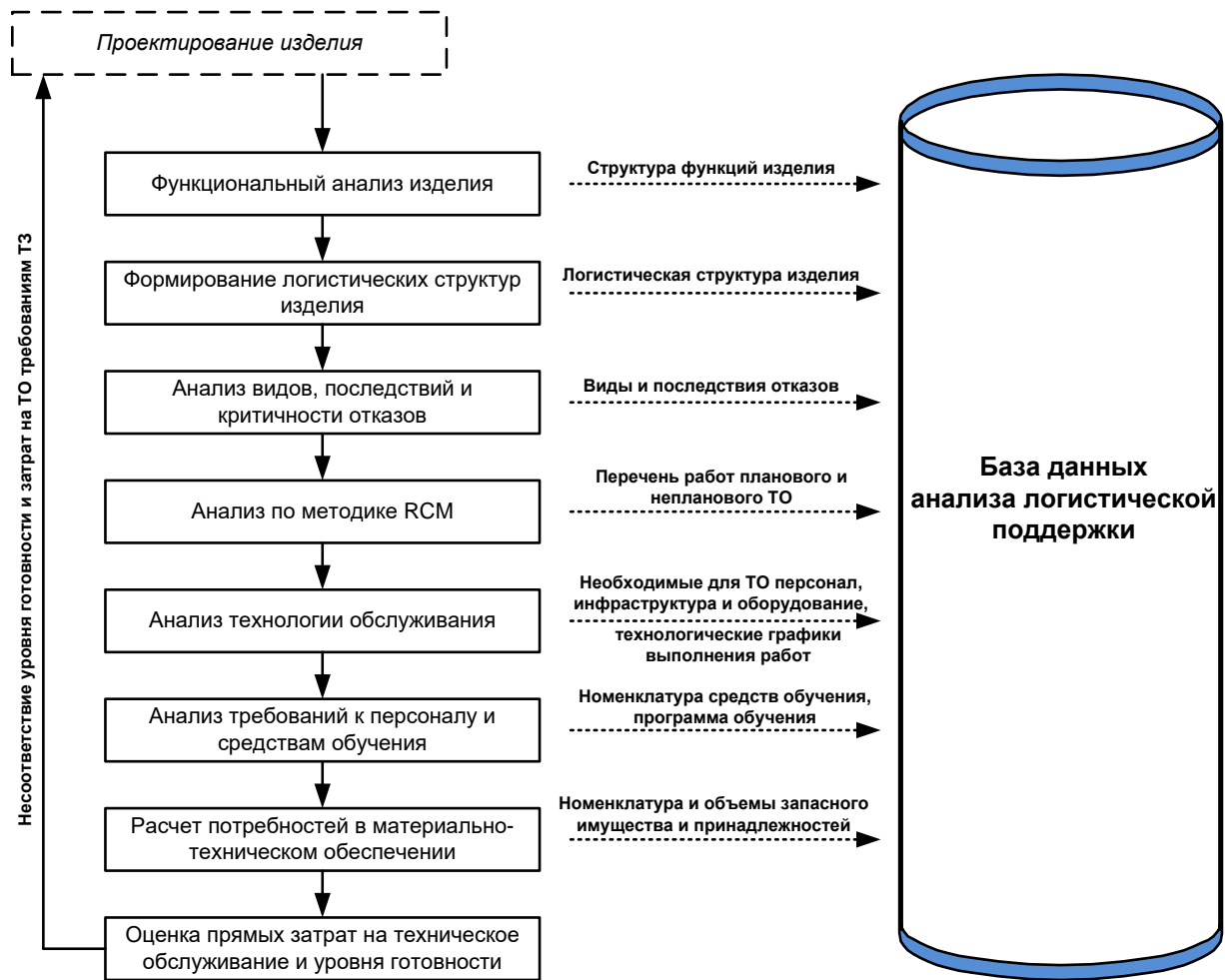


Рисунок 1.1. Последовательность выполнения задач анализа логистической поддержки

Исходные данные и результаты анализа логистической поддержки должны храниться в специальной базе данных – базе данных анализа логистической поддержки [14], которая должна сопровождаться на протяжении всего жизненного цикла изделия.

БД АЛП является источником исходных данных для подготовки документов для обеспечения технической эксплуатации изделия, как показано на рисунке 1.2, а также для работы автоматизированных систем, предназначенных для решения различных задач обеспечения технического обслуживания, в том числе организации процессов ТОиР, планирования ТОиР и МТО, оценки эффективности различных вариантов систем ТОиР и МТО и т.п.

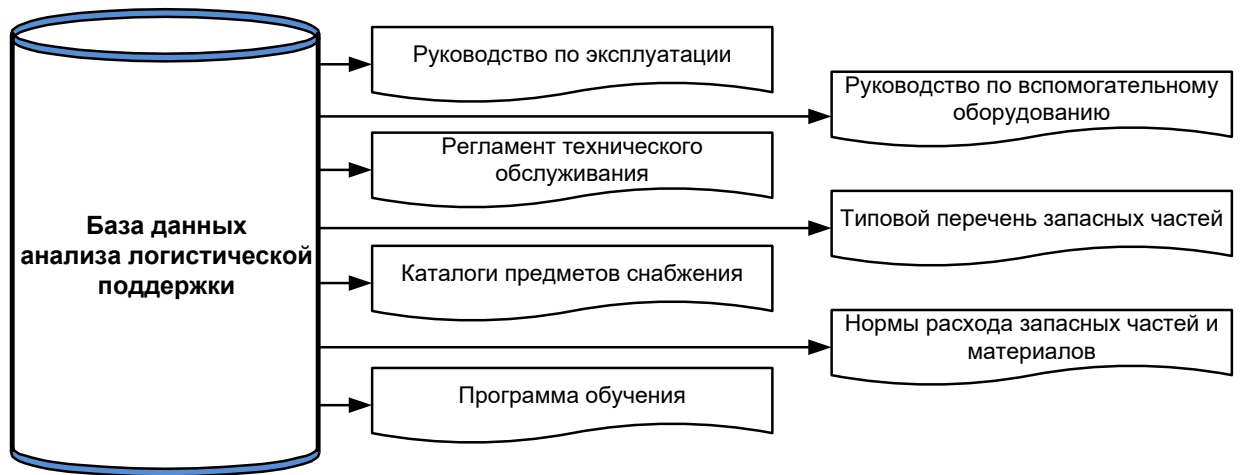


Рисунок 1.2. Формирование документов для обеспечения технической эксплуатации на основе базы данных анализа логистической поддержки

Так как перечисленные выше задачи АЛП выполняются на этапах проектирования и конструирования изделий АТ, в рамках АЛП не представляется возможным оценить полные затраты на обеспечение технической эксплуатации заданного парка изделий АТ для конкретного места дислокации, зависящие от дальности и стоимости транспортировки предметов МТО, затрат на развертывание инфраструктуры и иных факторов, зависящих от условий эксплуатации конкретного парка.

Основные решения по системе МТО для конкретного парка и места его дислокации, позволяющие оценить затраты на обеспечение технической эксплуатации и их зависимость от требуемых значений показателей эксплуатационной готовности, в соответствии с [19], содержатся в документе «Программа обеспечения технической эксплуатации», являющимся приложением к контракту жизненного цикла и рассмотренным в разделе 1.3. Конкретная программа обеспечения технической эксплуатации для заданного парка изделий разрабатывается исполнителем контракта [19] на поставку изделий заказчику.

Программа обеспечения технической эксплуатации включает в себя следующие разделы [19]:

- общие сведения;
- исходные данные для разработки программы;

- индикаторы программы;
- модель жизненного цикла;
- работы по обеспечению технической эксплуатации;
- инфраструктура системы технической эксплуатации;
- порядок сбора и обработки эксплуатационных данных, необходимых для реализации программы;
- система информационной поддержки программы;
- услуги по обеспечению технической эксплуатации и условия их предоставления.

Все решения по системе МТО содержатся в разделах «работы по обеспечению технической эксплуатации» и «Инфраструктура системы технической эксплуатации», которые, в свою очередь, включает в себя [19]:

- сведения о зданиях, сооружениях, складах, которые предполагается использовать в ходе работ по ТЭ;
- состав уровней системы ТЭ и выполняемых на них работ по ТОиР;
- укрупненные расчеты и оценки потребных производственно-технологических мощностей элементов инфраструктуры;
- объемы запасов на каждом уровне хранения;
- рекомендуемые модели (стратегии) управления запасами.

Необходимо отметить, что для большинства видов сложной наукоемкой техники система ТЭ организационно делится на так называемые «уровни» [21], характеризующиеся совокупностью используемых объектов инфраструктуры, средств ТОиР, персонала определенных специальностей и квалификации, которые совместно определяют технологические возможности и условия выполнения на этом уровне определенных видов работ по ТОиР. Для ВС гражданской авиации обычно выделяют четыре таких уровня [101]:

- линейные станции по ТОиР (Line maintenance), осуществляющие оперативное техническое обслуживание ВС и устранение несложных неисправностей;

- авиационно-технические базы (Base maintenance), выполняющие большую часть периодического и календарного ТО ВС;

- региональные сервисные центры (Shop maintenance), выполняющие сложные виды регламентных работ и ремонт отдельных типов СЧ;

- авиаремонтные заводы и заводы-изготовители (OEM Maintenance), выполняющие капитальный ремонт ВС (в т.ч. с модернизацией) и его СЧ.

Несложно увидеть, что указанные разделы программы обеспечения технической эксплуатации содержат формальное описание системы МТО для конкретного парка изделий АТ, эксплуатируемых по заданным сценариям в заданном месте дислокации (регионе). В данной работе будем рассматривать следующие основные свойства и характеристики (параметры) такой региональной системы МТО, включаемые в программу обеспечения ТЭ и влияющие на величину затрат на обеспечение ТЭ:

- состав региональных сервисных центров;
- структура региональных сервисных центров, а именно:
 - состав пунктов по ремонту составных частей (СЧ) ВС определенного типа;
 - количество ремонтных ячеек в каждом пункте по ремонту СЧ ВС;
- объемы запасов на каждом уровне при заданных стратегиях управления запасами.

Большая часть исходных данных, необходимых для формирования системы МТО, хранится в базе данных АЛП. Взаимосвязь задач АЛП, синтеза системы МТО и обеспечения ТЭ представлена на рисунке 1.3.

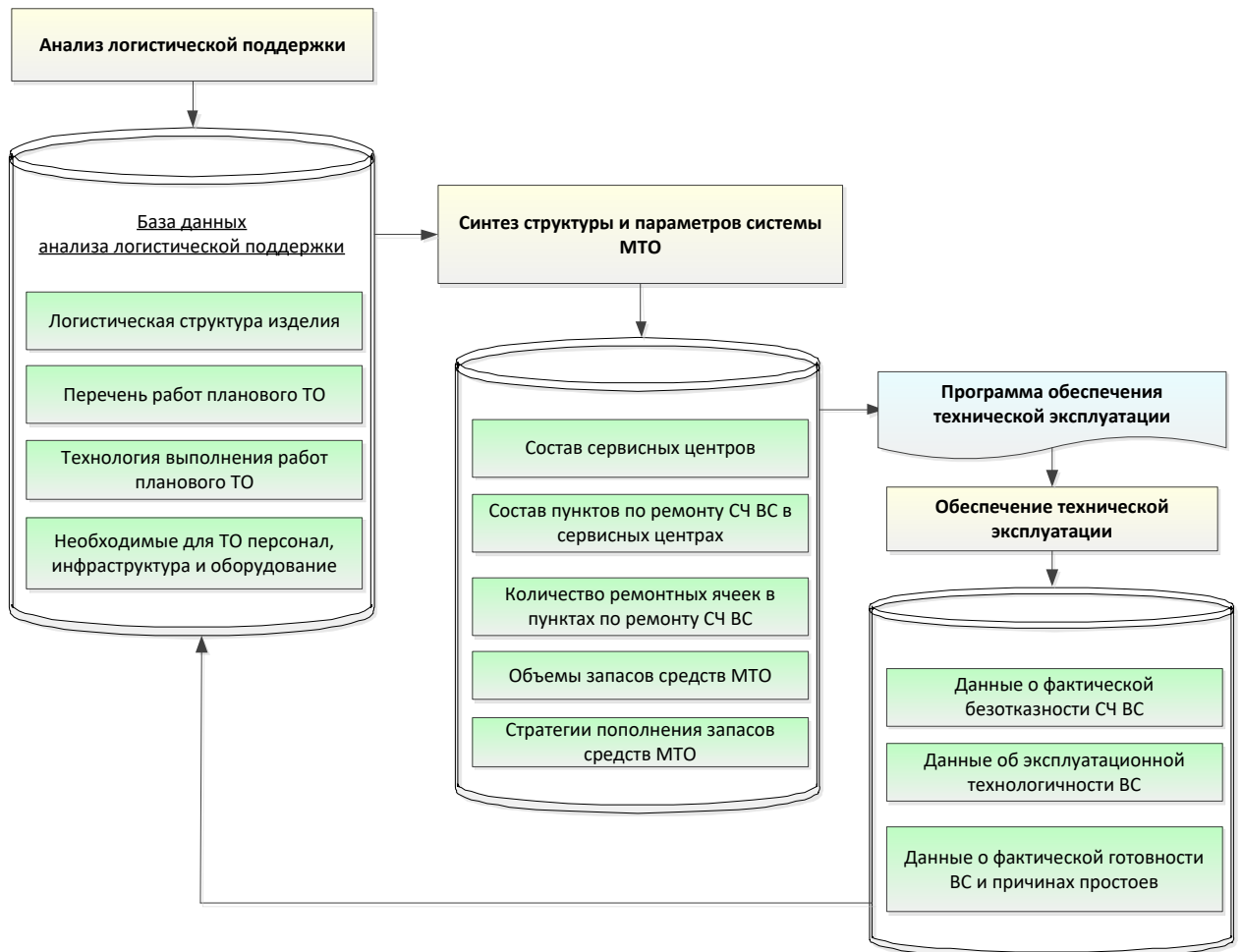


Рисунок 1.3. Взаимосвязь задач АЛП и задач синтеза системы МТО

Как показано на рисунке 1.3, сведения в базе данных АЛП служат исходными данными для задачи синтеза системы МТО. В результате решения задачи синтеза формируются данные о сервисных центрах и параметрах МТО, используемые при подготовке документа «Программа обеспечения технической эксплуатации» [19]. В свою очередь, эта программа регламентирует процессы технической эксплуатации, в ходе которых осуществляется сбор данных о фактической безотказности СЧ, эксплуатационной технологичности и готовности ВС - данных мониторинга ЭТХ изделия [15]. Данные мониторинга впоследствии передаются в базу данных АЛП [15] для уточнения свойств и характеристик изделия и работ по ТОиР.

Суммируя вышеизложенное, задача синтеза структуры и параметров системы МТО в общем виде включает в себя:

- 1) В части структуры системы МТО:

- определение состава региональных сервисных центров;
- определение рационального состава пунктов по ремонту СЧ ВС в региональных сервисных центрах;

- количество ремонтных ячеек в пунктах по ремонту СЧ ВС;

2) В части параметров системы МТО:

- объемы запасов средств МТО;

- стратегии пополнения запасов средств МТО.

Необходимо отметить, что для авиационной техники состав региональных сервисных центров и стратегии пополнения запасов определяются с учетом комплекса нормативно-правовых и экономических ограничений, не рассматриваемых в данной работе. Таким образом, в рамках данной работы, под задачей синтеза системы МТО будем понимать задачу выбора:

- состава пунктов по ремонту СЧ ВС;

- количества ремонтных ячеек в пунктах по ремонту СЧ ВС;

- объемов запасов средств МТО в каждом сервисном центре, - для заданного парка ВС в заданном регионе базирования.

Эти задачи решаются с использованием различных математических методов и алгоритмов, как правило, с применением специальных информационных систем.

1.2 Обзор существующих методов, алгоритмов и информационных систем синтеза структуры и параметров системы материально-технического обеспечения

1.2.1 Методы и алгоритмы анализа уровней ремонта составных частей изделий

Методы и алгоритмы анализа уровней ремонта (Level of Repair Analysis) СЧ сложных изделий описаны, в основном, в работах зарубежных исследователей [86,91,105,106]. Задача анализа уровней ремонта заключается в выборе экономически целесообразного уровня ремонта (например, ремонт в сервисном центре или на заводе-изготовителе) для составных частей сложного изделия и, таким образом, определении состава ремонтных ячеек сервисных центров разного уровня. Как правило, в зарубежных работах рассматриваются три уровня ремонта:

1-й уровень – организационный (соответствует уровню авиационно-технической базы);

2-й уровень – промежуточный (соответствует уровню регионального сервисного центра);

3-й уровень – сервисный (соответствует уровню ремонтного завода).

В работах Т.Бушера [105,106] постановка задачи формулируется как задача минимизации затрат на создание ремонтных ячеек и выполнение ремонтов в них:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^3 \sum_{e=1}^m [VC_{r,e,i} \lambda_i + FC_{r,e,i}] X_{r,e,i} \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

где

m – количество уровней ремонта;

n – количество составных частей в изделии;

λ_i – ожидаемое количество ремонтов i -й СЧ за срок службы изделия;

r – индикатор способа восстановления СЧ на определенном уровне ремонта, равный 1 если СЧ ремонтируется, 2 если СЧ списывается, 3 если СЧ отправляется в ремонт на уровень выше;

$VC_{r,e,i}$ – стоимость восстановления i -й СЧ способом, заданным индикатором r , на e -том уровне ремонта;

$FC_{r,e,i}$ – затраты на создание пункта ремонта для восстановления i -й СЧ способом, заданным индикатором r , на e -том уровне ремонта;

$$X_{r,e,i} = \begin{cases} 1, & \text{если для } i\text{-й СЧ выбран способ восстановления } r \\ & \text{на уровне ремонта } e \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Определенные в результате решения оптимизационной задачи (1.1) значения $X_{r,e,i}$ отражают состав ремонтных ячеек в сервисных центрах разного уровня.

В работе Р.Бастена [86] дополнительно учитывается, что несколько разнотипных СЧ могут ремонтироваться в одном пункте ремонта с использованием одинакового оборудования и инструмента. В этом случае оптимизационная задача записывается в виде:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^3 \sum_{e=1}^m VC_{r,e,i} \lambda_i X_{r,e,i} + \sum_{e=1}^m \sum_{r=1}^3 \sum_{g \in \Gamma} FC_{e,r,g} M_{e,r,g} \rightarrow \min, \quad (1.2)$$

где

$FC_{e,r,g}$ – затраты на создание пункта ремонта для восстановления множества g типов составных частей способом, заданным индикатором r , на e -том уровне ремонта;

$$M_{e,r,g} = \begin{cases} 1, & \text{если для множества } g \text{ типов СЧ выбран} \\ & \text{способ восстановления } r \text{ на уровне ремонта } e \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Для решения оптимизационных задач (1.1) и (1.2), являющихся классическими задачами комбинаторной оптимизации, в работе Р.Бастена [86] предлагается использовать метод ветвей и границ, а в работах Т.Бушера [105,106] – генетические алгоритмы с элементами поиска с запретами.

Ключевым недостатком предложенных методов и алгоритмов является невозможность выбора оптимального решения по организации пунктов по ремонту СЧ с учетом затрат на МТО, зависящих, в свою очередь, от требуемых показателей готовности парка.

Среди отечественных работ в данной области необходимо отметить работы В.В.Клочкова [36], в которых задача оценки целесообразности развертывания в сервисном центре пунктов по ремонту различных типов СЧ решается путем расчета рационального количества ремонтных ячеек. В этом случае развертывание пункта по ремонту считается целесообразным, если количество ремонтных ячеек больше нуля.

1.2.2 Методы определения рационального количества ремонтных ячеек в сервисном центре

Метод оценки рационального количества ремонтных ячеек в пункте по ремонту СЧ определенного типа основан на применении модели гибели и размножения, описанной в работах Е.С.Вентцель, Л.А.Овчарова, Г.Н.Черкесова, Д.К. Иглсона и др. [31,68,74]. Применение данной модели для изделий авиационного двигателестроения рассмотрено в работах В.В.Клочкова [34-36]. В задаче предполагается, что СЧ изделия может быть отремонтирована как в региональном сервисном центре, так и на заводе-изготовителе. При этом продолжительность ремонта СЧ в региональном сервисном центре равна $t_{\text{рем}}^{\text{терр}}$ суток, а продолжительность ремонта на заводе изготовителе - $t_{\text{рем}}^{\text{зав}}$ суток.

Региональный сервисный центр, в условиях данной задачи, располагает $n_{\text{рем}}$ ремонтными ячейками. Ремонт СЧ осуществляется по умолчанию в региональном сервисном центре, а если все его ремонтные ячейки оказываются заняты – СЧ направляется для ремонта на завод-изготовитель.

В этом случае парк эксплуатируемых изделий и ремонтные мощности можно представить в виде замкнутой системы массового обслуживания, показанной на рисунке 1.4, которая может находиться в нескольких состояниях.

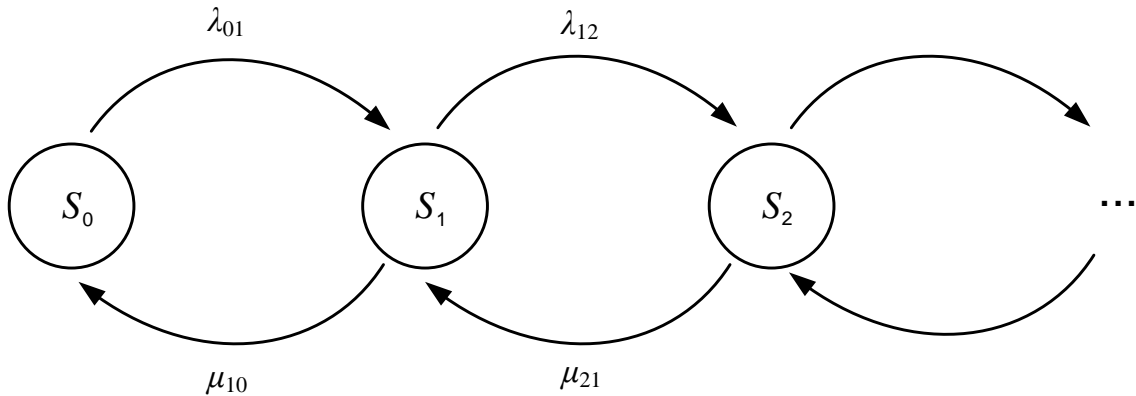


Рисунок 1.4. Граф состояний и переходов

Интенсивность потока событий поступления в ремонт $\lambda_{i-1,i}$, переводящего систему из состояния $i-1$ в состояние i определяются размером парка, количеством СЧ, установленном на одном ВС, количеством запасных СЧ. Интенсивность потока событий возвращения СЧ из ремонта $\mu_{i,i-1}$, переводящего систему из состояния i в состояние $i-1$, определяются количеством СЧ находящихся в ремонте на заводе изготовителе $m_{\text{рем}}^{\text{зав}}$ и в региональном сервисном центре $m_{\text{рем}}^{\text{терр}}$. Так как для ремонта СЧ используются мощности сервисного центра (а в случае их нехватки – мощности завода изготовителя), можно записать, что:

$$m_{\text{рем}}^{\text{терр}}(i) = \min(i; n_{\text{рем}}) \quad , \quad m_{\text{рем}}^{\text{зав}}(i) = i - m_{\text{рем}}^{\text{терр}}(i) \quad (1.3)$$

В этом случае интенсивность возвращения СЧ из ремонта можно записать как сумму интенсивностей потоков ремонта в региональном сервисном центре и на заводе изготовителе:

$$\mu_{i,i-1} = \frac{m_{\text{рем}}^{\text{терр}}(i)}{24 t_{\text{рем}}^{\text{терр}}} + \frac{m_{\text{рем}}^{\text{зав}}(i)}{24 t_{\text{рем}}^{\text{зав}}} \quad (1.4)$$

В стационарном состоянии каждому i -му состоянию системы будет соответствовать вероятность p_i , отражающая долю календарного времени, в

течение которого система будет пребывать в данном состоянии. Эти вероятности состояний системы можно найти из рекуррентных соотношений и условия нормировки:

$$p_1 = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} p_0, \dots, p_i = \frac{\lambda_{i-1,i}}{\mu_{i,i-1}} p_{i-1},$$

$$\sum_{i=0}^{m_{штатн} + m_{запас}} p_i = 1, \quad (1.5)$$

где

$m_{штатн}$ – количество СЧ на эксплуатируемых ВС;

$m_{запас}$ – количество запасных СЧ.

Тогда среднее количество СЧ, находящихся в ремонте в региональном сервисном центре $\bar{m}_{рем}^{терр}$ и на заводе изготовителе $\bar{m}_{рем}^{зав}$, можно найти по формулам:

$$\bar{m}_{рем}^{терр} = \sum_{i=0}^{m_{штатн} + m_{запас}} p_i m_{рем}^{терр}(i), \quad \bar{m}_{рем}^{зав} = \sum_{i=0}^{m_{штатн} + m_{запас}} p_i m_{рем}^{зав}(i) \quad (1.6)$$

Ожидаемое количество ремонтов в год, выполняемых в региональном сервисном центре и на заводе изготовителе, можно, в свою очередь, рассчитать по формулам:

$$n_{рем}^{терр} = \frac{\bar{m}_{рем}^{терр} 365}{t_{рем}^{терр}}, \quad n_{рем}^{зав} = \frac{\bar{m}_{рем}^{зав} 365}{t_{рем}^{зав}} \quad (1.7)$$

Обозначив стоимость одного ремонта СЧ в региональном сервисном центре как $C_{рем}^{терр}$, а на заводе изготовителе - $C_{рем}^{зав}$, можно рассчитать средние годовые затраты на обеспечение ремонта СЧ по формуле [34]:

$$ERC(n_{рем}) = C_{аморт} + C_{центр} + C_{ТО} + n_{рем}^{терр} C_{рем}^{терр} + n_{рем}^{зав} C_{рем}^{зав} + C_{штраф}, \quad (1.8)$$

где

$C_{\text{аморт}}$ - амортизационные отчисления за приобретенный запас СЧ;

$C_{\text{центр}}$ – среднегодовые затраты за пользование СЧ из запаса;

$C_{\text{ТО}}$ - среднегодовые затраты на плановое ТОиР СЧ;

$C_{\text{штраф}}$ - ожидаемая сумма штрафов за простой ВС.

Оптимальное количество ремонтных ячеек в региональном сервисном центре можно найти путем решения оптимизационной задачи:

$$ERC(n_{\text{рем}}) \rightarrow \min \quad (1.9)$$

Если найденное оптимальное количество $n_{\text{рем}}$ равно нулю, развертывание пункта по ремонту СЧ нецелесообразно.

Основным недостатком предложенного метода является отсутствие учета влияния параметров МТО (стратегии пополнения запасов, объемы фондов) на целесообразность открытия пунктов по ремонту, а также использование в качестве критерия оптимизации исключительно функции затрат. В этом случае простой учитываются в виде «штрафной» функции в затратах, что не применяется для изделий АТ, для которых таким критерием является эксплуатационная готовность.

Разработанный метод реализован в комплексе программ ЕСОМ, автоматизирующем решение следующих задач [34]:

- расчет ожидаемого количества ремонтов авиадвигателей;
- расчет финальных вероятностей пребывания парка в различных состояниях;
- расчет ожидаемой суммы затрат на обеспечение эксплуатации авиадвигателей.

1.2.3 Методы и алгоритмы расчета параметров материально-технического обеспечения

Методы и алгоритмы расчета параметров МТО рассмотрены в работах А.Э.Шуры-Буры, М.В.Топольского, К.Шербрука, А.А.Хроменко, Г.Н.Черкесова, Е.Н.Хоботова, Ю.И.Рыжикова [41,43,56,71,72,75,80,102-104].

Из работ зарубежных исследователей наиболее известными являются методы расчета параметров МТО METRIC и Vari-METRIC [102-104]. Методы используются для оценки необходимых объемов запасов ремонтпригодных СЧ (модель METRIC), а также неремонтпригодных СЧ в многоуровневой системе МТО (модель Vari-METRIC). Математические методы разработаны для случая, когда поток заявок в систему МТО характеризуется экспоненциальным законом распределения. Основой метода является расчет накопленной вероятности отсутствия запасной части на складе в момент, когда она потребуется. В этом случае для расчета необходимого количества запасных частей (в простейшем случае) применяется следующее соотношение:

$$1 - R \leq \sum_{j=0}^k \frac{(n\lambda)^j}{j!} e^{-n\lambda}, \quad (1.10)$$

где

n – количество эксплуатируемых СЧ;

λ – интенсивность отказов СЧ;

R – допустимый уровень риска отсутствия СЧ на складе в момент, когда она потребуется.

В отечественной практике МТО эксплуатации АТ наиболее широко применяются методы и алгоритмы, предложенные А.Э.Шурой-Бурой и М.В.Топольским [80] и получившим дальнейшее распространение в работах Г.Н.Черкесова [71]. На основе этих работ выпущены нормативные документы

[13], применяемые в отечественной авиастроительной промышленности для проектирования комплектов ЗИП (одноуровневых и двухуровневых).

В [81] рассматриваются следующие четыре возможные стратегии пополнения запасов СЧ на складах:

- непрерывное пополнение запасов;
- периодическое пополнение запасов;
- периодическое пополнение запасов с экстренными доставками;
- пополнение по уровню неснижаемого запаса.

Рассматриваются следующие, представленные на рисунке 1.5, возможные структуры использования одиночного (ЗИП-О) и группового (ЗИП-Г) ЗИП.

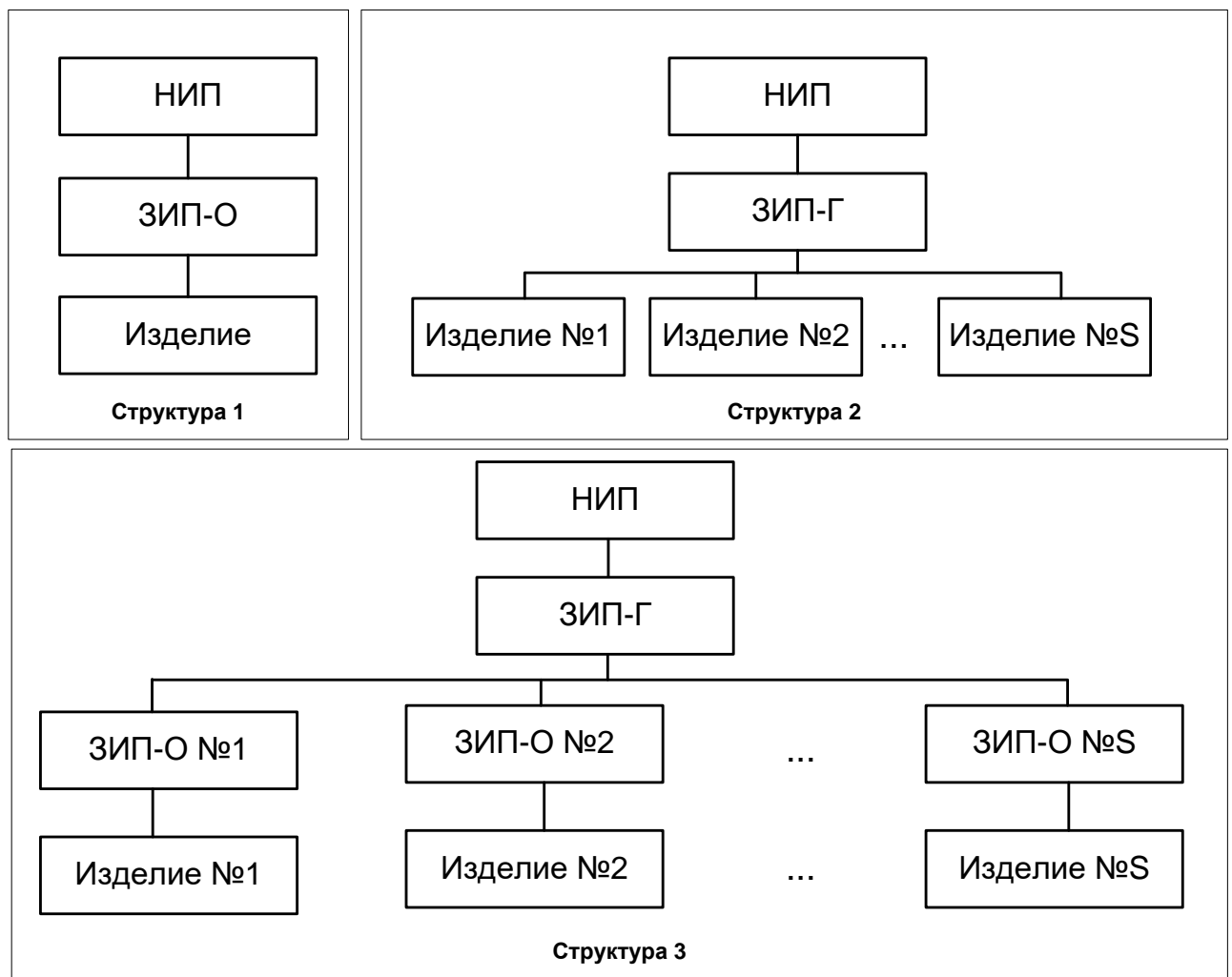


Рисунок 1.5. Типовые структуры использования комплектов ЗИП-О и ЗИП-Г

В [81] принимается, что пополнение комплектов ЗИП-О (в структуре 1) и ЗИП-Г (в структурах 2, 3) осуществляется со складов (баз снабжения), которые считаются неотказывающим источником пополнения (НИП), т.е. удовлетворяющими все заявки на запасные части без задержки.

Задача проектирования комплектов ЗИП в [71,80] формулируется как задача минимизации стоимости комплектов ЗИП при ограничениях на коэффициент готовности ЗИП. Комплект ЗИП при этом может состоять из разных типов СЧ, для каждого из которых может применяться одна из четырех стратегий пополнения запасов.

Коэффициент готовности ЗИП в целом рассчитывается по формуле (здесь и далее приведены формулы для комплектов ЗИП-О) [75]:

$$K_{г.зип}^{тр} = \prod_{i=1}^N K_{гз\ i}, \quad (1.11)$$

где

$K_{гз\ i}$ – коэффициент готовности запаса i -го типа СЧ в составе ЗИП-О.

Методы расчета коэффициента готовности запаса i -го типа СЧ, в свою очередь, зависят от стратегии пополнения запасов.

Для СЧ, запасы которых пополняются в соответствии с непрерывной стратегией пополнения, процесс потребления и пополнения запасов сводится к процессу массового обслуживания в системе MML, где L – число запасных частей данного типа [75]. Модель функционирования системы MML является моделью схемы гибели и размножения, для которой найдены формулы расчета стационарных вероятностей состояний [46]. В [13] в качестве промежуточного результата производится расчет логарифма от $K_{гз\ i}$ по следующей формуле:

$$R_i(A_i, L_i) = -\ln(K_{гз\ i}) = -\ln \left[1 - \frac{A_i^{L_i+1}}{(L_i + 1)! \sum_{j=0}^{L_i+1} \frac{A_i^j}{j!}} \right], \quad (1.12)$$

где

A_i – среднее число поступающих заявок в комплект ЗИП-О для запаса i -го типа СЧ за период пополнения (за время доставки, ремонта), $A_i = m_i \lambda_i T_i$;

m_i – количество СЧ i -го типа в составе изделия;

λ_i – интенсивность замен СЧ i -го типа;

T_i – среднее время доставки (ремонта) СЧ i -го типа;

L_i – количество СЧ i -го типа в ЗИП-О.

Для СЧ, запасы которых пополняются в соответствии с периодической стратегией пополнения, в [13] также производится расчет промежуточного результата по формуле:

$$R_i(A_i, L_i) = -\ln \left\{ \sum_{j=0}^{L_i+1} \frac{A_i^j}{j!} + \frac{1}{A_i} \left[1 - e^{-A_i} \sum_{j=0}^{L_i+1} \frac{A_i^j}{j!} \right] \right\}, \quad (1.13)$$

где

A_i – среднее число поступающих заявок в комплект ЗИП-О для запаса i -го типа СЧ за период пополнения (за время доставки, ремонта), $A_i = m_i \lambda_i T_i$;

T_i – периодичность пополнения запасов СЧ i -го типа.

В случае, когда при использовании периодической стратегией пополнения запасов возможны дополнительные экстренные доставки СЧ, расчет промежуточного результата выполняется по следующей формуле [81]:

$$R_i(A_i, L_i) = -\ln \left\{ 1 - \frac{T_{\text{Эд } i}}{T_i} \left[\sum_{k=1}^{\infty} k \sum_{j=k(L+1)}^{k(L_i+1)+L_i} \frac{A_i^j}{j!} e^{-A_i} \right] \right\}, \quad (1.14)$$

где

$T_{\text{Эд } i}$ – время экстренной доставки i -го типа СЧ в комплект ЗИП-О.

В формуле (1.14) присутствуют выражения, содержащие «бесконечные» суммы. При проведении практических расчетов с использованием специальных компьютерных программ в [13] предлагается проводить суммирование до такого индекса, при котором значение под знаком суммы будет меньшим, чем 10^{-7} .

Для СЧ, запасы которых пополняются в соответствии со стратегией пополнения по уровню неснижаемого запаса, в [13] производится расчет промежуточного результата по формуле (1.15). Необходимо отметить, что указанная стратегия пополнения запасов используется только для комплектов ЗИП-О и согласно [81] не используется, например, для комплектов ЗИП-Г.

$$R_i(A_i, L_i) = -\ln \left[1 - \frac{A_i^{k_i+2}}{A_i^{k_i+2} + (L_i - k_i)(1 + A_i)^{k_i+1}} \right], \quad (1.15)$$

где

k_i – уровень неснижаемого запаса СЧ i -го типа, при достижении которого осуществляется поставка СЧ объемом $(L_i - k_i)$.

Величина коэффициента готовности ЗИП-О, содержащего N разнотипных СЧ рассчитывается по формуле [13]:

$$K_{г.зип} = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^N R_i(A_i, L_i) \right\} \quad (1.16)$$

Алгоритм расчета оптимального количества СЧ разных типов в комплекте ЗИП-О состоит из следующих шагов [81]:

1) Вычисляется требуемое значение показателя D_0 , равного логарифму требуемого значения коэффициента готовности ЗИП, по формуле [13]:

$$D_0 = -\ln K_{г.зип}^{тр} \quad (1.17)$$

2) Для каждого типа СЧ в соответствии с принятой для него стратегией пополнения запасов рассчитывается первоначальный уровень запаса L_i^0 путем решения неравенства:

$$R_i(A_i, L_i^0) \leq D_0 \quad (1.18)$$

3) Для каждого типа СЧ найденное значение L_i^0 увеличивают на единицу и определяют в соответствии с принятой стратегией пополнения запасов значение $R_i(A_i, L_i^0 + 1)$.

4) Для каждого типа СЧ определяют значение отношения:

$$\Delta_i = \frac{R_i(A_i, L_i^0) - R_i(A_i, L_i^0 + 1)}{C_i}, \quad (1.19)$$

где C_i - стоимость единицы СЧ i -го типа.

5) Вычисляют значение R_Σ^0 по формуле:

$$R_\Sigma^0 = \sum_{i=1}^N R_i(A_i, L_i^0) \quad (1.20)$$

Если $R_\Sigma^0 \leq D_0$, то совокупность значений L_i^0 является искомым уровнем запасов в комплекте ЗИП-О.

6) Выбирают максимальное число Δ_i . Для соответствующего ему i -го типа СЧ увеличивают значение L_i^0 на 1, получив таким образом новую совокупность значений n_i^1 .

Шаги 2-6 повторяют, используя вместо совокупности значений L_i^0 совокупности значений L_i^j , где j – номер шага в процессе оптимизации. Алгоритм прекращает работу, когда достигается условие $R_\Sigma^j \leq D_0$.

Оценку запасов в групповом комплекте ЗИП-Г выполняют по аналогичным алгоритмам.

Таким образом, разработанные в [71,80] методы и алгоритмы позволяют достаточно точно рассчитать объемы запасов для одно- и двухуровневой системы МТО. Единственным недостатком предложенных методов и алгоритмов является использование в качестве целевой функции оптимизации суммарной стоимости запаса. В этом случае не учитываются затраты на транспортировку, хранение и ремонт СЧ в региональных сервисных центрах в течение всего срока службы изделий. Учитывая, что эти статьи затрат могут превосходить затраты на приобретение начального запаса, предложенные в [71,80] методы и алгоритмы расчета целесообразно дополнить для получения более точных оценок. Разработанные в [71,80] методы и алгоритмы реализованы в программном обеспечении «РОКЗЭРСИЗ» и «АСОНИКА-ЗИП».

В работах А.А.Хроменко предлагается для оценки рационального количества запасных частей на складах использовать методы имитационного моделирования. В [72] представлена имитационная модель для системы MathLab, позволяющая произвести оценку объема начального запаса СЧ на складах. Необходимо отметить, что ключевым недостатком этой модели является возможность ее применения только для ремонтпригодных изделий, а также очень длительное время моделирования.

1.2.4 Информационные модели данных интегрированной логистической поддержки

Вопросы информационной поддержки процессов ИЛП, в том числе применяемых информационных моделей, рассмотрены в работах Левина А.И., Чубаровой Е.В., Судова Е.В., Яцкевича А.И. [57,63,65,66,83]. Ядром информационных систем для решения задач АЛП является база данных АЛП, интегрированная, как правило, со смежными информационными системами. Первые базы данных разрабатывались с использованием реляционных СУБД, а все данные хранились в таблицах, номенклатура атрибутов в которых была стандартизована [79]. Стандартная схема БД АЛП включала в себя несколько групп таблиц, каждая из которых была предназначена для хранения результатов решения одной из задач АЛП. В стандартах [87,95] описаны 108 реляционных таблиц, разбитых на 11 групп:

Группа X: Структура изделия.

Группа A: Требования к функционированию изделия и его техническому обслуживанию.

Группа B: Результаты анализа видов, последствий и критичности отказов.

Группа C: Регламент и технология обслуживания.

Группа E: Вспомогательное оборудование и материалы для обучения обслуживающего персонала.

Группа U: Требования к испытаниям изделия.

Группа F: Данные об инфраструктуре для поддержки технической эксплуатации.

Группа G: Требования к квалификации персонала.

Группа H: Данные для материально-технического обеспечения и упаковки.

Группа J: Данные для транспортировки изделия и его компонентов.

Группа Z: Требования к упаковке, обработке, хранению и транспортированию боеприпасов.

В связи с развитием информационных технологий, в настоящее время приняты следующие подходы к формированию и сопровождению баз данных АЛП [64,84]:

- взамен реляционных применяются объектно-ориентированные СУБД;
- учитывая возможности по информационной интеграции систем различного назначения, разрабатываются схемы данных, охватывающие не только вопросы АЛП, но и другие задачи управления жизненным циклом изделия.

Наиболее известные информационные модели, регламентирующие состав и взаимосвязи между различными элементами данных, используемыми в ходе жизненного цикла изделия, были разработаны техническими комитетами по стандартизации НАТО [64] – NATO Product Data Model (NPDM) и NATO CALS Data Model (NCDM). Эти модели разработаны с использованием нотации EXPRESS-G [23], применяемой для формального описания объектно-ориентированных баз данных.

В работах Чубаровой Е.В. [57] проведен анализ реляционной модели БД АЛП и предложен ее объектно-ориентированный вариант. Предложенная информационная модель расширяет модель, разработанную А.И.Яцкевичем в [83], и содержит сущности и атрибуты, необходимые для решения следующих задач АЛП:

- описание финального изделия и сценариев его применения по назначению;
- формирование логистической структуры изделия;
- функциональный анализ изделия;

- анализ видов, последствий и критичности отказов;
- анализ по методике RCM;
- анализ технологии обслуживания.

Фрагмент информационной модели БД АЛП, разработанной в [57], представлен на рисунке 1.6.

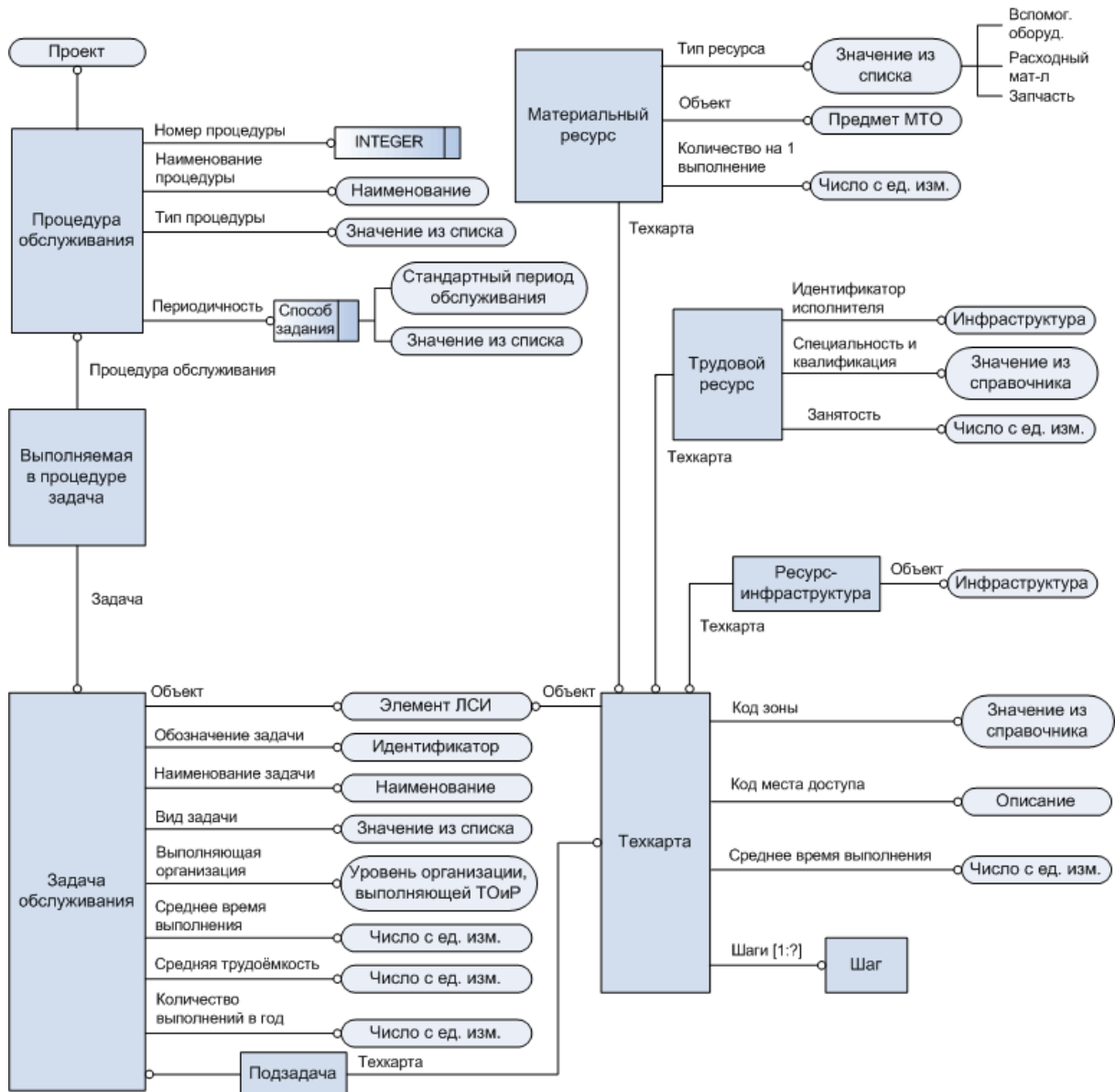


Рисунок 1.6. Фрагмент схемы базы данных анализа логистической поддержки

Следует отметить, что в разработанных в [57,83] информационных моделях отсутствуют сущности и атрибуты, описывающие структуру и параметры системы МТО и данные, необходимые для ее синтеза, что, в свою очередь, не

позволяет создать интегрированную информационную систему, в комплексе решающую все задачи ИЛП.

При этом также следует отметить, что разработанные А.И.Яцкевичем программные инструменты для управления данными об изделии (в том числе данными ИЛП) позволяют реализовывать любые информационные модели, выполненные в нотации EXPRESS-G [22], в том числе разработанные в [57,83] и дополнения к ним.

1.3 Особенности обеспечения технической эксплуатации авиационной техники при переходе к контрактам жизненного цикла

1.3.1 Существующие проблемные вопросы в области послепродажного обслуживания авиационной техники

Одной из важнейших эксплуатационно-технических характеристик АТ является достигаемая в эксплуатации и поддерживаемая величина коэффициента эксплуатационной готовности изделий. С целью обеспечения требуемого заказчиком коэффициента эксплуатационной готовности в эксплуатирующих организациях разворачивается необходимая инфраструктура, персонал, средства обслуживания, проводится обучение, осуществляется поставка и сопровождение необходимой эксплуатационной и ремонтной документации. То есть одновременно с поставкой изделий в эксплуатацию разворачиваются элементы системы МТО, определенные в ходе проведения работ по ИЛП, в том числе путем синтеза на основе результатов АЛП системы МТО для конкретного парка ВС и заданных условий его эксплуатации (сценарии использования изделий, географическое размещение и т.п.).

При этом, с одной стороны, все расчеты, выполняемые в организациях разработчиках АТ показывают, что конструкция разрабатываемых изделий

должна обеспечивать достаточно высокий уровень надежности в эксплуатации. Так, например, для самолетов семейства Ту-204 по результатам выполнения анализа логистической поддержки [49] определен коэффициент эксплуатационной готовности 0,99. С другой стороны, данные о фактической эксплуатации изделий АТ [49] показывают, что в эксплуатирующих организациях не удается в полной мере реализовать заложенный в конструкцию уровень готовности. Причем, как показывают исследования, чем более сложным является изделие, тем более низкий уровень готовности достигается в эксплуатации. Так, например, общий уровень готовности самолетов семейства Ту-204 в 1998-2008гг. можно охарактеризовать через выявленное количество отказов и среднее время простоя самолетов, связанное с устранением этих отказов.

Количество отказов самолетов семейства Ту-204 приведено в таблице 1.2 [49].

Таблица 1.2. Количество отказов самолетов семейства Ту-204 и их последствия в 1998-2008гг.

| Тип ВС | Невыход в полет | Задержка вылета | Вынужденное окончание полета | Полет с отказавшей системой | Всего |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Ту-204 | 590 | 737 | 479 | 221 | 2027 |
| Ту-214 | 434 | 543 | 353 | 163 | 1493 |

В соответствии со статистическими данными по результатам эксплуатации [49], средняя наработка на отказ ВС данного типа составляет 45 часов. Тогда при известном среднем времени простоя ВС данного типа из-за возникновения неисправности, коэффициент эксплуатационной готовности (Кэг) равен 0,83.

Таким образом, анализ приведенных данных показывает, что при достаточно высокой надежности конструкции изделий АТ и прогнозируемом коэффициенте готовности близком к единице, фактический уровень готовности эксплуатируемого парка оказывается существенно ниже этой прогнозной оценки.

В качестве причин unplanned простоев изделий АТ в эксплуатации выступают организационные, в том числе нормативно-правовые, недостатки в ходе послепродажного обслуживания поставленной техники, а также несовершенство инженерно-технических методов планирования обеспечения технической эксплуатации. Организационные недостатки, в том числе недостатки нормативно-правовой базы, организации послепродажного обслуживания продукции военного назначения рассматриваются в работах В.В.Кудашкина, А.Н.Турко [39,69], а также в [45,51].

К недостаткам инженерно-технических методов планирования обеспечения технической эксплуатации можно отнести [50,51]:

- недостатки в планировании материально-технического обеспечения эксплуатации, приводящие к отсутствию необходимых запасных частей и избыточным запасам невостребованных запасных частей;
- длительные сроки ремонта составных частей, связанные с отсутствием в регионе базирования техники ремонтных органов или их недостаточной производственной мощностью;
- большое количество неисправностей, связанное с недостаточным уровнем подготовки инженерно-технического состава при техническом обслуживании и ремонте сложной техники.

Очевидно, что первые два из перечисленных недостатков связаны с несоответствием структуры и параметров системы МТО фактическим условиям эксплуатации парка ВС.

Проблема, связанная с большим количеством отказов сложных изделий из-за недостаточной подготовки инженерно-технического состава, является общемировой, так как с усложнением изделий АТ требования к обслуживающему персоналу также возрастают, что требует его постоянной переподготовки. Одним из решений может быть переход к обслуживанию на основе т.н. контрактов жизненного цикла, подробно рассматриваемых в разделе 1.3.2.

1.3.2 Основные условия контрактов жизненного цикла

В связи с все возрастающей сложностью изделий АТ и, соответственно, сложностью процессов и технологий их ТОиР и МТО, все большее распространение приобретают т.н. контракты жизненного цикла, в рамках которых производитель не только осуществляет поставку изделий АТ, но и осуществляет их ТОиР, гарантируя покупателю определенную величину эксплуатационно-технических характеристик [37,62,94,99,109].

В зарубежной практике [89,92,93] этот тип контрактов называется Performance-Based Lifecycle support (*PBL*), то есть поддержка жизненного цикла, основанная на показателях конечного результата. В контрактах типа *PBL* эксплуатирующая организация оплачивает услуги производителя (или его обособленного подразделения – Оператора ТОиР) путем выплаты нефиксированных отчислений за определенный календарный период времени. Оператор ТОиР, в свою очередь, выполняет все работы планового и непланового ТО, гарантируя эксплуатирующей организации определенные уровни характеристик техники и системы ее эксплуатации и, в первую очередь, коэффициента эксплуатационной готовности (КэГ).

В соответствии с определением [97,98], *PBL* – это «экономически оправданное приобретение услуг поддержки, как интегрированного пакета нормированных показателей конечного результата», нацеленное на повышение готовности, достижение заданных тактико-технических характеристик военной техники и базирующееся на долговременных сервисных соглашениях с четким разделением полномочий и ответственности между эксплуатантом и Оператором ТОиР.

Оплата услуг Оператора ТОиР напрямую зависит от достигнутых показателей конечного результата (ПКР), в состав которых входит коэффициент эксплуатационной готовности (КэГ). Величина платежей Оператору ТОиР состоит из двух частей [85,100]:

- базовая цена контракта, состоящая из прямых затрат, накладных расходов и прибыли Оператора ТООР,
- рисковая составляющая, которая выплачивается в зависимости от достигнутой величины КэГ.

Доля рискованной составляющей в договорной цене является предметом переговоров с Заказчиком. Согласно [97], метод оплаты услуг по показателям конечного результата, оговариваемый в контракте, должен предусматривать гибкую формулу регулирования размера платежей в зависимости от степени отклонения КэГ от установленных норм. При определении формулы регулирования размера платежей, вся шкала КэГ разбивается на четыре диапазона, как показано на рисунке 1.7 [97].

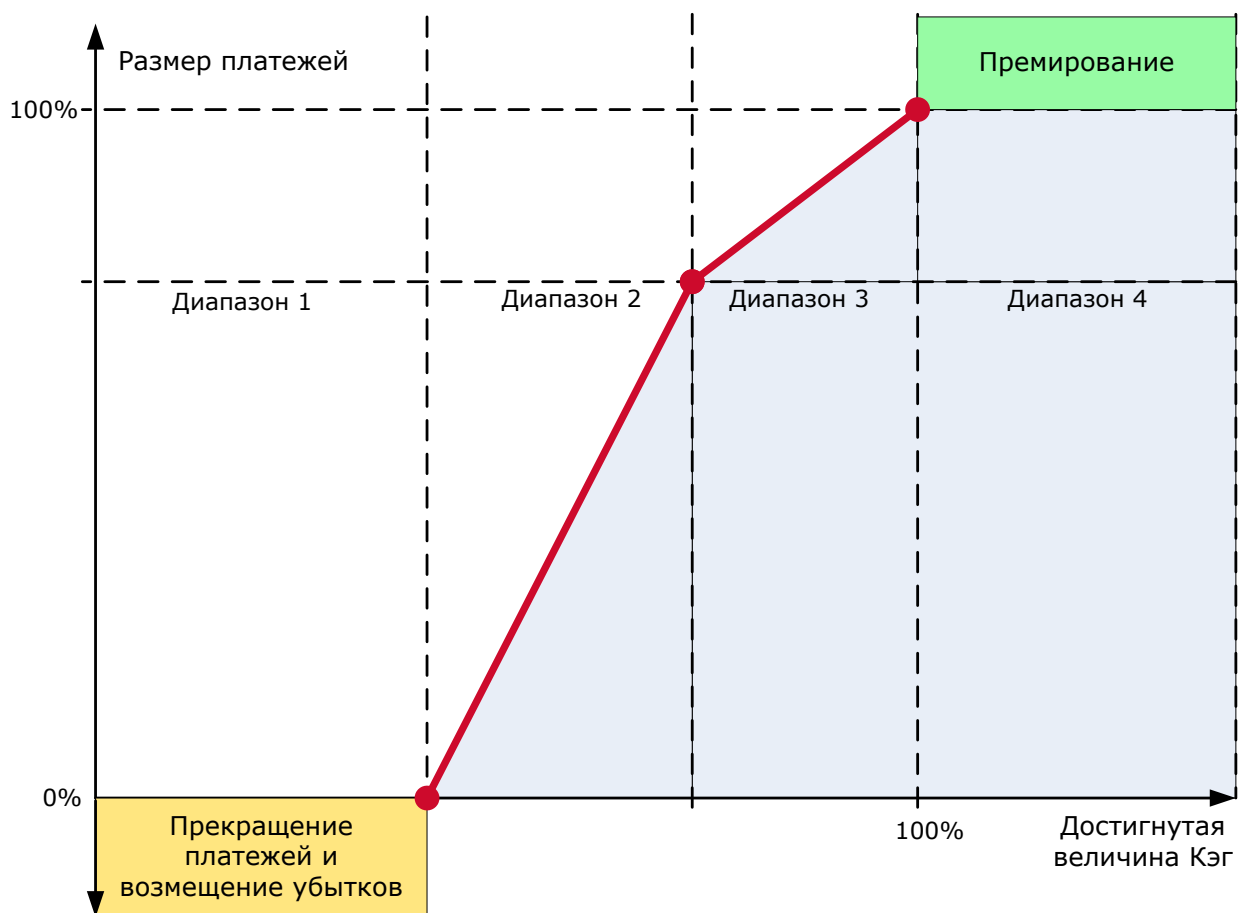


Рисунок 1.7. Зависимость размера оплаты от достигнутой величины коэффициента эксплуатационной готовности

Диапазон 4: Перевыполнение норм. Если достигнутый КэГ превышает установленные контрактом нормы, то осуществляется премирование Оператора ТОиР.

Диапазон 3: Незначительные отклонения от нормы. При незначительных отклонениях КэГ от установленных контрактом норм в худшую сторону (например – достигнутое значение КэГ находится в диапазоне от 80% до 100%), реализуется прямо пропорциональная зависимость размера платежа от значения КэГ. 100% соответствие КэГ норме будет означать 100% выплату от оговоренного размера платежа.

Диапазон 2: Значительные отклонения от нормы. В случае значительных отклонений КэГ от установленных контрактом норм в худшую сторону (например – достигнутое значение КэГ составляет от 80% до 50% нормы), когда общий результат оказания услуг по ТОиР приемлем для эксплуатанта в краткосрочной перспективе, размер платежа находится в более жесткой зависимости от КэГ, чем в случае с незначительными отклонениями.

Диапазон 1: Крайне неудовлетворительные результаты. При существенных отклонениях КэГ от установленных норм в худшую сторону (например – достигнутое значение КэГ ниже 50% нормы), результаты оказания услуг по ТОиР могут расцениваться, как крайне неудовлетворительные. В этом случае эксплуатант может принять решение о прекращении платежей, а также разорвать контрактные отношения с Оператором ТОиР в одностороннем порядке и инициировать процедуру возмещения понесенных убытков.

К основным ПКР, в отношении которых в контрактах жизненного цикла вводятся условия, относятся [98]:

- Коэффициент эксплуатационной готовности (Operational Availability);
- Средний налет на отказ и повреждение (Operational Reliability);
- Стоимость эксплуатации одного ВС (Cost per Unit Usage);
- Размер инфраструктуры, создаваемой Оператором ТОиР (Logistics Footprint);
- Время удовлетворения заявок на обслуживание (Logistics Response Time).

Нетрудно увидеть, что показатель «Средний налет на отказ и повреждение» является характеристикой конструкции ВС и не зависит от Оператора ТООР, показатель «Время удовлетворения заявок на обслуживание» характеризует исключительно административные задержки, возникающие при выполнении заявок Заказчика на работы, а показатель «Стоимость эксплуатации одного ВС» является предметом переговоров Заказчика и Оператора ТООР. Таким образом, к непосредственно техническим показателям, зависящим от принятых решений в отношении системы МТО являются показатели «Коэффициент эксплуатационной готовности» и «Размер инфраструктуры, создаваемой Оператором ТООР».

Результаты отечественных и зарубежных исследований [29,94,99] показывают, что для достаточно сложных изделий АТ наиболее приемлемым как для эксплуатанта, так и для промышленности, является подход *PBL*. Для отечественной АТ в настоящее время также осуществляется переход на обеспечение технической эксплуатации с использованием контрактов жизненного цикла. С одной стороны, такие требования выставляет все больше зарубежных заказчиков продукции военного назначения [5,29,50]. С другой стороны, в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28 ноября 2013г. предусматривается переход к контрактам жизненного цикла при всех закупках отечественной авиационной техники.

Таким образом, нормативно-правовые условия для эффективной организации послепродажного обслуживания с применением контрактов жизненного цикла в настоящий момент созданы. При этом ключевой проблемой для авиационной промышленности, возникающей при переходе к контрактам жизненного цикла, является оценка себестоимости работ по обеспечению технической эксплуатации при достижении заданных заказчиком условий контракта жизненного цикла.

Действительно, для отечественной промышленности вопросы обеспечения ТЭ являются новой задачей, в рамках которой она, как правило, должна собственными силами создать дополнительный элемент – региональный сервисный центр -, являющийся 3-м уровнем в многоуровневой системе ТЭ, под требования контракта жизненного цикла, как показано на рисунке 1.8. До

перехода к контрактам жизненного цикла роль такого элемента на территории РФ выполняли авиаремонтные заводы Минобороны (для военной АТ), а для гражданской АТ и при поставках АТ на экспорт этот уровень отсутствовал.

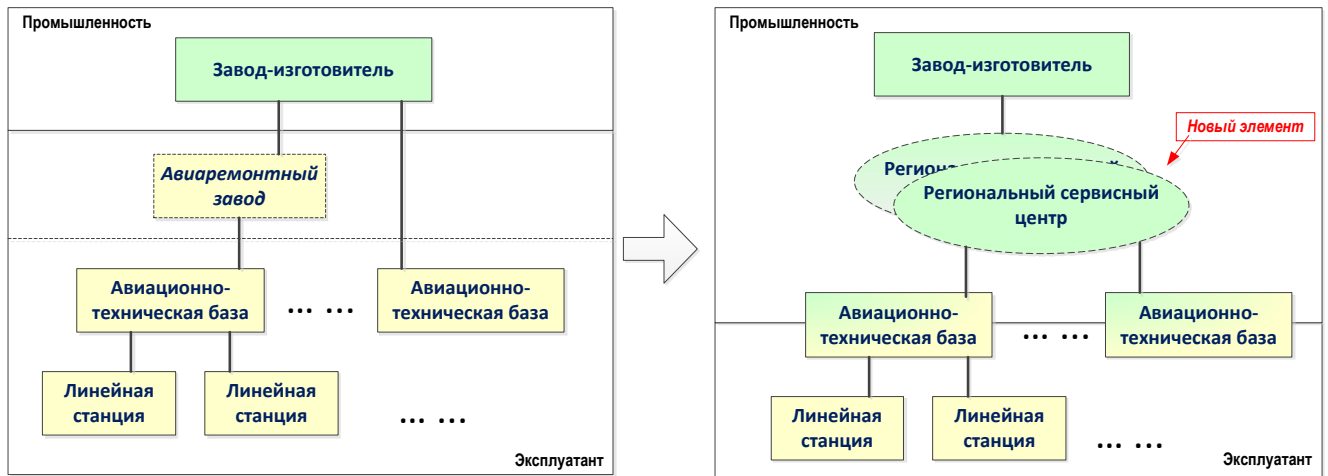


Рисунок 1.8. Переход к обеспечению технической эксплуатации предприятиями промышленности на основе контрактов жизненного цикла

Одним из условий для оценки себестоимости работ по контракту жизненного цикла является детальная проработка всех составляющих этой себестоимости (статей затрат) в части развертывания региональных сервисных центров, к которым относятся затраты на инфраструктуру, средства обслуживания, ремонт, запасные части, расходные материалы и т.п. То есть затраты на формирование системы МТО для обеспечения технической эксплуатации парка изделий АТ. Таким образом, выбор наилучших структуры и параметров системы МТО оказывают ключевое влияние на себестоимость работ по контракту жизненного цикла.

Основным условием, необходимым для решения задачи синтеза системы МТО, является наличие исходных данных (в форме базы данных АЛП), а также методик и алгоритмов синтеза. Также необходимо отметить, что в связи с развитием встроенных бортовых систем диагностики и контроля воздушных судов, а также инструментальных средств обеспечения технической эксплуатации, в настоящее время значительно повысилась достоверность исходных данных, что привело к появлению новых возможностей по синтезу

систем МТО. Так, например, встроенные системы контроля (ВСК) современных ВС позволяют точно учитывать наработку ВС и его СЧ, а также идентифицировать отказавшие СЧ. Это, в свою очередь, позволяет на основе электронных эксплуатационных дел воздушного судна (в которые поступает информация от встроенных систем контроля), рассчитывать показатели безотказности СЧ. Применение интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) в процессах технической эксплуатации позволяют фиксировать действия инженерно-технического персонала и, таким образом, объективно оценить параметры эксплуатационной и ремонтной технологичности ВС и его СЧ, которые также используются в ходе синтеза систем МТО.

1.3.3 Постановка задачи синтеза многоуровневой системы материально-технического обеспечения

Как показано в разделе 1.3.2, развитие технологий анализа логистической поддержки, информационной поддержки эксплуатации и встроенных систем контроля ВС позволяет по-новому поставить и решить задачу синтеза многоуровневой системы МТО с использованием вновь разработанных методов и алгоритмов. Задача синтеза системы МТО, как описано в разделе 1.1, относится к 303 группе задач интегрированной логистической поддержки в соответствии с приведенной в [79,87,95] классификацией.

В соответствии с допущениями, сделанными в разделе 1.1, задача синтеза многоуровневой системы МТО включает в себя:

- определение состава пунктов по ремонту СЧ ВС в сервисных центрах;
- определение количества ремонтных ячеек в пунктах по ремонту СЧ ВС;
- определение объемов запасов средств МТО в каждом объекте ТОиР.

Входные и выходные данные этой задачи, в соответствии с представленной в разделе 1.2.4 классификацией, и источники этих данных представлены в таблице 1.3:

Таблица 1.3. Входные и выходные данные задачи синтеза системы МТО

| Входные данные | | | Выходные данные | |
|----------------|--|-----------------|-----------------|--|
| Группа данных | Описание данных | Источник данных | Группа данных | Описание данных |
| Х | Состав ВС и характеристики его СЧ | АЛП, ВСК | Ф | Данные о составе пунктов по ремонту СЧ ВС и количестве ремонтных ячеек |
| А | Сценарии эксплуатации парка ВС | АЛП | Н | Данные об объемах запасов средств МТО в каждом объекте ТОиР |
| С | Данные о регламенте и технологии обслуживания ВС | АЛП, ИЭТР | | |
| Е | Данные о вспомогательном оборудовании | АЛП | | |
| Г | Данные о количестве и квалификации обслуживающего персонала | АЛП | | |
| J | Данные о способах и стоимости транспортировки запасных частей и материалов | АЛП | | |

Как указано в таблице 1.3, в качестве исходных данных выступают результаты анализа логистической поддержки (в части данных о составе изделия, регламенте и технологии обслуживания, оборудовании, персонале и транспортировке), результаты применения ИЭТР (в части показателей эксплуатационной технологичности), и обобщенные данные об эксплуатации, получаемые с использованием систем встроенного контроля (в части показателей безотказности СЧ ВС).

Выходные данные зависят от результатов решения задачи, в зарубежной практике называемой «анализ уровней ремонта» [84], а в отечественных

нормативных документах – анализ уровней ТОиР [14]. Сутью данной задачи является распределение работ по ТОиР СЧ ВС между ранее упомянутыми 4-мя уровнями обслуживания, а именно:

- определяются СЧ ВС подлежащие обслуживанию и ремонту;
- для каждой такой СЧ ВС в процессе АЛП определяются виды работ по ТОиР;
- определяется, какие материальные и трудовые ресурсы, необходимы для выполнения каждой работы по ТОиР;
- определяется, на каком уровне экономически наиболее целесообразно выполнять ту или иную работу по ТОиР.

Взаимосвязь СЧ ВС, работ по ТОиР и необходимых для их выполнения ресурсов представлена на рисунке 1.9.

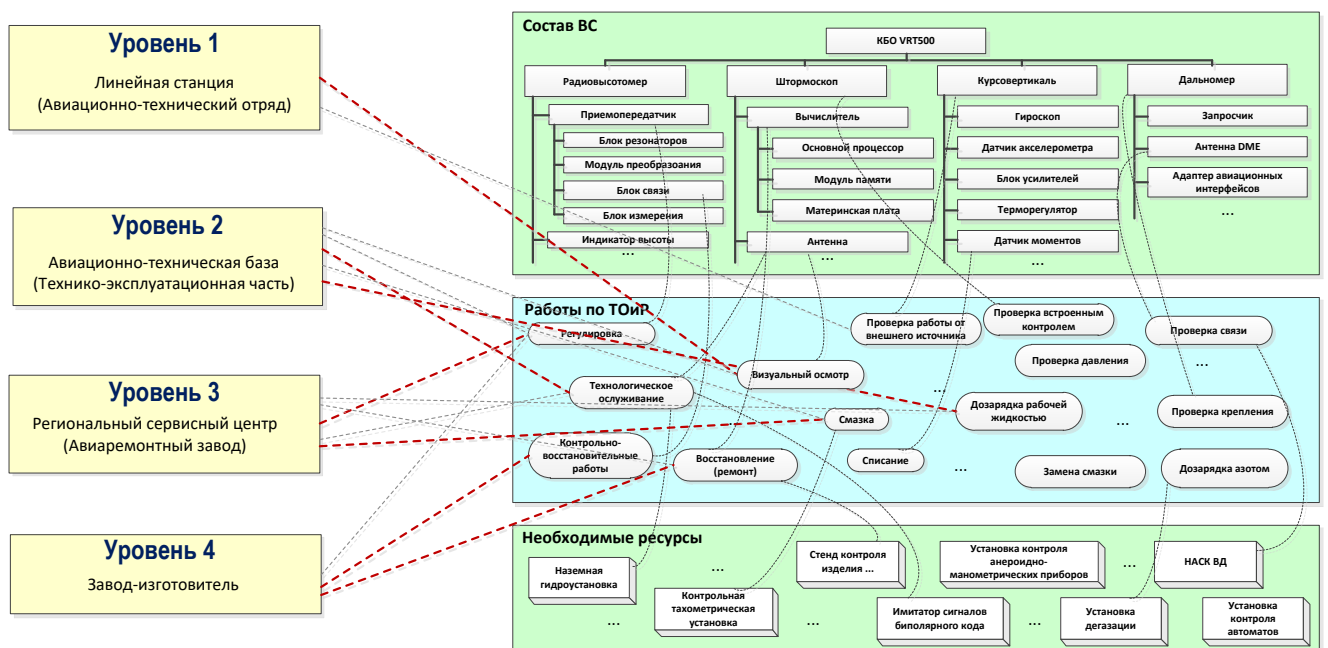


Рисунок 1.9. Распределение работ по ТОиР по уровням

При решении задачи синтеза многоуровневой системы МТО интерес представляют работы по ремонту СЧ ВС, которые могут выполняться как в региональном сервисном центре, так и на заводе-изготовителе. Распределение работ по ремонту между этими уровнями, в итоге, и определяет рациональный баланс между использованием сервисного центра исключительно как промежуточного склада и развертыванием в нем пунктов по ремонту СЧ ВС, что,

в свою очередь, определяет состав пунктов по ремонту, количество ремонтных ячеек и объемы запасов запчастей на каждом уровне.

Введем вектор двоичных переменных $\bar{\gamma}$, компоненты которого определяют, на каком уровне выполняются работы по ремонту каждой ремонтпригодной СЧ ВС, как показано на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10. Вектор распределения работ по ремонту СЧ ВС по уровням

Учитывая, что задача синтеза многоуровневой системы МТО нацелена на минимизацию затрат на стадии эксплуатации изделий АТ при достижении требований к коэффициенту эксплуатационной готовности и затратам на создание инфраструктуры (определяемыми условиями контракта жизненного цикла), в общем виде эта задача синтеза может быть записана как оптимизационная:

$$\begin{aligned}
 f_c(\bar{\gamma}, X) &\rightarrow \min \\
 K_{\text{ЭГ}}(\bar{\gamma}, X) &\geq \varphi \\
 I_{\text{инф}}(\bar{\gamma}, X) &< \mu
 \end{aligned}
 \tag{1.21}$$

где

$f_c(\bar{\gamma}, X)$ – функция суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации, определяемая математической моделью системы МТО;

$\bar{\gamma}$ – вектор распределения работ по ремонту СЧ ВС по уровням;

X – множество дополнительных параметров системы МТО;

$K_{\text{ЭГ}}(\bar{\gamma}, X)$ – функция расчета коэффициента эксплуатационной готовности;

φ – определенный условиями контракта жизненного цикла коэффициент эксплуатационной готовности;

$I_{\text{инф}}(\bar{\gamma}, X) \geq$ – функция расчета затрат на инфраструктуру;

μ – определенный условиями контракта жизненного цикла предельный уровень затрат на инфраструктуру.

Коэффициент эксплуатационной готовности в соответствии с определением [18] - «вероятность того, что в произвольный момент времени в реальных условиях эксплуатации образец будет работоспособен и в состоянии выполнить задачи хотя бы по одному из типовых циклов применения по назначению».

В соответствии с [18] коэффициент эксплуатационной готовности можно представить в виде произведения двух показателей:

$$K_{ЭГ} = K_{пп} K_{Г} , \quad (1.22)$$

где

$K_{пп}$ – коэффициент планируемого применения, отражающий долю времени, в течение которого изделие находится на плановом ТО;

$K_{Г}$ – коэффициент готовности изделия.

В свою очередь, коэффициент готовности в соответствии с [13] также может быть представлен в виде произведения двух показателей:

$$K_{Г} = K_{Г_{\infty}} K_{Г_{зип}} , \quad (1.23)$$

где

$K_{Г_{\infty}}$ – коэффициент готовности изделия при бесконечном ЗИП, характеризующий простои изделия связанные непосредственно с работами по устранению неисправностей, без учета простоев, связанных с ожиданием запасных частей;

$K_{Г_{зип}}$ – коэффициент готовности ЗИП, отражающий простои изделия, связанные с отсутствием запасных частей.

В данной работе вместо определенного в [13] обозначения $K_{Г_{зип}}$ будем применять обозначение $K_{Г_{МТО}}$, так как термин «материально-техническое обеспечение» более точно отражает процессы снабжения и ремонта СЧ ВС в многоуровневой системе МТО.

Таким образом, подставив (1.23) в (1.22), выражение для коэффициента эксплуатационной готовности можно записать в виде:

$$K_{ЭГ} = K_{пп} K_{Г_{\infty}} K_{Г_{МТО}} \quad (1.24)$$

Учитывая, что величины $K_{пп}$ зависят исключительно от состава, периодичности и продолжительности выполнения регламентных работ, а величина $K_{Г\infty}$ характеризует «собственную» готовность изделия и зависит только от безотказности и продолжительности устранения неисправностей, задачу (1.21) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} f_c(\bar{\gamma}, X) &\rightarrow \min \\ K_{Г_{МТО}}(\bar{\gamma}, X) &\geq \varphi \\ I_{инф}(\bar{\gamma}, X) &< \mu \end{aligned} \quad (1.25)$$

где $K_{Г_{МТО}}(\bar{\gamma}, X)$ - функция расчета коэффициента готовности системы МТО, зависящая от принятых решений по уровням ремонта СЧ ВС.

Необходимо отметить, что структура затрат на обеспечение технической эксплуатации изделий АТ, составляющих целевую функцию в данной задаче, в настоящее время должным образом не исследована. Как показывает проведенный в разделе 1.2 анализ существующих методов и алгоритмов, для решения данной оптимизационной задачи необходимо применение достаточно сложных методов комбинаторной (для выбора оптимального уровня ремонта СЧ ВС) и дискретной (для выбора оптимальных объемов начального запаса СЧ в сервисных центрах) оптимизации с использованием большого количества исходных параметров, хранимых, как правило, в базе данных АЛП.

Таким образом, для решения задачи синтеза многоуровневой системы МТО необходимо:

- определить в рамках модели многоуровневой системы МТО перечень статей затрат на обеспечение технической эксплуатации изделий АТ, а также методику их оценки и необходимые исходные данные;
- дополнить информационную модель базы данных АЛП сущностями и атрибутами для хранения исходных данных;
- разработать алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы МТО, то есть выбора оптимальных объемов запасов средств МТО на каждом уровне (в каждом сервисном центре);

- разработать алгоритм совместной оптимизации параметров системы МТО и производственных мощностей сервисных центров на основе выбора оптимальных уровней ремонта для каждой СЧ ВС;
- разработать программный комплекс, реализующий разработанные информационную модель, методы и алгоритмы, для выполнения практических расчетов.

1.4 Выводы

Выполненные в данной главе анализ и разработки позволяют сформулировать следующие выводы и определить направления дальнейшего исследования:

1) С увеличением сложности АТ, для эксплуатирующих организаций (особенно зарубежных) становится предпочтительной передача работ по ТОиР приобретаемой АТ предприятиям промышленности на основе контрактов жизненного цикла (PBL-контрактов). В связи с этим критической становится задача формирования для заданного парка ВС в заданном регионе эксплуатации эффективной системы МТО, включающей в себя сервисные центры, склады запасных частей персонал, необходимые для выполнения работ по ТОиР с обеспечением заданной в контракте величины коэффициента эксплуатационной готовности.

2) Ключевыми технологиями, нацеленными на формирование эффективной системы МТО, являются технологии интегрированной логистической поддержки. К технологиям ИЛП относят достаточно проработанные в отечественных научных исследованиях технологии анализа логистической поддержки, разработки эксплуатационной и ремонтной документации, мониторинга процессов эксплуатации. Результаты решения задач ИЛП накапливаются в базе данных АЛП – построенном на основе стандартизированной информационной

модели хранилище данных об изделии и процессах его технической эксплуатации - на основе которой решаются задачи синтеза системы МТО.

3) Несмотря на наличие проработанных методик и инструментальных средств для решения задач интегрированной логистической поддержки, вопросы синтеза многоуровневой системы МТО под требования контрактов жизненного цикла в настоящее время недостаточно исследованы: существующие методики расчета и анализа прямых затрат не позволяют оценить суммарные затраты на обеспечение ТЭ парка ВС в заданном регионе, а существующие информационные модели базы данных АЛП не предусматривают сущностей и атрибутов, необходимых для описания структуры и параметров системы МТО – сервисных центров, их производственно-технологических мощностей, логистических потоков и параметров снабжения. Кроме этого, имеющиеся методики ориентированы сложившуюся и описанную в нормативных документах структуру ремонтных органов, при этом возможности более рационального распределения работ по ремонту комплектующих изделий по различным уровням ремонта (в особенности у зарубежных эксплуатантов) не учитываются.

4) Развитие технологий анализа логистической поддержки, информационной поддержки эксплуатации с использованием ИЭТР, а также развитие встроенных в ВС систем контроля, позволяют по-новому поставить и решить задачу синтеза многоуровневой системы МТО, обеспечивающей требуемые значения показателей эксплуатационной готовности при минимизации затрат на обеспечение технической эксплуатации. Эта задача может быть решена комплексно – включая разработку математической модели системы МТО и связанной с ней методики расчета суммарных затрат на ТЭ парка ВС в заданном регионе эксплуатации, разработку информационной модели для описания региональной системы МТО в базе данных АЛП и разработку алгоритмов совместной оптимизации (по критерию минимизации суммарных затрат) производственных мощностей сервисных центров и параметров материально-технического обеспечения.

2 МОДЕЛЬ, МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО- ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

2.1 Модель описания многоуровневой системы материально- технического обеспечения эксплуатации

В общем виде математическая модель системы представляется с помощью соотношения [60]:

$$\begin{aligned} w &= F(u, v) \\ u &\in U \end{aligned} \quad (2.1)$$

где

w – показатель эффективности системы (может быть скалярным или векторным);

F – оператор модели (математические соотношения при помощи которых вычисляется показатель w);

u – альтернатива построения системы из множества альтернатив U ;

v – факторы окружающей среды, значимо влияющие на показатель эффективности.

Модель многоуровневой системы МТО, с учетом положений [60], можно определить в общем виде при помощи следующего соотношения:

$$c = f_c(\bar{y}, X) = \sum_{i=1}^M C_i(\bar{y}, X), \quad (2.2)$$

где

c – суммарные затраты на обеспечение технической эксплуатации (показатель эффективности системы МТО);

M – количество учитываемых статей затрат;

C_i – функция расчета i -й статьи затрат;

\bar{y} – вектор распределения составных частей ВС по уровням ТОиР (альтернатива);

X – постоянные параметры сценария эксплуатации, характеристики ВС и его СЧ, работ по ТОиР, необходимых ресурсов, играющие в модели роль факторов окружающей среды.

В соответствии с определением [12], затраты на обеспечение технической эксплуатации включают в себя затраты, непосредственно связанные с процессами ТОиР, а также затраты на хранение и транспортирование изделий. Эти затраты могут возникать однократно, как, например, затраты на создание сервисных центров, или на регулярной основе, как, например, затраты на выполнение планового технического обслуживания ВС в течение его срока службы. Кроме этого, затраты на обеспечение технической эксплуатации включают в себя затраты на оплату труда, затраты на приобретение средств обслуживания и ремонта, запасных частей и т.п.

Состав статей затрат при их оценке инженерным методом [17,108] можно определить, проанализировав положения зарубежных нормативных документов [17,84,96,108,110] и Приказ Минпромторга России от 08.02.2019 №334. Путем такого анализа можно выявить 13 ($M = 13$ в формуле (2.2)) статей затрат (C_i в формуле (2.2)), перечисленных в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Перечень статей затрат на обеспечение технической эксплуатации

| Обозначение в модели | Обозначение | Наименование статьи затрат |
|-------------------------|---------------------|---|
| C_1 | $I_{\text{инф}}$ | Затраты на создание инфраструктуры системы технической эксплуатации |
| C_2 | $I_{\text{СТО}}$ | Затраты на средства технического обслуживания |
| C_3 | $I_{\text{ЗЧ}}$ | Затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей |
| C_4 | $C_{\text{ПТО.тр}}$ | Затраты на оплату труда при проведении |

| Обозначение в модели | Обозначение | Наименование статьи затрат |
|-------------------------|----------------------|---|
| | | планового ТО |
| C_5 | $C_{\text{ПТО.зчм}}$ | Затраты на запасные части и расходные материалы, используемые при проведении планового ТО |
| C_6 | $C_{\text{ВР.тр}}$ | Затраты на оплату труда при восстановлении ресурса |
| C_7 | $C_{\text{ВР.зчм}}$ | Затраты на запасные части и расходные материалы, используемые при восстановлении ресурса |
| C_8 | $C_{\text{НТО.тр}}$ | Затраты на оплату труда при проведении непланового ТО |
| C_9 | $C_{\text{НТО.зчм}}$ | Затраты на запасные части и расходные материалы, используемые при проведении непланового ТО |
| C_{10} | $K_{\text{ИНФ}}$ | Затраты на поддержание инфраструктуры системы ТЭ |
| C_{11} | $K_{\text{СТО}}$ | Затраты на поддержание средств ТО |
| C_{12} | $K_{\text{Трзч}}$ | Затраты на транспортировку запасных частей |
| C_{13} | $K_{\text{Хрзч}}$ | Затраты на хранение запасных частей |

Классификация указанных статей затрат приведена в разделе 2.2.

Для расчета приведенных в таблице 2.1 статей затрат используются следующие параметры, входящие в множество X :

1) Данные о ВС:

- количество и параметры составных частей в структуре ВС ($N_{\text{сч}}$);
- срок службы ВС ($T_{\text{с.с}}$).

2) Данные о сценариях эксплуатации ВС:

- средняя наработка 1-го ВС в год, выраженная в летных часах ($\tau_{\text{год}}$);
 - количество ВС в эксплуатируемом парке ($N_{\text{ВС}}$);
 - количество и размещение сервисных центров, создаваемых для обеспечения технической эксплуатации парка ВС ($N_{\text{СЦ}}$);
 - стоимость нормо-часа выполнения работ ($C_{\text{ч.ч}}$).
- 3) Данные о составных частях ВС:
- количество СЧ каждого типа в составе ВС (n_i);
 - стоимость одной запасной части каждого типа ($C_{\text{СЧ}_i}$);
 - доля стоимости капитального ремонта СЧ от ее цены, если капитальный ремонт предусмотрен ($\rho_{\text{К}_i}$);
 - интенсивность отказов СЧ каждого типа в составе ВС (λ_i);
 - доля стоимости ремонта СЧ от ее цены (ρ_i);
 - масса СЧ (в килограммах) (M_i);
 - средняя масса компонентов, необходимых для ремонта СЧ в региональном сервисном центре (в килограммах) (m_i);
 - метод технической эксплуатации СЧ ВС – по ресурсу, до предотказного состояния или до отказа (E_i);
 - назначенный (межремонтный, до 1-го ремонта) ресурс СЧ ВС ($W_{\text{РЕС } i}$);
 - трудоемкость замены СЧ ВС ($M_{\text{ЗАМ}_i}$);
 - количество типов расходных материалов, используемых при замене СЧ ВС ($N_{\text{ЗАМ.РМ}_i}$);
 - количество единиц расходного материала определенного типа, используемого при замене СЧ ВС ($q_{\text{ЗАМ.РМ}_{ij}}$);
 - средняя годовая стоимость хранения одной запасной части ($C_{\text{ХР}_i}$);
 - модель восстановления СЧ – ремонт в сервисном центре на 3-м уровне или ремонт на заводе-изготовителе (γ_i).
- 4) Данные о плановом ТО ВС:
- количество видов планового ТО ($N_{\text{ПТО}}$);
 - периодичность выполнения определенного вида планового ТО ($W_{\text{ПТО } i}$);

- трудоемкость выполнения вида планового ТО ($M_{\text{ПТО}_i}$);
- количество типов расходных материалов, используемых при выполнении вида планового ТО ($N_{\text{ПТО.РМ}_i}$);
- количество единиц расходного материала j -го типа, используемого при выполнении вида планового ТО ($q_{\text{ПТО.РМ}_{ij}}$);
- количество типов запасных частей, расходуемых при выполнении вида планового ТО ($N_{\text{ПТО.ЗЧ}_i}$);
- количество запасных частей j -го типа, используемого при выполнении вида планового ТО ($q_{\text{ПТО.ЗЧ}_{ij}}$).

5) Данные о средствах ТО:

- количество типов средств ТО, необходимых для технического обслуживания ВС ($N_{\text{СТО}}$);
- стоимость единицы определенного типа средства ТО ($C_{\text{СТО}_i}$);
- количество единиц определенного типа средств ТО, необходимых для технического обслуживания парка, состоящего из $N_{\text{ВС}}$ ВС ($q_{\text{СТО}_i}(N_{\text{ВС}})$);
- доля суммарных годовых затрат на поддержание определенного типа средств технического обслуживания ($\rho_{\text{СТО}_i}$).

6) Данные о расходных материалах:

- стоимость единицы расходного материала определенного типа ($C_{\text{ПТО.РМ}_j}$).

7) Общие данные о сервисных центрах:

- постоянная величина затрат на создание определенного сервисного центра ($I_{\text{СЦ.пост}_i}$);
- доля суммарных годовых затрат на поддержание сервисного центра от затрат на его создание ($\rho_{\text{ИНФ}_i}$);
- количество запасных частей j -го типа, приобретаемых для определенного сервисного центра ($q_{\text{СЧ}_{ij}}$);
- среднее количество хранимых запасных частей j -го типа в определенном сервисном центре ($q_{\text{ХР}_{ij}}$).

8) Данные о сервисных центрах 3-го уровня:

- множество составных частей ВС, для которых в сервисном центре развернуты пункты по ремонту (Q_i);

- стоимость создания в сервисном центре пункта по ремонту j -го типа СЧ ВС ($I_{\text{ПР } j}$);

- стоимость тонно-километра транспортировки грузов между уровнями 3 и 4 для определенного сервисного центра ($R_{3 \rightarrow 4 i}$);

- расстояние между уровнями 3 и 4 для i -го сервисного центра (в километрах) ($L_{3 \rightarrow 4 i}$).

9) Данные о сервисных центрах 2-го уровня:

- количество ВС, обслуживаемых в определенном сервисном центре 2-го уровня ($n_{\text{ВС } i}$);

- расстояние между уровнями 2 и 3 для определенного сервисного центра (в километрах) ($L_{2 \rightarrow 3 i}$);

- стоимость тонно-километра транспортировки грузов между уровнями 2 и 3 для определенного сервисного центра ($R_{2 \rightarrow 3 i}$).

С учетом введенных статей затрат и параметров модели, поставленную в главе 1 задачу синтеза многоуровневой системы МТО можно записать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{13} C_i(\bar{y}, X) \rightarrow \min \tag{2.3}$$

$$K_{\Gamma_{\text{МТО}}}(\bar{y}, X) \geq \varphi$$

$$I_{\text{инф}}(\bar{y}, X) < \mu$$

Аналитические зависимости для каждой статьи затрат C_i , указанной в таблице 2.1, приведены в методике, описанной в разделе 2.2.

2.2 Методика расчета суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации

Для оценки суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации инженерным методом [17,108] их следует классифицировать, структурировать по статьям затрат и для каждой из статей сформировать методику расчета. Структурирование затрат на обеспечение ТЭ по статьям используется, как правило, при обосновании цен контрактов жизненного цикла.

В различных зарубежных документах предлагаются несколько систем классификации затрат на обеспечение ТЭ:

В [84] предлагается подразделять все затраты на единовременные (non-recurring costs) и периодические (recurring costs). К первой группе относятся затраты на создание инфраструктуры, приобретение запасов имущества (запасных частей, расходных материалов) и средств технического обслуживания и ремонта. Ко второй группе относятся затраты, возникающие на регулярной основе в процессе ТОиР изделия.

Дополнительно, в [96] предлагается подразделять периодические затраты на затраты на труд (labor costs) и материальные затраты (materials costs). Под затратами на труд понимается фактическая трудоемкость выполнения ТОиР (manpower), умноженная на нормированную ставку стоимости человеко-часа работы специалиста определенной специальности и квалификации. К материальным затратам относят непосредственно стоимость запасных частей и материалов. Также, в [96] предлагается отдельно выделять затраты на выполнение ремонтов составных частей изделия на заводах-изготовителях и/или в специализированных ремонтных организациях (Depot Repair).

В [110] затраты классифицируют на прямые по отношению к ТОиР как виду деятельности (Direct Maintenance Cost), и косвенные (Indirect Maintenance Cost). Под прямыми затратами в [110] понимаются затраты, непосредственно связанные с процессами ТОиР (затраты на труд, материалы и т.п.), а косвенные затраты

относятся к вспомогательным видам деятельности (хранение запасных частей, их транспортировка и т.п.).

Также, в [110] затраты относят отдельно на работы планового ТОиР, выполняемые с заданной периодичностью (при заданных условиях) в соответствии с требованиями эксплуатационной документации, а также на работы непланового ТОиР, связанные с устранением случайно возникающих отказов и повреждений. При этом в [84] работы планового ТОиР дополнительно подразделяются на работы, выполняемые в соответствии с регламентом технического обслуживания, и на работы по восстановлению ресурса составных частей ВС – замене СЧ, выработавших свой назначенный ресурс.

Таким образом, все затраты на обеспечение ТЭ ВС можно классифицировать:

- 1) по времени возникновения: единовременные и периодические;
- 2) по характеру: затраты на труд, затраты на материалы, затраты на ремонт СЧ во внешних организациях;
- 3) по видам деятельности: прямые (по отношению к ТОиР как виду деятельности) и косвенные;
- 4) по прогнозируемости возникновения: неплановые и плановые (в т.ч. регламентные работы и восстановление ресурса).

Анализ требований зарубежных заказчиков, отечественных нормативно-правовых документов, научных работ и зарубежных стандартов позволяет сформировать общую структуру суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации АТ. Разработанная структура затрат приведена на рисунке 2.1.

Суммарные затраты на обеспечение технической эксплуатации

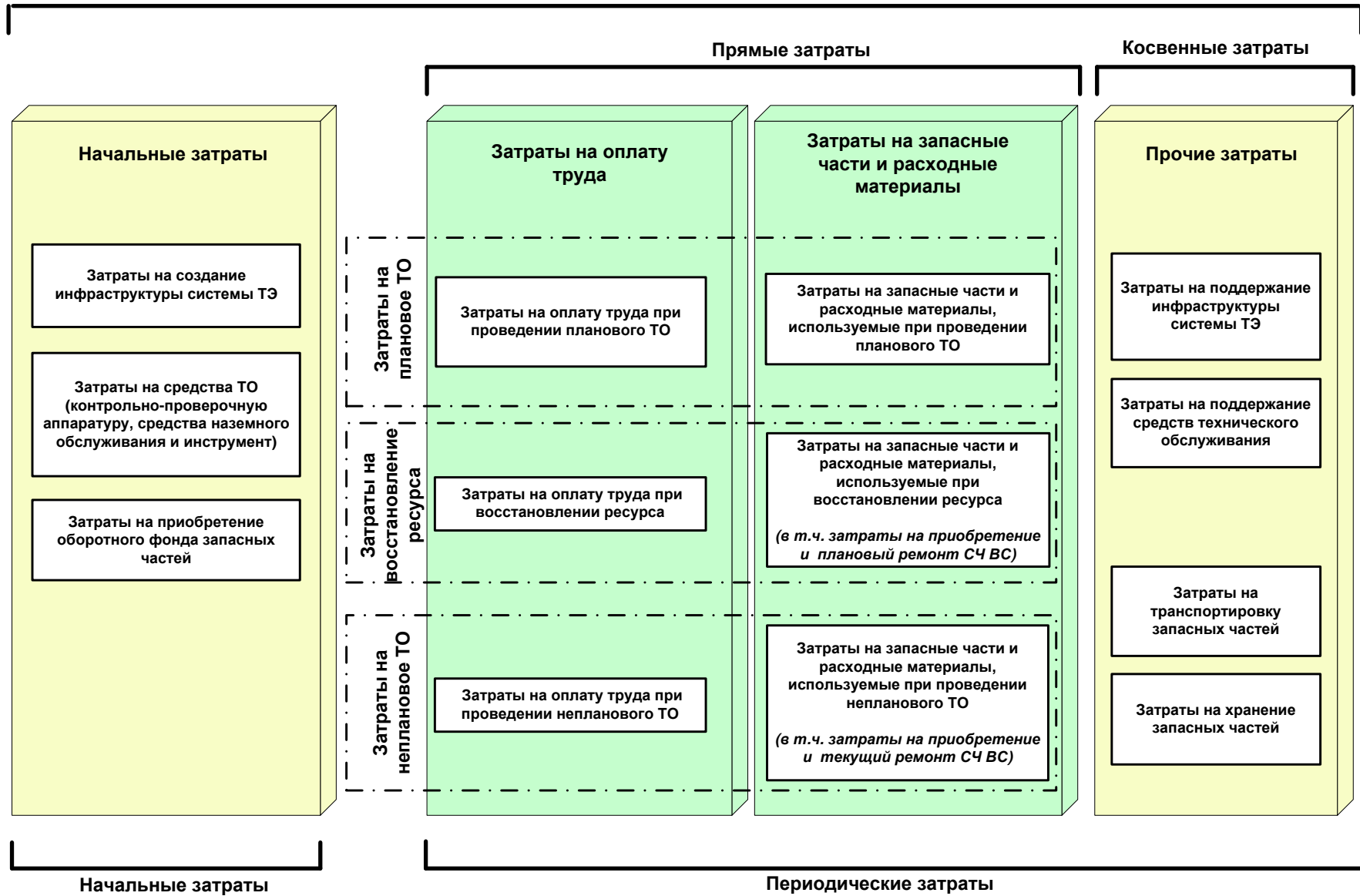


Рисунок 2.1. Структура суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации АТ

Суммарные затраты подразделяются на начальные и периодические. К начальным затратам относятся:

- затраты на создание инфраструктуры системы технической эксплуатации;
- затраты на средства технического обслуживания;
- затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей.

Затраты на создание инфраструктуры включают в себя затраты на постройку (оснащение и дооснащение) зданий, сооружений и стационарных технических устройств, необходимых для выполнения работ по ТО ВС и его отдельных составных частей.

Затраты на средства технического обслуживания включают в себя затраты на инструмент, контрольно-проверочную аппаратуру (средства наземного контроля) и инструмент, необходимые для выполнения работ по ТО ВС и его отдельных составных частей.

Затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей включают в себя затраты на закупку и транспортировку до места хранения комплектов запасных частей.

Начальные затраты возникают один раз при развертывании системы ТЭ для приобретенной или передислоцируемой АТ.

Периодические затраты, в свою очередь, подразделяются на прямые и косвенные. Прямые затраты включают в себя:

- затраты на плановое ТО;
- затраты на восстановление ресурса СЧ;
- затраты на неплановое ТО.

Затраты на плановое ТО включают в себя затраты на оплату труда и на материальные ресурсы (запасные части и расходные материалы), возникающие при проведении работ планового ТО, описанных в регламенте технического обслуживания ВС.

Затраты на неплановое ТО также включают в себя затраты на оплату труда и на материальные ресурсы (запасные части и расходные материалы), возникающие при проведении работ непланового ТО, связанных с отысканием и

устранением случайно возникающих отказов СЧ ВС. Эта статья затрат включает в себя также затраты на проведение ремонта отказавших СЧ ВС.

Затраты на восстановление ресурса включают в себя затраты на оплату труда и на материальные ресурсы, связанные с заменой (плановым ремонтом) СЧ в связи с выработкой ими назначенного (межремонтного, до 1-го ремонта) ресурсом. Эта статья затрат включает в себя также затраты на проведение планового ремонта СЧ.

Косвенные затраты на техническое обслуживание и ремонт включают в себя:

- затраты на поддержание инфраструктуры системы ТЭ;
- затраты на поддержание средств ТО;
- затраты на транспортировку запасных частей;
- затраты на хранение запасных частей.

Затраты на поддержание инфраструктуры системы ТЭ включают в себя постоянные затраты на содержание административного персонала, эксплуатационные затраты на здания и сооружения (отопление, электроэнергия и т.п.), затраты на текущее ТОиР и МТО стационарных технических устройств.

Затраты на поддержание средств ТО включают в себя затраты на периодическую поверку средств измерения, приобретение нового инструмента в связи с поломкой или утратой и т.п.

Затраты на транспортировку запасных частей включают в себя затраты на перевозку СЧ ВС от места их производства (ремонта) к месту хранения, а также затраты на упаковку и на погрузку/разгрузку.

Затраты на хранение включают в себя затраты на ТО СЧ ВС при их хранении, затраты на учет имущества в местах хранения и собственно затраты на содержание площадей и поддержание условий для хранения.

Далее приведены методики расчета каждой из статей затрат инженерным методом [17,108], при котором оценка осуществляется на основе фиксированных нормативов стоимости, трудоемкостей выполнения работ и т.п. Такой подход, называемый в зарубежной практике *standard-costing* [28], позволяет с минимальными издержками оценить затраты на ТЭ, т.к. нормативные значения,

используемые при расчетах, определяются в процессе решения задач анализа логистической поддержки на стадии разработки ВС [66] и, как правило, уже известны при планировании ТЭ.

Затраты на создание инфраструктуры системы технической эксплуатации можно представить как сумму затрат на создание сервисных центров по обслуживанию и ремонту ВС и его СЧ:

$$I_{\text{инф}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{сц}}} I_{\text{сц}_i} , \quad (2.4)$$

где

$N_{\text{сц}}$ – количество сервисных центров, создаваемых для обеспечения технической эксплуатации заданного парка ВС;

$I_{\text{сц}_i}$ – стоимость создания i -го сервисного центра.

Для простоты, под сервисными центрами будем понимать также и пункты обслуживания и ремонта ВС в местах их дислокации (авиационно-технические базы). Стоимость создания каждого сервисного центра включает в себя постоянную величину затрат на собственно возведение (дооборудование) сервисного центра (включая затраты на оборудование, необходимое для выполнения обязательных работ планового ТО), а также переменные затраты на оснащение в сервисном центре пунктов по ремонту различных типов СЧ ВС. Обозначим как Q_i множество СЧ ВС, для которых в i -м сервисном центре развернуты пункты по ремонту:

$$Q_i \subset P = \{P_1, P_2, \dots, P_{N_{\text{сч}}}\} , \quad (2.5)$$

где

P – множество всех типов составных частей в составе ВС;

$N_{\text{сч}}$ – количество типов составных частей в составе ВС;

P_j – j -й тип составной части ВС, $j=1.. N_{\text{сч}}$.

Таким образом, затраты на создание i -го сервисного центра можно представить в виде формулы:

$$I_{\text{СЦ}_i}(Q_i) = I_{\text{СЦ,пост}_i} + \sum_{\{j \in \{1, \dots, N_{\text{СЧ}}\} | P_j \in Q_i\}} I_{\text{ПР}_j}, \quad (2.6)$$

где

$I_{\text{СЦ,пост}_i}$ – постоянная величина затрат на создание i -го сервисного центра;

$I_{\text{ПР}_j}$ – стоимость создания в сервисном центре пункта по ремонту j -го типа СЧ ВС, включающая в себя, в том числе, затраты на средства ремонта.

Затраты на приобретение средств ТО могут быть рассчитаны как сумма цен всех единиц оборудования, необходимого для технического обслуживания заданного парка ВС:

$$I_{\text{СТО}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{СТО}}} C_{\text{СТО}_i} \cdot q_{\text{СТО}_i}(N_{\text{ВС}}), \quad (2.7)$$

где

$N_{\text{ВС}}$ – количество ВС в эксплуатируемом парке;

$N_{\text{СТО}}$ – количество типов средств ТО, необходимых для технического обслуживания ВС;

$C_{\text{СТО}_i}$ – стоимость единицы i -го типа средства ТО;

$q_{\text{СТО}_i}(N_{\text{ВС}})$ – количество единиц i -го типа средств ТО, необходимых для технического обслуживания парка, состоящего из $N_{\text{ВС}}$ ВС. Определяется в процессе анализа логистической поддержки [65].

Затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей зависят от принятых стратегий пополнения запасов для каждого типа запасной части, наличия в сервисных центрах пунктов по ремонту СЧ ВС и др. Алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения описан в разделе 2.4. Обозначим как $\overline{A_{\text{СЧ}_i}}$ вектор, компонентами которого являются объемы оборотного фонда для каждого типа запасных частей в i -м сервисном центре:

$$\overline{A_{\text{СЧ}_i}} = (q_{\text{СЧ}_{i1}}, q_{\text{СЧ}_{i2}}, \dots, q_{\text{СЧ}_{iN_{\text{СЧ}}}}), \quad (2.8)$$

где

$q_{счij}$ – количество запасных частей j -го типа, приобретаемых для i -го сервисного центра, $i=1..N_{сц}$, $j=1..N_{сч}$. Необходимо отметить, что количество запасных частей зависит от требований к коэффициенту эксплуатационной готовности парка ВС. Алгоритм оценки величин $q_{счij}$, зависящих от заданных требований к коэффициенту технической готовности, описан в разделе 2.4.

Тогда затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей можно представить в виде:

$$I_{зч} = \sum_{i=1}^{N_{сц}} \sum_{j=1}^{N_{сч}} q_{счij} \cdot (C_{счj} + C_{трзчij}), \quad (2.9)$$

где

$C_{трзчij}$ – затраты на транспортировку одной запасной части j -го типа в i -й сервисный центр, $i=1..N_{сц}$, $j=1..N_{сч}$. Рассчитывается по формуле (2.23);

$C_{счj}$ – стоимость одной запасной части j -го типа, $j=1..N_{сч}$.

Затраты на оплату труда при проведении планового ТО, рассчитываются как произведение количества выполнений каждого вида ТО на нормативную трудоемкость выполнения и на стоимость нормо-часа выполнения работ:

$$C_{пто.тр} = C_{ч.ч} \cdot N_{вс} \sum_{i=1}^{N_{пто}} \left[\frac{T_{с.с} \cdot \tau_{год} - 1}{W_{пто i}} \right] M_{пто i}, \quad (2.10)$$

где

$C_{ч.ч}$ – стоимость нормо-часа выполнения работ;

$N_{пто}$ – количество видов планового ТО, определенных в процессе анализа логистической поддержки [65] и указанных в эксплуатационной документации на ВС;

$T_{с.с}$ – срок службы ВС в годах;

$\tau_{год}$ – средняя наработка 1-го ВС в год, выраженная в летных часах;

$W_{пто i}$ – периодичность выполнения i -го вида планового ТО, выраженная в летных часах;

$M_{\text{ПТО}_i}$ – трудоемкость выполнения i -го вида планового ТО, определенная в процессе анализа логистической поддержки [65] и выраженная в нормо-часах.

Примечания:

- здесь и далее значение в квадратных скобках – целая часть от деления (неполное частное), остаток от деления отбрасывается;

- здесь и далее в формулах представлен расчет затрат на период, равный сроку службы ВС.

Аналогичным образом рассчитываются затраты на запасные части и расходные материалы, используемые при проведении планового ТО. Для их оценки необходимо также рассчитать количество выполнений каждого вида ТО и умножить его на стоимость расходуемых при одном выполнении материалов и запасных частей:

$$C_{\text{ПТО.зчм}} = N_{\text{ВС}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ПТО}}} \left[\frac{T_{\text{с.с}} \cdot \tau_{\text{год}} - 1}{W_{\text{ПТО}_i}} \right] \left(\sum_{j=1}^{N_{\text{ПТО.рм}_i}} C_{\text{ПТО.рм}_{ij}} \cdot q_{\text{ПТО.рм}_{ij}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{ПТО.зч}_i}} C_{\text{ПТО.зч}_{ij}} \cdot q_{\text{ПТО.зч}_{ij}} \right), \quad (2.11)$$

где

$N_{\text{ПТО.рм}_i}$ – количество типов расходных материалов, используемых при выполнении i -го вида планового ТО. Определяется в процессе анализа логистической поддержки [65] на основе данных о технологии обслуживания;

$C_{\text{ПТО.рм}_{ij}}$ – стоимость единицы расходного материала j -го типа, используемого при выполнении i -го вида планового ТО;

$q_{\text{ПТО.рм}_{ij}}$ – количество единиц расходного материала j -го типа, используемого при выполнении i -го вида планового ТО;

$N_{\text{ПТО.зч}_i}$ – количество типов запасных частей, расходуемых при выполнении i -го вида планового ТО. Определяется в процессе анализа логистической поддержки [65] на основе данных о технологии обслуживания;

$C_{\text{ПТО.зч}_{ij}}$ – стоимость запасной части j -го типа, расходуемой при выполнении i -го вида планового ТО;

$q_{\text{ПТО.ЗЧ}ij}$ – количество запасных частей j -го типа, используемого при выполнении i -го вида планового ТО.

Затраты на оплату труда при восстановлении ресурса СЧ рассчитываются как произведение количества замен СЧ в связи с выработкой ими назначенного ресурса на трудоемкость такой замены:

$$C_{\text{ВР.тр}} = C_{\text{ч.ч}} \cdot N_{\text{ВС}} \sum_{\{i \in \{1, \dots, N_{\text{СЧ}}\} | E_i = \text{ТЭР}\}} \left[\frac{T_{\text{с.с}} \cdot \tau_{\text{год}} - 1}{W_{\text{РЕС } i}} \right] M_{\text{ЗАМ } i}, \quad (2.12)$$

где

E_i – метод технической эксплуатации i -й СЧ ВС (эксплуатация до выработки ресурса, эксплуатация до предотказного состояния, эксплуатация до отказа отказа), $E_i \in \{\text{ТЭР}, \text{ТЭП}, \text{ТЭО}\}$;

$W_{\text{РЕС } i}$ – назначенный (межремонтный) ресурс i -й СЧ ВС, после выработки которого СЧ подлежит обязательной замене, выраженный в летных часах;

$M_{\text{ЗАМ } i}$ – трудоемкость замены i -й СЧ ВС и выполнения всех необходимых комплексных проверок ВС после замены.

Аналогичным образом рассчитывается величина затрат на запасные части и расходные материалы, используемые при восстановлении ресурса:

$$C_{\text{ВР.зчм}} = N_{\text{ВС}} \sum_{\{i \in \{1, \dots, N_{\text{СЧ}}\} | E_i = \text{ТЭР}\}} n_i \left[\frac{T_{\text{с.с}} \cdot \tau_{\text{год}} - 1}{W_{\text{РЕС } i}} \right] \times \quad (2.13)$$

$$\times \left(C_{\text{СЧ } i}^* + \sum_{j=1}^{N_{\text{ЗАМ.ПМ } i}} C_{\text{ЗАМ.ПМ } ij} \cdot q_{\text{ЗАМ.ПМ } ij} \right),$$

где

n_i – количество СЧ i -го типа в составе ВС, $i=(1.. N_{\text{СЧ}})$;

$N_{\text{ЗАМ.ПМ } i}$ – количество типов расходных материалов, используемых при замене i -го типа СЧ ВС. Определяется в процессе анализа логистической поддержки [65] на основе данных о технологии обслуживания;

$C_{\text{ЗАМ.РМ}_{ij}}$ – стоимость единицы расходного материала j -го типа, используемого при замене i -го типа СЧ ВС;

$q_{\text{ЗАМ.РМ}_{ij}}$ – количество единиц расходного материала j -го типа, используемого при замене i -го типа СЧ ВС;

$C_{\text{СЧ}_i}^*$ – затраты на приобретение новой i -й СЧ ВС (капитальный ремонт i -й СЧ ВС):

$$C_{\text{СЧ}_i}^* = \begin{cases} C_{\text{СЧ}_i}, & \text{если } i\text{-я СЧ неремонтопригодна} \\ \rho_{\text{К}_i} C_{\text{СЧ}_i}, & \text{если } i\text{-я СЧ ремонтпригодна} \end{cases}, \quad (2.14)$$

$\rho_{\text{К}_i}$ – доля стоимости капитального ремонта СЧ i -го типа от ее цены.

Затраты на оплату труда при проведении непланового ТО рассчитываются как произведение ожидаемого количества отказов СЧ каждого типа на трудоемкость их замены:

$$C_{\text{НТО.тр}} = C_{\text{ч.ч}} \cdot N_{\text{ВС}} \cdot T_{\text{с.с}} \cdot \tau_{\text{год}} \sum_{i=1}^{N_{\text{СЧ}}} n_i \cdot \lambda_i \cdot M_{\text{ЗАМ}_i}, \quad (2.15)$$

где

λ_i – интенсивность отказов СЧ i -го типа в составе ВС, $i=1..N_{\text{СЧ}}$.

Аналогичным образом рассчитывается величина затрат на запасные части и расходные материалы, используемые при проведении непланового ТО:

$$C_{\text{НТО.зчм}} = N_{\text{ВС}} \cdot T_{\text{с.с}} \cdot \tau_{\text{год}} \sum_{i=1}^{N_{\text{СЧ}}} n_i \cdot \lambda_i \cdot (K_i^* + \sum_{j=1}^{N_{\text{ЗАМ.РМ}_i}} C_{\text{ЗАМ.РМ}_{ij}} \cdot q_{\text{ЗАМ.РМ}_{ij}}), \quad (2.16)$$

где

K_i^* – затраты на восстановление отказавших изделий:

$$K_i^* = \begin{cases} C_{\text{СЧ}_i}, & \text{для невозстановливаемых СЧ} \\ \rho_i C_{\text{СЧ}_i}, & \text{для восстанавливаемых СЧ} \end{cases}, \quad (2.17)$$

ρ_i – доля стоимости ремонта СЧ i -го типа от ее цены.

Затраты на поддержание инфраструктуры, как правило, рассчитываются как доля от затрат на создание этой инфраструктуры. Обычно, применяется коэффициент, отражающий эту долю затрат в расчете на один год. Таким образом, затраты на поддержание инфраструктуры можно рассчитать по формуле:

$$K_{\text{ИНФ}} = T_{\text{с.с}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{СЦ}}} I_{\text{СЦ}_i} \rho_{\text{ИНФ}_i} , \quad (2.18)$$

где

$\rho_{\text{ИНФ}_i}$ – доля суммарных годовых затрат на поддержание i -го сервисного центра от затрат на его создание.

Аналогичным образом рассчитываются затраты на поддержание средств ТО – как доля от стоимости приобретения этих средств, отражающая средние годовые затраты на поддержание средств ТО:

$$K_{\text{СТО}} = T_{\text{с.с}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{СТО}}} C_{\text{СТО}_i} \cdot q_{\text{СТО}_i}(N_{\text{ВС}}) \cdot \rho_{\text{СТО}_i} , \quad (2.19)$$

где

$\rho_{\text{СТО}_i}$ – доля суммарных годовых затрат на поддержание i -го типа средств технического обслуживания.

Затраты на хранение запасных частей рассчитываются на основе оценки среднего уровня хранимых запасных частей (по каждой позиции) и средней годовой стоимости хранения для каждого конкретного типа запасных частей. Средняя годовая стоимость хранения определяется на основе регламента ТО при хранении (формируется в процессе анализа логистической поддержки [65]) и фиксированной стоимости хранения единицы объема складских запасов. Обозначим как $\overline{A}_{\text{ХР}_i}$ вектор, компонентами которого являются средние объемы хранимых запасов для каждого типа запасных частей в i -м сервисном центре, а $\overline{C}_{\text{ХР}}$ – вектор, компонентами которого являются средние величины затрат на хранение одной запасной части каждого типа:

$$\overline{A}_{\text{ХР}_i} = (q_{\text{ХР}_{i1}}, q_{\text{ХР}_{i2}}, \dots, q_{\text{ХР}_{iN_{\text{СЧ}}}}) , \quad (2.20)$$

$$\overline{C}_{\text{ХР}} = (c_{\text{ХР}_1}, c_{\text{ХР}_2}, \dots, c_{\text{ХР}_{N_{\text{СЧ}}}}) , \quad (2.21)$$

где

$q_{\text{ХР}_{ij}}$ – среднее количество хранимых запасных частей j -го типа в i -м сервисном центре, равное, как правило, половине от объемов начального запаса;

c_{XPj} – средняя годовая стоимость хранения одной запасной части j -го типа.

Тогда затраты на хранение запасных частей можно рассчитать по следующей формуле:

$$K_{Xp3ч} = T_{c.c} \cdot \sum_{i=1}^{N_{сц}} \sum_{j=1}^{N_{сч}} q_{XPij} \cdot c_{XPj} \quad (2.22)$$

Значения компонентов вектора $\overline{A_{счi}}$ определяются по результатам решения задачи оптимизации параметров многоуровневой системы МТО эксплуатации, описанной в разделе 2.4.

Затраты на транспортировку запасных частей зависят от принятой структуры системы МТО – расположения сервисных центров разного уровня и организации логистических потоков между ними. В данной работе рассмотрим наиболее распространенную 4-х уровневую модель системы технической эксплуатации:

- 1-й уровень: линейная станция по ТО;
- 2-й уровень: авиационно-техническая база;
- 3-й уровень: региональный сервисный центр;
- 4-й уровень: специализированное ремонтное предприятие или завод-изготовитель.

В данной модели 1-й и 2-й уровни расположены в одном месте дислокации, таким образом, следует учитывать транспортировку запасных частей между уровнями 2, 3 и 4. Для каждой i -й ремонтпригодной СЧ ВС введем индикатор γ_i , отражающий модель ее восстановления после отказа:

$\gamma_i = 0$ – СЧ после отказа направляется в ремонт на уровень 4. При этом возникают затраты на транспортировку СЧ с уровня 2 на уровень 4 (через уровень 3) для ремонта и обратно;

$\gamma_i = 1$ – СЧ после отказа направляется в ремонт на уровень 3. При этом возникают затраты на транспортировку СЧ с уровня 2 на уровень 3 для ремонта и обратно, а также затраты на поставку компонентов для ремонта СЧ с уровня 4 на уровень 3;

Тогда затраты на транспортировку, возникающие при восстановлении j -й СЧ ВС в i -м сервисном центре 3-го уровня, можно записать в виде:

$$K_{\text{ТР}ij} = \begin{cases} \frac{M_j}{1000} (L_{2 \rightarrow 3i} R_{2 \rightarrow 3i} + L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i}) & , \text{СЧ неремонтопригодна} \\ \frac{M_j}{500} (L_{2 \rightarrow 3i} R_{2 \rightarrow 3i} + L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i}) & , \text{если } \gamma_j = 0 \\ \frac{M_j}{500} L_{2 \rightarrow 3i} R_{2 \rightarrow 3i} + \frac{m_j}{1000} L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i} & , \text{если } \gamma_j = 1 \end{cases} \quad (2.23)$$

где

M_j – масса j -й СЧ (в килограммах);

m_j – средняя масса компонентов, необходимых для ремонта j -й СЧ в региональном сервисном центре (в килограммах);

$R_{2 \rightarrow 3i}$ – стоимость тонно-километра транспортировки грузов между уровнями 2 и 3 для i -го сервисного центра;

$R_{3 \rightarrow 4i}$ – стоимость тонно-километра транспортировки грузов между уровнями 3 и 4 для i -го сервисного центра;

$L_{2 \rightarrow 3i}$ – расстояние между уровнями 2 и 3 для i -го сервисного центра (в километрах);

$L_{3 \rightarrow 4i}$ – расстояние между уровнями 3 и 4 для i -го сервисного центра (в километрах).

С использованием введенных обозначений затраты на транспортировку запасных частей можно рассчитать по следующей формуле:

$$K_{\text{ТРЗЧ}} = T_{\text{с.с}} \cdot \tau_{\text{год}} \sum_{i=1}^{N_{\text{СЦ}}} n_{\text{ВС}i} \sum_{j=1}^{N_{\text{СЧ}}} n_j \cdot \lambda_j \cdot K_{\text{ТР}ij} \quad (2.24)$$

где

$n_{\text{ВС}i}$ – количество ВС, обслуживаемых в i -ом сервисном центре 2-го уровня. Если i -й сервисный центр относится к 3-му уровню, тогда $n_{\text{ВС}i} = 0$.

Таким образом, в настоящем разделе приведены расчетные формулы для оценки все составляющих затрат на ТЭ. Суммарные затраты на обеспечение ТЭ представляют собой сумму всех приведенных в таблице 2.1 статей затрат.

2.3 Информационная модель для описания многоуровневой системы материально-технического обеспечения

Как видно из представленных в разделе 2.2 расчетных формул, для оценки суммарных затрат на обеспечение ТЭ необходимо большое количество исходных данных, которые можно разделить на 3 группы:

1) данные об изделии, его составных частях и работах планового ТО, хранимые в базе данных АЛП [65], информационная модель которой регламентируется [1];

2) данные о характеристиках элементов системы МТО;

3) данные о параметрах и структуре системы МТО.

Информационная модель базы данных АЛП, описывающая изделие, его составные части, работы планового и непланового ТО, разработана и исследована в [57]. Результаты исследований послужили основой при разработке нормативного документа [1]. При этом разработанная в [57] модель, позволяющая решать задачи АЛП на этапе разработки ВС, обладает существенным недостатком - в модели отсутствуют сущности и атрибуты, позволяющие описать систему МТО для конкретного парка ВС, и, соответственно, рассчитать затраты на обеспечение ее ТЭ.

Для решения этой задачи необходимо дополнить информационную модель АЛП дополнительными сущностями и атрибутами, описывающими:

1) структуру системы МТО, а именно: сервисные центры и логистические потоки между ними;

2) параметры системы МТО: производственные мощности сервисных центров (типы СЧ, для которых в сервисном центре предусмотрены участки по ремонту), размеры оборотных фондов запасных частей, хранимых в сервисных центрах;

3) характеристики элементов системы МТО: стоимость создания, расстояние между сервисными центрами (для оценки затрат на транспортировку) и т.п.

Одновременно с этим информационную модель АЛП, разработанную в [57], следует упростить, убрав из нее сущности, описывающие параметры поставки изделий на этапе разработки ВС.

Предложенная интегрированная информационная модель ВС и системы МТО, выполненная в нотации EXPRESS-G [23], представлена на рисунках 2.2, 2.3, 2.4, 2.5:

Группа сущностей «Тип воздушного судна», «Сценарий применения» и «Составная часть», представленная на рисунке 2.2, описывает объекты, содержащие сведения о характеристиках парка ВС.

Сущность «Тип воздушного судна» содержит следующие атрибуты, отражающие характеристики ВС:

1) «обозначение» – обозначение типа ВС, хранимое в базе данных АЛП, например «VRT500»;

2) «наименование» – название типа ВС, например «Легкий многоцелевой вертолет»;

3) «срок службы» – срок службы данного типа ВС, установленный в конструкторской документации, выраженный в годах;

Атрибут «составные части» содержит ссылки на объекты типа «Составная часть», который, в свою очередь, ссылается на объект типа «Комплектующее изделие». Сущность «Составная часть» также содержит атрибут «количество в ВС» отражающий количество комплектующих изделий данного типа в составе ВС.

Совокупность объектов «Тип воздушного судна» - «Составная часть» - «Комплектующее изделие» определяет состав ВС с точностью до заменяемой в эксплуатации составной части. Фактически, совокупность объектов соответствует логической структуре изделия [14,66], упрощенной с целью более быстрой организации обработки данных.

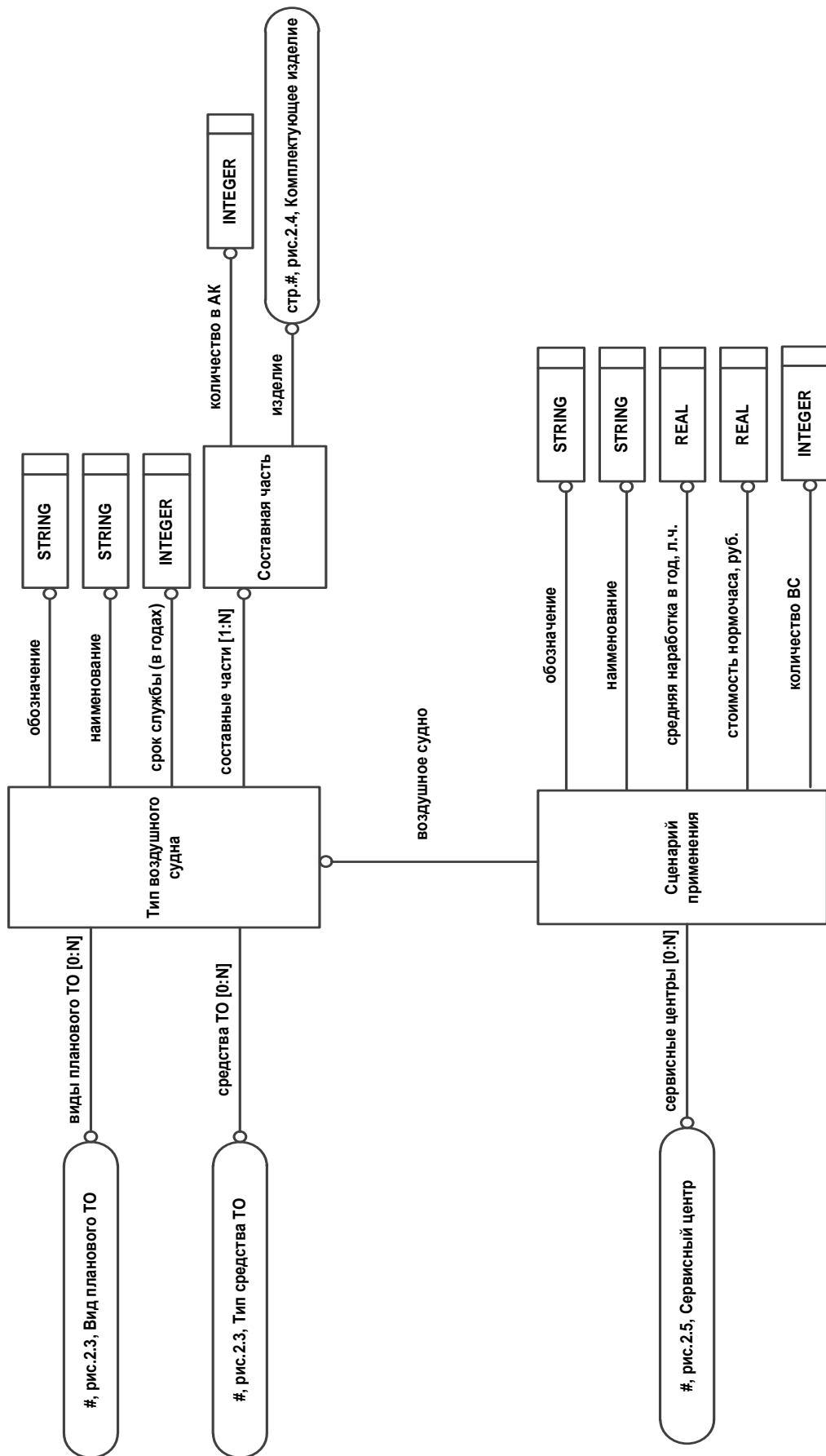


Рисунок 2.2. Группа сущностей «Тип воздушного судна» и «Сценарий применения»

Атрибут «виды планового ТО» содержит ссылки на сущности типа «Вид планового ТО» и перечисляет виды работ, изложенные в регламенте технического обслуживания для данного типа ВС.

Атрибут «средства ТО» содержит ссылки на сущности типа «Тип средства ТО» и, таким образом, перечисляет все типы средств ТО (инструмент, приспособления, контрольно-проверочная аппаратура), необходимые для технического обслуживания данного типа ВС.

Сущность «Сценарий применения» описывает региональный парк ВС и интенсивность его эксплуатации. Сущность содержит следующие атрибуты:

- 1) «обозначение» - обозначение сценария в базе данных АЛП;
- 2) «наименование» - наименование сценария в базе данных АЛП;
- 3) «средняя наработка в год» - интенсивность эксплуатации парка ВС, выраженная в количестве летних часов, выполняемых одним ВС в год;
- 4) «количество ВС» - количество ВС в региональном парке, эксплуатируемых с заданной интенсивностью;
- 5) стоимость нормочаса – средняя стоимость одного нормочаса работ технического специалиста, выполняющего техническое обслуживание и ремонт ВС и его СЧ;

Атрибут «сервисные центры» содержит ссылки на сущности «Сервисный центр» и, таким образом, перечисляет все сервисные центры, развернутые для выполнения ТОиР данного парка ВС.

Атрибут «воздушное судно» содержит ссылку на сущность «Тип воздушного судна» и определяет, какие типы ВС эксплуатируются по описанному сценарию.

Группа сущностей «Вид планового ТО», «Средство ТО», «Запасная часть» и «Расходный материал», представленная на рисунке 2.3, описывают объекты, содержащие сведения о регламенте технического обслуживания типа ВС и необходимых для его выполнения материальных и трудовых ресурсах.

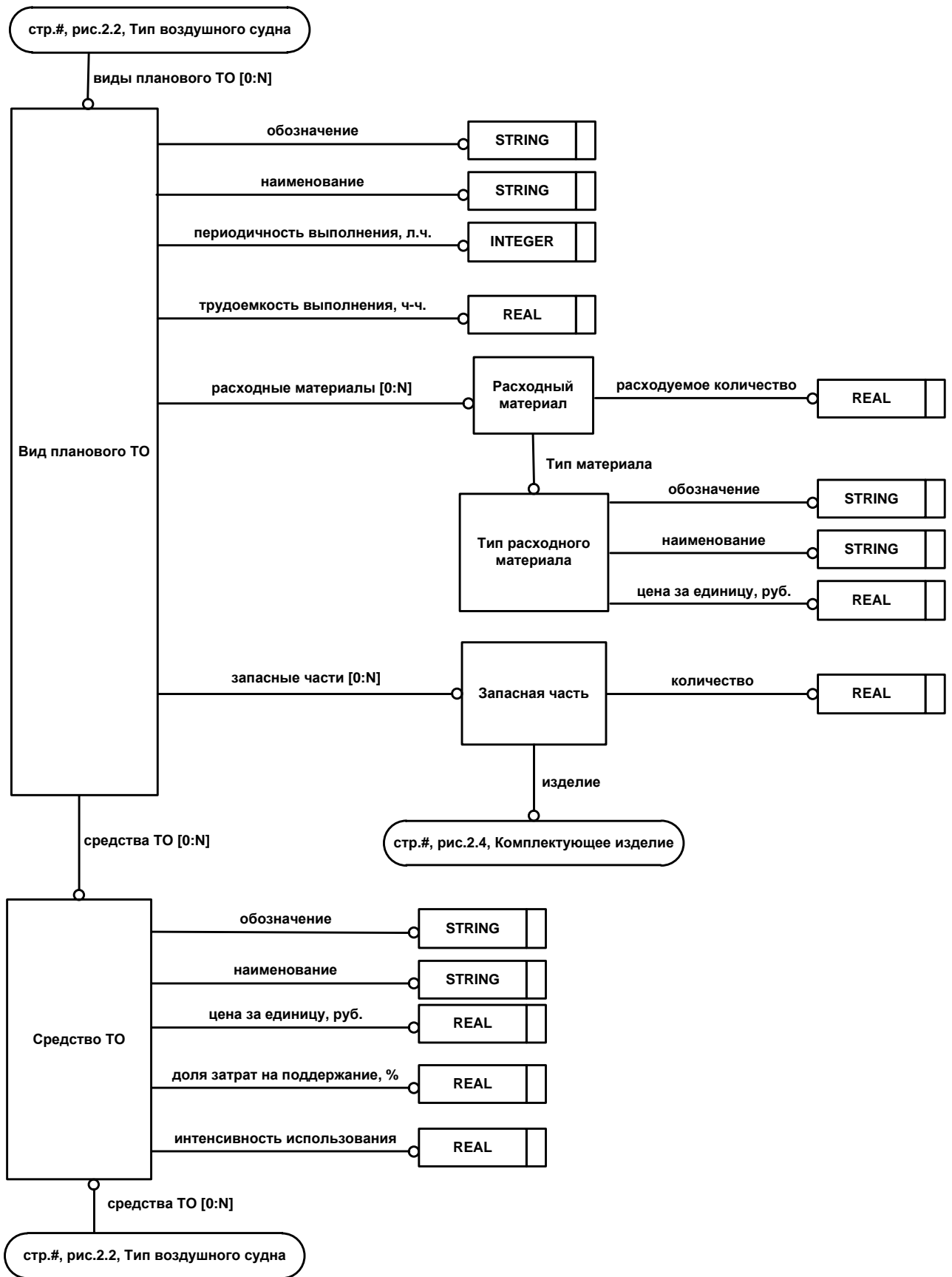


Рисунок 2.3. Группа сущностей «Вид планового ТО», «Средство ТО», «Запасная часть», «Расходный материал»

Сущность «Вид планового ТО» содержит следующие атрибуты, отражающие характеристики конкретного описанного в регламенте вида работ планового ТО:

1) «обозначение» - обозначение соответствующей процедуры обслуживания в базе данных АЛП;

2) «наименование» - наименование соответствующей процедуры обслуживания в базе данных АЛП;

3) «периодичность выполнения» - заданная в регламенте технического обслуживания периодичность выполнения работ планового ТО, выраженная в летних часах;

4) «трудоемкость выполнения» - выраженная в человеко-часах трудоемкость выполнения данного вида работ по ТО.

Атрибут «расходные материалы» содержит ссылки на сущность «Расходный материал» и отражает перечень материалов, расходуемых в процессе выполнения вида ТО. Сущность «Расходный материал», в свою очередь, содержит атрибут «расходуемое количество», отражающее количество данного материала, расходуемое за одно выполнения данного вида ТО, а также ссылку на сущность «Тип расходного материала» через атрибут «тип материала».

Сущность «Тип расходного материала» описывает отдельный тип расходного материала и включает в себя следующие атрибуты:

1) «обозначение» - обозначение материала в базе данных АЛП;

2) «наименование» - наименование материала в базе данных АЛП;

3) «цена за единицу» - стоимость единицы расходного материала.

Аналогичным образом в информационной модели определяются запасные части, расходуемые при выполнении вида работ планового ТО. Атрибут «запасные части» сущности «Вид планового ТО» содержит ссылки на сущности «Запасная часть», которые, в свою очередь, описывают количество расходуемых запасных частей через атрибут «количество» и тип расходуемых запасных частей через атрибут «изделие».

Атрибут «средства ТО» сущности «Вид планового ТО» описывает перечень средств ТО, необходимых для выполнения данного вида работ планового ТО.

Атрибут содержит ссылки на сущности «Средство ТО», которые, в свою очередь, содержат следующие атрибуты:

- 1) «обозначение» - обозначение средства ТО в базе данных АЛП;
- 2) «наименование» - наименование средства ТО в базе данных АЛП;
- 3) «цена за единицу» - стоимость единицы средства ТО;
- 4) «доля затрат на поддержание» - средняя доля ежегодных затрат на поддержание в работоспособном состоянии единицы средства ТО от его цены, выраженная в процентах. Как правило, рассчитывается как отношение цены средства ТО к его сроку службы, установленному в эксплуатационной документации;
- 5) «интенсивность использования» - среднее количество часов использования данного средства ТО в расчете на один летный час ВС. Интенсивность использования рассчитывается на основе данных технологических карт, выполняемых в рамках данного вида планового ТО.

Сущность «Комплектующее изделие», представленная на рисунке 2.4, расширяет определение сущности «Изделие», данное в [57], описывает тип составной части ВС и содержит следующие атрибуты:

- 1) «обозначение» – обозначение изделия в соответствии с конструкторской документацией;
- 2) «наименование» – наименование изделия в соответствии с конструкторской документацией;
- 3) «цена» – стоимость единицы нового изделия данного типа, выраженная в рублях;
- 4) «доля стоимости капитального ремонта от цены» – затраты на капитальный ремонт (если предусмотрен), выраженные как доля от цены единицы нового изделия данного типа;
- 5) «доля стоимости текущего ремонта от цены» – затраты на текущий ремонт (если предусмотрен), выраженные как доля от цены единицы нового изделия данного типа;

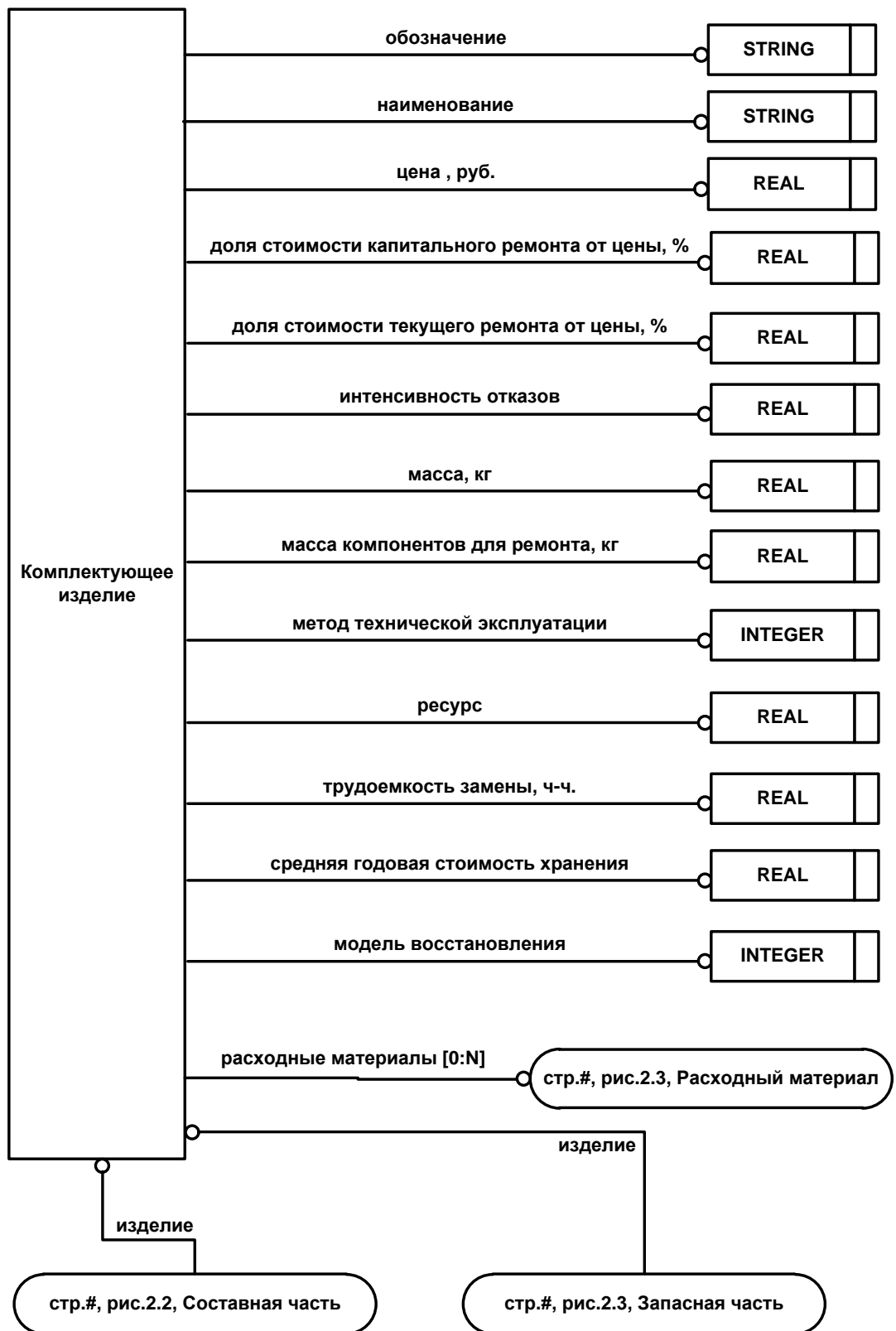


Рисунок 2.4. Сущность «Комплектующее изделие»

б) «интенсивность отказов» – обратная величина к средней наработке изделия данного типа на отказ (до отказа). Нарботка изделия на отказ (до отказа) выражается в летных часах;

- 7) «масса» – масса единицы изделия в упаковке, выраженная в килограммах;
- 8) «масса компонентов для ремонта» – атрибут описывает среднюю массу компонентов, расходуемых в ходе проведения одного текущего ремонта изделия данного типа, выраженную в килограммах;
- 9) «метод технической эксплуатации» – атрибут, принимающий значения от 0 до 2, обозначающий методы эксплуатации «по ресурсу», «до предотказного состояния» и «до отказа», соответственно;
- 10) «ресурс» – назначенный ресурс (для изделий, для которых не предусмотрен плановый капитальный ремонт) или межремонтный ресурс (для изделий, для которых предусмотрен плановый капитальный ремонт);
- 11) «трудоемкость замены» – трудоемкость замены комплектующего изделия на ВС. В случае, когда на ВС установлено несколько экземпляров однотипных комплектующих изделий, указывается средняя трудоемкость замены.
- 12) «средняя годовая стоимость хранения» - стоимость хранения комплектующего изделия в региональном сервисном центре, с учетом проведения ТО при хранении, выраженная в рублях в год;
- 13) «модель восстановления» - индикатор, равный 0, если комплектующее изделие восстанавливается на заводе изготовителе, и 1, если комплектующее изделие восстанавливается в сервисном центре на уровне 3.

Атрибут «расходные материалы» сущности «Комплектующее изделие» содержит ссылку на перечень материалов, расходуемых в процессе замены данного комплектующего изделия.

Группа сущностей для описания сервисных центров, представленная на рисунке 2.5, описывают объекты, содержащие сведения о различных типах сервисных центров, выполняемых ими работах по ТОиР и параметрах материально-технического обеспечения этих работ.

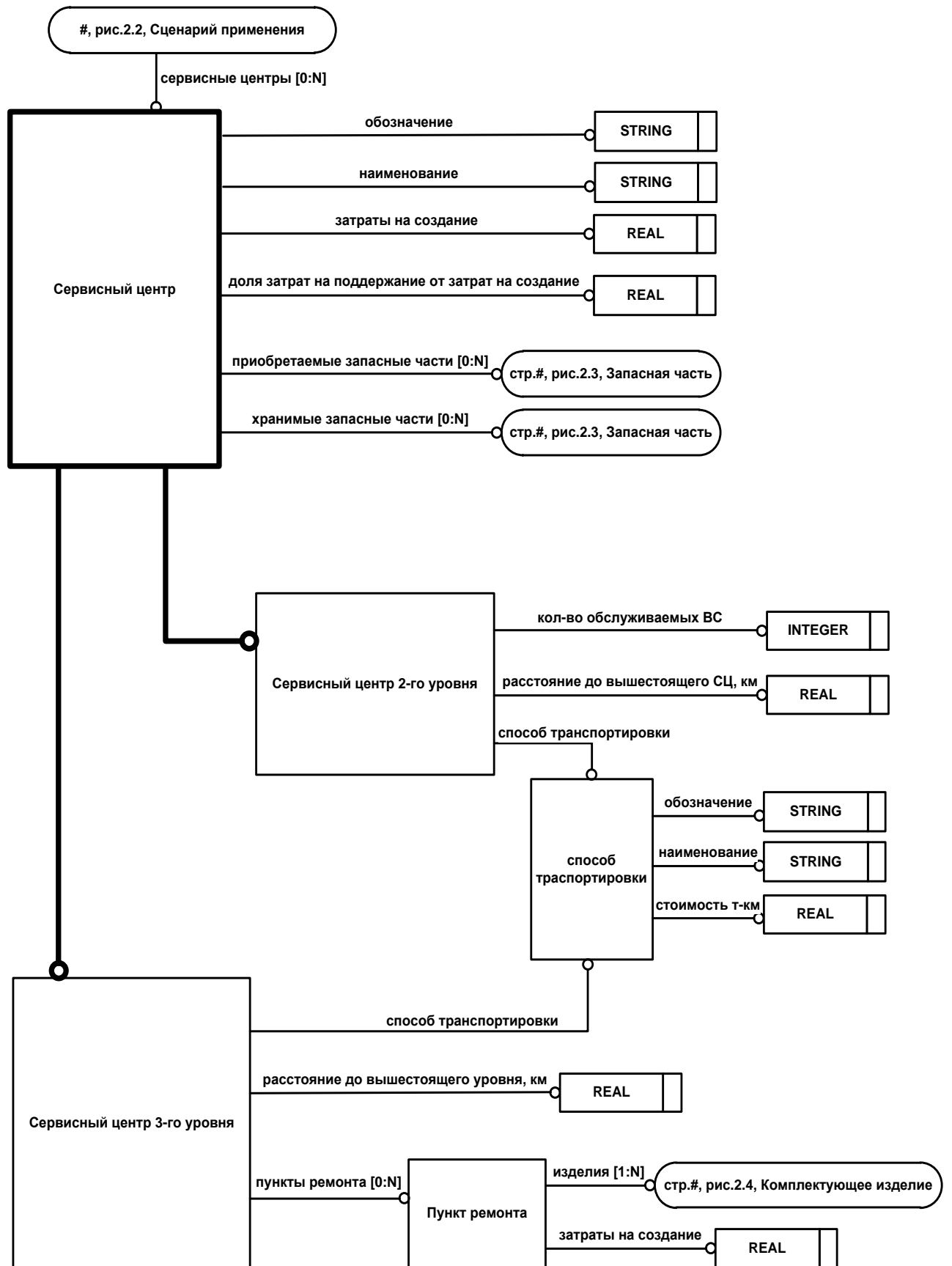


Рисунок 2.5. Группа сущностей для описания сервисных центров

Основной сущностью является сущность «Сервисный центр», от которой наследуются еще две сущности – «Сервисный центр 2-го уровня» и «Сервисный центр 3-го уровня». Сущность «Сервисный центр», таким образом, содержит общие атрибуты, описывающие параметры всех типов сервисных центров, а именно:

1) «обозначение» - обозначение сервисного центра в информационной системе (базе данных);

2) «наименование» - обозначение сервисного центра в информационной системе (базе данных);

3) «затраты на создание» - единовременные затраты на развертывание сервисного центра в регионе, выраженные в рублях;

4) «доля затрат на поддержание от затрат на создание» - доля ежегодных затрат на эксплуатацию сервисного центра, выраженная как доля от затрат на развертывание сервисного центра в регионе;

5) «приобретаемые запасные части» - ссылка на сущности типа «Запасная часть». Атрибут показывает величину запаса каждого типа запасных частей, приобретаемых в качестве начального оборотного фонда для данного сервисного центра.

б) «хранимые запасные части» - ссылка на сущности типа «Запасная часть». Атрибут показывает среднюю величину хранимого запаса каждого типа запасных частей в ходе эксплуатации парка ВС и выполнения работ по ТОиР в данном сервисном центре.

Атрибут «количество» сущности «Запасная часть» показывает количество приобретаемых в качестве оборотного фонда запасных частей каждого типа для атрибута «приобретаемые запасные части», и среднее количество хранимых запасных частей каждого типа для атрибута «хранимые запасные части».

Сущность «Сервисный центр 2-го уровня» описывает авиационно-техническую базу [55] (АТБ), размещенную в месте базирования ВС. Сущность содержит следующие атрибуты:

1) «количество обслуживаемых ВС» - количество единиц ВС, базируемых в части с данной АТБ;

2) «расстояние до вышестоящего СЦ» - расстояние в километрах до сервисного центра 3-го уровня, из которого осуществляются поставки запасных частей в АТБ;

3) «способ транспортировки» - ссылка на объект «Способ транспортировки», содержащий данные для расчета затрат на транспортировку запасных частей определенным видом транспорта в данном регионе, а именно:

«обозначение» - обозначение способа транспортировки в информационной системе (базе данных);

«наименование» - наименование способа транспортировки в информационной системе (базе данных);

«стоимость тонно-километра» - стоимость одного тонно-километра перевозки грузов данным видом транспорта.

Сущность «Сервисный центр 3-го уровня» описывает региональный сервисный центр или авиаремонтный завод, размещаемый в регионе с несколькими местами базирования ВС и выполняющий трудоемкие виды планового ТО на ВС и ремонт СЧ ВС. Сущность содержит следующие атрибуты:

1) «расстояние до вышестоящего уровня» - расстояние в километрах до центрального склада поставщика ВС (или его завода-изготовителя);

2) «способ транспортировки» - ссылка на объект «Способ транспортировки», содержащий данные для расчета затрат на транспортировку запасных частей определенным видом транспорта с центрального склада поставщика ВС до региона размещения данного сервисного центра.

Атрибут «пункты ремонта» содержит ссылки на сущность «Пункт ремонта» и отражает перечень изделий, для которых в данном сервисном центре организованы ремонтные ячейки (пункты ремонта). Сущность «Пункт ремонта», в свою очередь, включает в себя следующие атрибуты:

«изделия» - ссылки на сущности типа «Комплектуемое изделие», описывающие перечень типов комплектующих изделий ВС, ремонт которых может быть выполнен в данном пункте ремонта в сервисном центре;

«затраты на создание» - стоимость создания с данным сервисном центре 3-го уровня пункта по ремонту перечня комплектующих изделий, заданного атрибутом «изделия».

Перечисленные выше сущности, их атрибуты и взаимосвязи содержат все сведения, необходимые для проведения оценки затрат на обеспечение технической эксплуатации ВС в соответствии с предложенной методикой.

Таким образом, представленная информационная модель может быть реализована в программном комплексе для формирования схемы базы данных и впоследствии использоваться для получения исходных данных для оценки затрат на обеспечение ТЭ. В этом случае расчетные алгоритмы будут непосредственно извлекать данные из сущностей и атрибутов, хранимых в базе данных и, при необходимости, размещать результаты расчетов в этой же базе данных.

Следует отметить, что представленная информационная модель содержит элементы современного объектно-ориентированного подхода к проектированию баз данных (например, отношение наследования сущностей) и для ее реализации в программном комплексе требуется использование соответствующей системы управления базами данных.

2.4 Алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения

В методике расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ, описанной в разделе 2.2, в качестве расчетных параметров выступали компоненты вектора $\overline{A_{сч_i}}$, отражающие объемы оборотного фонда каждого типа запасных частей в i -м сервисном центре. Для оценки затрат на хранение, в свою очередь,

использовались компоненты вектора $\overline{A_{XP_i}}$, отражающие среднее количество хранимых запасных частей каждого типа в сервисном центре.

Эти вектора, по сути, определяют параметры многоуровневой системы МТО эксплуатации. Расчет величин компонентов этих векторов осуществляется путем решения оптимизационной задачи. Применяемые математические методы [13,73,75] оптимизации параметров системы МТО, основанные на использовании аппарата имитационного моделирования и расчетно-аналитических моделях, достаточно хорошо проработаны для целей минимизации стоимости закупаемых запасных частей.

В настоящей работе предлагается подход, позволяющий проводить оптимизацию параметров системы МТО по критерию минимизации суммарных затрат на ТЭ (включая транспортировку и хранение) и известных ограничениях на показатели эксплуатационной готовности парка изделий, а также с учетом различных вариантов организации ремонта составных частей изделий АТ, определяющих номенклатуру хранимого имущества.

Учитывая принятое для авиационной техники количество уровней обслуживания и ремонта, система МТО будет состоять из четырех уровней:

1. Групповой ЗИП линейной станции по ТО (ЛСТО);
2. Склад авиационно-технической базы (АТБ);
3. Региональный склад сервисного центра;
4. Центральный склад поставщика АТ.

Потоки исправных и неисправных составных частей ВС между этими уровнями показаны на функциональной схеме системы МТО на рисунке 2.6.

Примем в качестве критерия оптимизации суммарные затраты на обеспечение ТЭ парка ВС, а ограничением – требования к величине коэффициента готовности системы МТО ($K_{г\text{МТО}}$). Для упрощения целевой функции в оптимизационной задаче, выберем из полного перечня статей затрат только те статьи, которые зависят от объема оборотного фонда запасных частей, а также распределения работ по ремонту составных частей ВС по уровням ремонта.

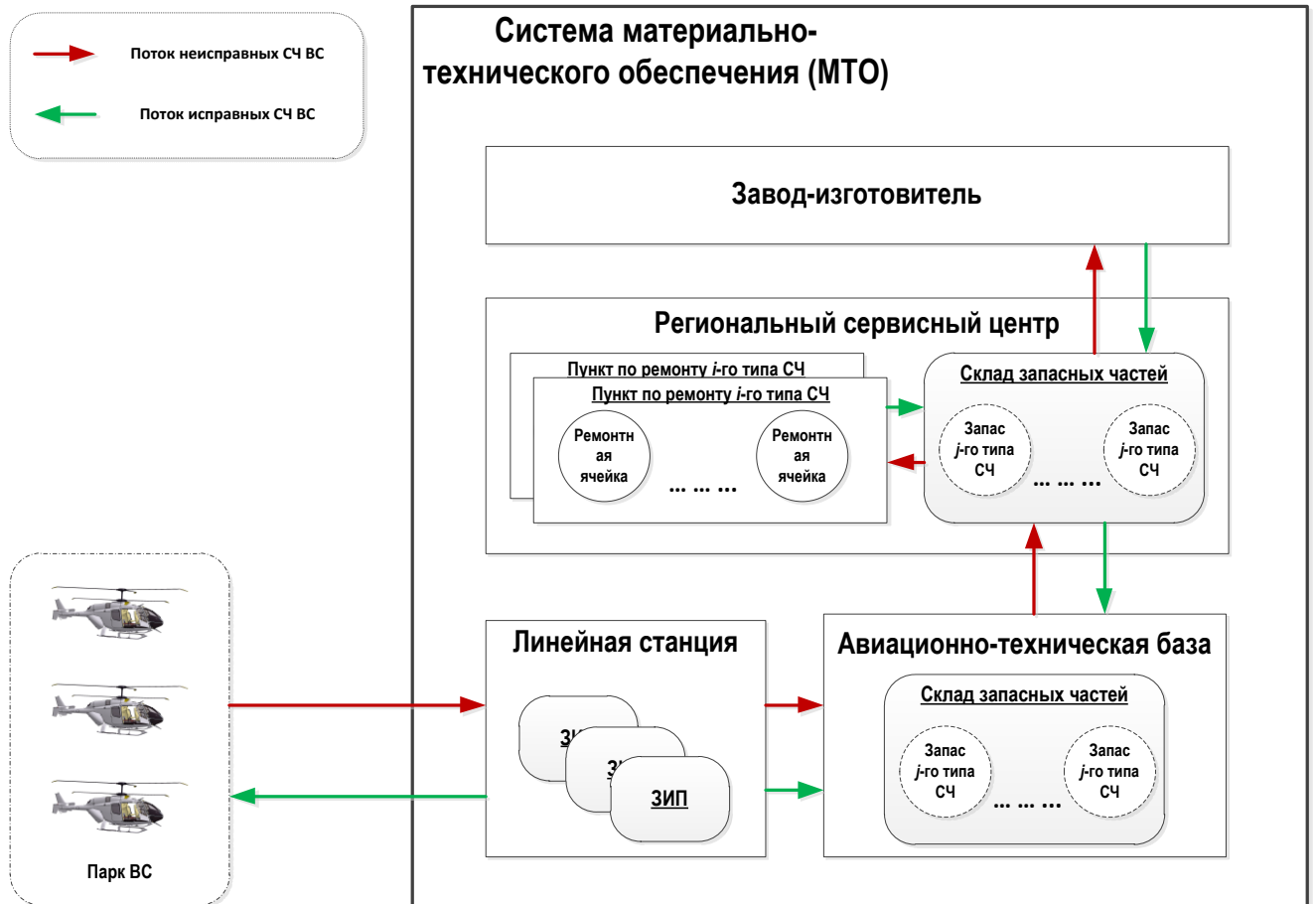


Рисунок 2.6. Функциональная схема системы МТО

К этим статьям затрат относятся:

- затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей;
- затраты на транспортировку запасных частей;
- затраты на хранение запасных частей.

В этом случае, используя введенные в разделе 2.2 обозначения, задачу оптимизации параметров системы МТО можно записать следующим образом:

$$f_{\text{МТО}}(\bar{\gamma}, \overline{A_{\text{СЧ}_1}}, \dots, \overline{A_{\text{СЧ}_{N_{\text{СЧ}}}}}) = I_{\text{ЗЧ}} + K_{\text{ТрЗЧ}} + K_{\text{ХрЗЧ}} \rightarrow \min \quad (2.25)$$

$$K_{\Gamma_{\text{МТО}}}(\bar{\gamma}, \overline{A_{\text{СЧ}_1}}, \dots, \overline{A_{\text{СЧ}_{N_{\text{СЧ}}}}}) \geq \varphi$$

где

φ – требуемый коэффициент готовности системы МТО;

$\bar{\gamma} = (\gamma_1, \dots, \gamma_{N_{\text{СЧ}}})$ – вектор, компоненты которого определяют уровень ремонта для каждой составной части ВС;

$\overline{A_{СЧ_i}}$ - вектор, компоненты которого определяют количество приобретаемых в оборотный фонд запасных частей каждого типа в i -м сервисном центре;

$f_{МТО}(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ_1}}, \dots, \overline{A_{СЧ_{N_{СЦ}}}})$ – функция суммарных затрат на обеспечение ТЭ, зависящих от параметров системы МТО.

Если ввести матрицу $\widehat{A_{СЧ}} = [\overline{A_{СЧ_i}} \dots \overline{A_{СЧ_{N_{СЦ}}}}], i = 1..N_{СЦ}$, тогда задачу можно также записать как поиск матрицы $\widehat{A_{СЧ}}^* = \arg \min_{K_{ГМТО}(\bar{\gamma}, \widehat{A_{СЧ}}) \geq \varphi} f_{МТО}(\bar{\gamma}, \widehat{A_{СЧ}})$, элементы которой содержат оптимальный объем запаса каждого типа СЧ ВС в каждом сервисном центре.

Задача выбора оптимального распределения составных частей ВС по уровням ТОиР $\bar{\gamma}$ является отдельной задачей и рассматривается в разделе 2.5. Таким образом, в данной задаче необходимо найти оптимальные объемы запасных частей в местах хранения на 2 и 3 уровнях системы МТО, так как запасы на 4-м уровне принимаются неограниченными, а запасы на 1-м уровне, как правило, включают в себя только запасные части для выполнения работ планового ТО.

При расчете параметров системы МТО следует отметить, что коэффициент готовности системы МТО в целом будет удовлетворять заданному в формуле (2.25) условию, если $K_{ГМТО}$ в каждой точке базирования на уровне 2 будет удовлетворять этому условию, так как именно на 1-м и 2-м уровне осуществляется ТОиР ВС. В свою очередь, так как запасные части на 2-й уровень поставляются с 3-го уровня системы МТО, $K_{ГМТО}$ на 2-м уровне будет зависеть от соответствующего $K_{ГМТО}$ на 3-м уровне. Учитывая, что запасы на 4-м уровне принимаются неограниченными, задачу поиска оптимальных параметров системы МТО для регионального парка с несколькими развернутыми региональными складами можно разбить на подзадачи, вычисляя параметры системы МТО отдельно для каждого 3-го и связанных с ним 2-ми уровнями.

Для каждой подзадачи расчетный коэффициент готовности системы МТО можно представить в виде произведения двух коэффициентов – коэффициента готовности системы МТО на уровне 2 и на уровне 3 [13,75]:

$$K_{ГМТО}(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ_1}}, \dots, \overline{A_{СЧ_{N_{СЧ}}}}) = K_{ГМТО}^{(2)}(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ_1}^{(2)}}, \dots, \overline{A_{СЧ_j}^{(2)}}) K_{ГМТО}^{(3)}(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ}^{(3)}}) \quad (2.26)$$

где

$K_{ГМТО}^{(2)}$ – функция расчета коэффициента готовности системы МТО на 2-м уровне;

$K_{ГМТО}^{(3)}$ – функция расчета коэффициента готовности системы МТО на 3-м уровне;

$\overline{A_{СЧ}^{(3)}}$ – вектор, компоненты которого определяют количество приобретаемых в оборотный фонд запасных частей каждого типа в региональном складе сервисного центра;

$\overline{A_{СЧ_i}^{(2)}}$ – вектор, компоненты которого определяют количество приобретаемых в оборотный фонд запасных частей каждого типа в i -й АТБ, $i=1..j$; j – количество мест базирования ВС с АТБ.

Очевидно, что получить требуемую величину φ можно согласованным перебором комбинаций коэффициентов $K_{ГМТО}^{(2)}$ и $K_{ГМТО}^{(3)}$, и распределения составных частей по уровням ремонта $\bar{\gamma}$. Графическое представление множества различных вариантов для $\varphi = 0,9$ показано на рисунке 2.7.

Достижение наилучшей (по критерию наименьших затрат) комбинации множителей $K_{ГМТО}^{(2)}$ и $K_{ГМТО}^{(3)}$, зависит от величины суммарных затрат $f_{МТО}$ – выбирается такое сочетание $K_{ГМТО}^{(2)}$ и $K_{ГМТО}^{(3)}$, для которого величина $f_{МТО}$ минимальна. В свою очередь, параметры системы МТО $\overline{A_{СЧ}^{(3)}}$ и $\overline{A_{СЧ_i}^{(2)}}$ определяются таким образом, чтобы обеспечить выбранное наилучшее сочетание $K_{ГМТО}^{(2)}$ и $K_{ГМТО}^{(3)}$.

| $KГ_{МТО}^{(2)}$ | $KГ_{МТО}^{(3)}$ | $KГ_{МТО}$ |
|------------------|------------------|------------|
| 0,99 | 0,909 | 0,9 |
| 0,98 | 0,918 | 0,9 |
| 0,97 | 0,927 | 0,9 |
| 0,96 | 0,938 | 0,9 |
| ... | ... | ... |
| ... | ... | ... |
| ... | ... | ... |

Рисунок 2.7. Варианты достижения требуемого значения коэффициента готовности многоуровневой системы МТО

Для определения параметров системы МТО на каждом уровне, применим следующий алгоритм (далее приведен алгоритм для уровня 3, алгоритмы расчета для уровней 2 и 3 одинаковы):

Зависимость для расчета $KГ_{МТО}^{(3)}(\bar{y}, \overline{A_{СЧ}^{(3)}})$ запишем в виде [13,75]:

$$KГ_{МТО}^{(3)}(\bar{y}, \overline{A_{СЧ}^{(3)}}) = \prod_{i=1}^{M^{(3)}} KГ_{МТО_i}^{(3)}(\overline{A_{СЧ}^{(3)}}) \quad (2.27)$$

где

$M^{(3)}$ - количество типов запасных частей, хранимых на уровне 3 в соответствии с принятой моделью распределения СЧ по уровням ремонта \bar{y} ;

$KГ_{МТО_i}^{(3)}(\overline{A_{СЧ}^{(3)}})$ - коэффициент готовности системы МТО (далее - коэффициент готовности) для i -го типа запасных частей ($i=1... M^{(3)}$).

Поскольку расчетные формулы для оценки коэффициента готовности i -го типа запасных частей $KГ_{МТО_i}^{(3)}(\overline{A_{СЧ}^{(3)}})$ зависят от принятой для данного типа

компонентов модели управления запасами, рассмотрим следующие основные варианты [13,75,80]:

1) **Модель с непрерывным пополнением запасов** предполагает, что при отказе установленной на изделии СЧ ее восстановление производится путем замены из имеющегося запаса с последующим формированием заявки на восполнение запаса. Модель, в основном, находит применение для дорогостоящих ремонтпригодных изделий в ситуации, когда у эксплуатирующей организации есть возможность сразу же отправлять неисправные компоненты в ремонт и получать их обратно (исправными) через известное среднее время ремонта.

В этом случае зависимость для расчета $K\Gamma_{\text{МТО}_i}^{(3)}(\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}})$ запишем в следующем виде [75,80]:

$$K\Gamma_{\text{МТО}_i}^{(3)}(\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}}) = 1 - \frac{(h_i \lambda_i T_i)^{A_{\text{СЧ}_i}^{(3)} + 1}}{(A_{\text{СЧ}_i}^{(3)} + 1)! \sum_{j=1}^{A_{\text{СЧ}_i}^{(3)} + 1} \frac{(h_i \lambda_i T_i)^j}{j!}} \quad (2.28)$$

где

h_i – количество эксплуатируемых СЧ i -го типа (рассчитывается как произведение количества СЧ в составе ВС на количество ВС, осуществляющих ТОиР в данном сервисном центре на уровне 3);

λ_i – интенсивность отказов компонентов i -го типа, выраженная в календарном времени;

T_i – среднее время от формирования заявки на пополнение запаса до доставки компонента, то есть среднее время ремонта (для ремонтпригодных компонентов) или среднее время поставки нового компонента (для неремонтпригодных компонентов),

$A_{\text{СЧ}_i}^{(3)}$ – начальный запас компонентов i -го типа, определенный в векторе $\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}}$.

2) **Модель с периодическим пополнением запасов** предполагает пополнение запасов через фиксированные промежутки времени и до начального ($A_{\text{СЧ}_i}^{(3)}$) уровня. Данная модель, в основном, применяется в случаях, когда парк ВС эксплуатируется в удаленном регионе и транспортировка запасных частей

осуществляется через заданные периоды времени (например, транспортный самолет осуществляет перевозки только раз в полгода).

В этом случае зависимость для расчета $K\Gamma_{\text{МТО}_i}^{(3)}(\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}})$ запишем в следующем виде [75,80]:

$$K\Gamma_{\text{МТО}_i}^{(3)}(\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}}) = \frac{1}{h_i \lambda_i T_i} \sum_{j=0}^{A_{\text{СЧ}_i}^{(3)}} \left(1 - \sum_{k=0}^j \frac{(h_i \lambda_i T_i)^k}{k!} e^{-h_i \lambda_i T_i} \right), \quad (2.29)$$

где

T_i – периодичность пополнения запасов.

3) **Модель с пополнением запасов по уровню** предполагает, что расход начального запаса СЧ i -го типа $A_{\text{СЧ}_i}^{(3)}$ при устранении отказов производится до некоторого заданного порогового значения $a_{\text{СЧ}_i}^{(3)}$ с последующим формированием заявки на пополнение запасов этого типа компонентов объемом $(A_{\text{СЧ}_i}^{(3)} - a_{\text{СЧ}_i}^{(3)})$. Модель, как правило, применяется для недорогих запасных частей, для которых целесообразно осуществлять пополнение запасов достаточно большими партиями. В этом случае, зависимость для расчета $K\Gamma_{\text{МТО}_i}^{(3)}(\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}})$ запишем в следующем виде [75,80]:

$$K\Gamma_{\text{МТО}_i}^{(3)}(\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}}) = 1 - \frac{(h_i \lambda_i T_i)^{a_{\text{СЧ}_i}^{(3)}+2}}{(h_i \lambda_i T_i)^{a_{\text{СЧ}_i}^{(3)}+2} + (A_{\text{СЧ}_i}^{(3)} - a_{\text{СЧ}_i}^{(3)}) (1 + h_i \lambda_i T_i)^{a_{\text{СЧ}_i}^{(3)}+1}} \quad (2.30)$$

где

T_i – среднее время доставки запасных частей.

Непосредственно алгоритм определения параметров системы МТО на уровне 3 $\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}}$ представлен на рисунке 2.8, реализует метод градиентного спуска в многомерном пространстве и состоит из следующих шагов:

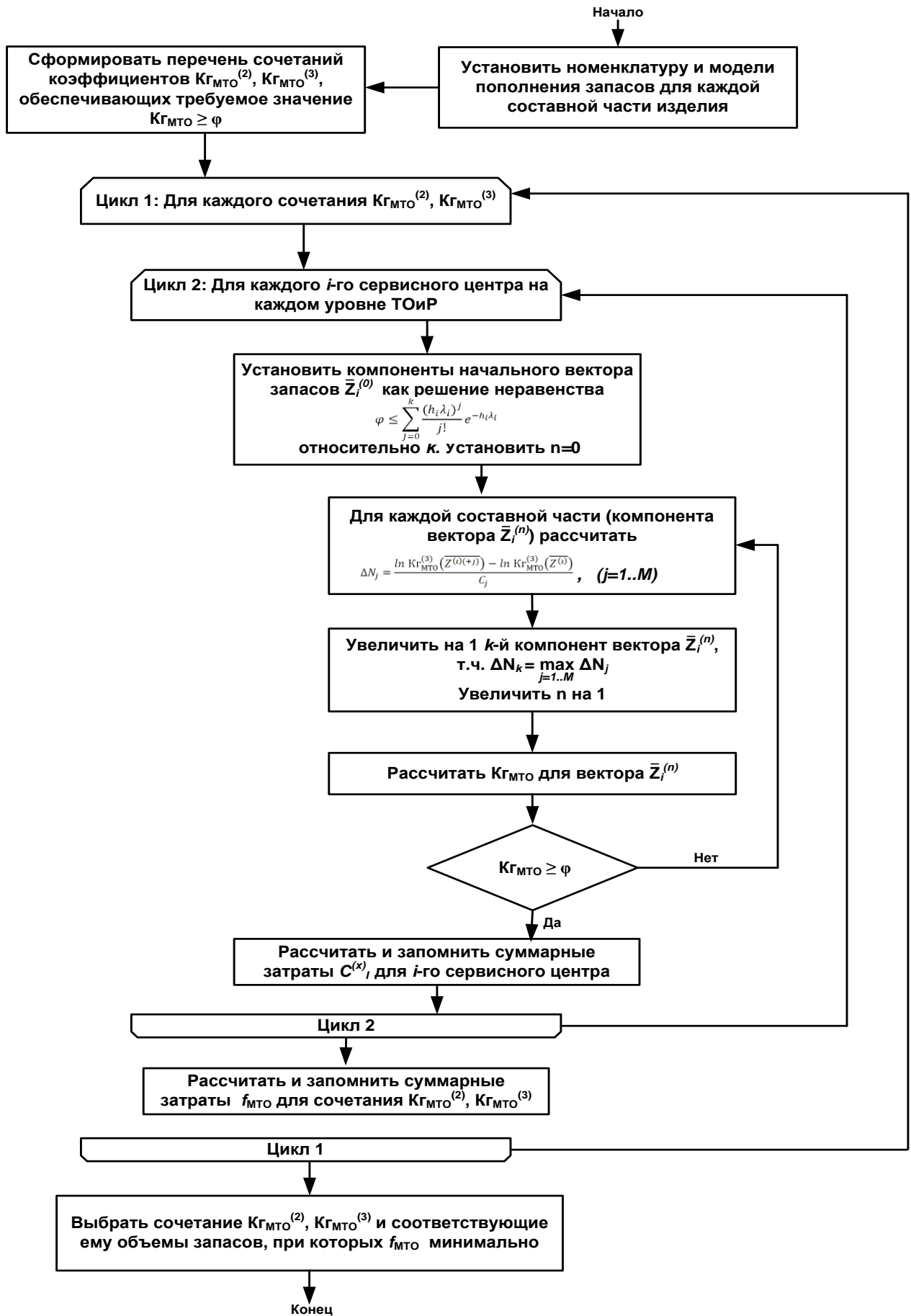


Рисунок 2.8. Алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы МТО

Шаг 0. Определяется начальный вектор $\overline{Z^{(0)}}$, в котором запасы всех типов запасных частей равны минимально допустимым значениям исходя из требуемого коэффициента готовности системы МТО φ . В [13,75,80] в качестве такого вектора предлагается взять вектор, в котором запасы всех типов СЧ равны 0. В рамках данного алгоритма, для ускорения его работы, предлагается взять в качестве начальной точки для выполнения градиентного спуска вектор, в котором объемы запасов каждого типа СЧ по отдельности обеспечивают коэффициент готовности φ .

Определить этот вектор можно приняв значение допустимого риска отсутствия каждой запасной части в момент, когда она необходима, равным $1 - \varphi$. Тогда значение компонент вектора $Z_i^{(0)}$, можно получить путем решения следующего неравенства [103,107] относительно k :

$$\varphi \leq \sum_{j=0}^k \frac{(h_i \lambda_i)^j}{j!} e^{-h_i \lambda_i} \quad (2.31)$$

В качестве k последовательно должны подставляться значения 0, 1, 2 и т.д., пока значение в правой части неравенства не станет больше φ . Найденное значение k устанавливается в качестве компонента $Z_i^{(0)}$ начального вектора $\overline{Z^{(0)}}$

Шаг i+1. На i+1 шаге рассматриваются вектора $\overline{Z^{(l)(+j)}}$, полученные путем увеличения величины запасов j -го типа запасных частей на единицу. Количество таких векторов будет равно количеству типов запасных частей $M^{(3)}$.

Для каждого j -го типа запасных частей рассчитывается значение:

$$\Delta N_j = \frac{\ln K_{\text{МТО}}^{(3)}(\overline{Z^{(l)(+j)}}) - \ln K_{\text{МТО}}^{(3)}(\overline{Z^{(l)}})}{C_j} \quad (2.32)$$

Так как в данном алгоритме, в отличие от предложенных в [13,75,80] алгоритмов, в качестве критерия оптимизации используются элементы суммарных затрат, зависящие от объема начальных запасов, величина C_j рассчитывается следующим образом:

Для 2-го уровня системы МТО:

$$C_j = C_{счj} + \frac{M_j}{1000} (L_{2 \rightarrow 3i} R_{2 \rightarrow 3i} + L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i}) + T_{с.с} \frac{C_{XPj}}{2} \quad (2.33)$$

Для 3-го уровня системы МТО:

$$C_j = C_{счj} + \frac{M_j}{1000} L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i} + T_{с.с} \frac{C_{XPj}}{2} \quad (2.34)$$

Значение вектора $\overline{Z^{(i+1)}}$ устанавливается равным значению вектора $\overline{Z^{(i)(+j)}}$ с таким индексом j , для которого величина ΔN_j максимальна.

После этого выполняется проверка условия $K\Gamma_{\text{МТО}}^{(3)}(\overline{Z^{(i+1)}}) \geq \varphi$. Если это условие выполняется, искомый вектор $\overline{A_{счi}}$ равен $\overline{Z^{(i+1)}}$ и алгоритм прекращает работу. В противном случае осуществляется переход на шаг $i+2$.

Далее, стоимость запаса на 3-м уровне системы МТО в i -м сервисном центре рассчитывается по формуле:

$$C_i^{(3)} = \sum_{j=1}^{M^{(3)}} C_j q_{счij} \quad (2.35)$$

где

$(q_{счi1}, \dots, q_{счiM^{(3)}}) = \overline{A_{счi}}$ – величины начального запаса каждого типа запасных частей.

Суммарные затраты, связанные с объемом начальных запасов, рассчитываются как сумма таких затрат для всех сервисных центров на 2-м и 3-м уровнях по формуле:

$$f_{\text{МТО}}(\bar{y}, \overline{A_{сч1}}, \dots, \overline{A_{счN_{сц}}}) = \sum_i^{N_{сц}^{(2)}} C_i^{(2)} + \sum_i^{N_{сц}^{(3)}} C_i^{(3)} \quad (2.36)$$

Проведя расчеты суммарных затрат на формирование запасов на 2-м и 3-м уровнях системы МТО для каждой комбинации $K\Gamma_{\text{МТО}}^{(2)}$ и $K\Gamma_{\text{МТО}}^{(3)}$, выбирается вариант с наименьшей величиной этих затрат и определяются соответствующие объемы запасов (параметры системы МТО) на каждом уровне.

2.5 Алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения и производственных мощностей региональных сервисных центров

В методике расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ в качестве расчетных параметров, кроме параметров многоуровневой системы МТО $\overline{A_{СЧ_i}}$, выступали данные о модели восстановления ремонтпригодных СЧ ВС в форме вектора $\bar{\gamma} = (\gamma_1, \dots, \gamma_{N_{СЧ}})$, компоненты которого определяют уровень ремонта для каждого типа СЧ. Этот вектор, по сути, должен представлять собой результат решения задачи выбора оптимального уровня, на котором каждая ремонтпригодная СЧ ВС восстанавливается путем замены входящих в ее состав узлов и агрегатов, настройки, регулировки и т.п. Такое распределение задач по уровням определяет, с одной стороны, номенклатуру и объемы запасных частей, которые необходимо хранить на каждом уровне, с другой стороны – состав пунктов по ремонту СЧ, которые должны быть развернуты в сервисных центрах.

Эта задача может быть сведена к задаче минимизации функции суммарных затрат:

$$\sum_{i=1}^N C_i(\bar{\gamma}, X) \rightarrow \min \quad (2.37)$$

при ограничениях, вытекающих из условий контракта жизненного цикла:

$$\begin{aligned} K_{ГМТО}(\bar{\gamma}, X) &\geq \varphi \\ I_{ИНФ}(\bar{\gamma}, X) &< \mu \end{aligned} \quad (2.38)$$

где

φ – требуемый коэффициент готовности системы МТО;

N – количество учитываемых статей затрат (в соответствии с ранее приведенной методикой - 13);

$C_i(\bar{\gamma})$ – величина i -й статьи затрат, рассчитываемая по приведенным в разделе 2.2 соотношениям;

$\bar{Y} = (Y_1, \dots, Y_{N_{\text{СЧ}}})$ – вектор, компоненты которого определяют уровень ремонта для каждой составной части ВС;

$I_{\text{ИНФ}}(\bar{Y})$ – функция затрат на инфраструктуру, рассчитываемая по приведенным в разделе 2.2 соотношениям и зависящая от принятых решений по распределению работ ремонту СЧ по уровням ремонта;

μ – предельная величина допустимых затрат на развертывание инфраструктуры сервисных центров.

В более общем виде, при более чем 2-х возможных уровнях ремонта СЧ ВС, задачу можно также представить как отыскание отображения $\omega: B \rightarrow L$, где $B = \{b_1, \dots, b_{N_{\text{СЧ}}}\}$ – множество СЧ ВС, $L = \{l_1, l_2\}$ – множество уровней ремонта. В текущей постановке рассматриваются два уровня ремонта: l_1 – ремонт в сервисном центре, l_2 – ремонт на заводе-изготовителе. Для целочисленного описания отображения ω введем матрицу двоичных переменных $U = (u_{ij})$, $i \in B, j \in L$, где $u_{ij} = 1$ означает, что ремонт i -й составной части ВС осуществляется на уровне j . При этом $\sum_{j \in L} u_{ij} = 1 \quad \forall i \in B$. Тогда постановку задачи можно также записать следующим образом:

$$\sum_{m=1}^N C_m(U, X) \rightarrow \min, \quad (2.39)$$

при ограничениях общего вида

$$K_{\text{ГМТО}}(U, X) \geq \varphi$$

$$I_{\text{ИНФ}}(U, X) < \mu$$

$$\sum_{j \in L} u_{ij} = 1 \quad \forall i \in B$$

и ограничениях на переменные

$$u_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, \forall j \in L$$

Для упрощения целевой функции в оптимизационной задаче, выберем из полного перечня статей затрат, приведенных в таблице 2.1, только те статьи, которые зависят от объема оборотного фонда запасных частей, распределения

работ по ремонту составных частей ВС по уровням, выполнения непланового ремонта. К этим статьям затрат относятся:

- затраты на создание инфраструктуры системы технической эксплуатации;
- затраты на приобретение оборотного фонда запасных частей;
- затраты на запасные части и расходные материалы, используемые при проведении непланового ТО;
- затраты на поддержание инфраструктуры системы ТЭ;
- затраты на транспортировку запасных частей;
- затраты на хранение запасных частей.

В этом случае, используя введенные в разделе 2.2 обозначения, задачу оптимизации параметров системы МТО можно записать следующим образом:

$$g(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ}}, \overline{A_{ХР}}) = I_{ИНФ} + I_{ЗЧ} + C_{НТО.ЗЧМ} + K_{ИНФ} + K_{ТрЗЧ} + K_{ХрЗЧ} \rightarrow \min \quad (2.40)$$

$$K_{ГМТО}(\bar{\gamma}, X) \geq \varphi$$

$$I_{ИНФ}(\bar{\gamma}, X) < \mu$$

Поставленная задача может быть отнесена к классу NP-полных задач комбинаторной оптимизации [47], для решения которых могут применяться следующие методы и алгоритмы [38]:

- полный перебор;
- метод ветвей и границ;
- методы динамического программирования;
- «жадный» алгоритм;
- генетические алгоритмы и др.

В то же время, применение для решения указанной задачи метода ветвей и границ или «жадного» алгоритма, требует нахождения зависимости для расчета «удельного веса» принятого решения о ремонте j -й составной части изделия в сервисном центре (т.е. $\gamma_j = 1$). «Удельный вес» при использовании данных методов оптимизации – это характеристика, отражающая технико-экономическую целесообразность принятия решения о ремонте j -й составной части изделия в сервисном центре.

«Удельный вес» σ_j рассчитывается как разница целевых функций (2.40) при ремонте j -й составной части изделия на заводе-изготовителе и в сервисном центре:

$$\sigma_j = g\left(\bar{Y}_{зи.j}, \overline{A_{счзи.j}}, \overline{A_{хрзи.j}}\right) - g\left(\bar{Y}_{сц.j}, \overline{A_{счсц.j}}, \overline{A_{хрсц.j}}\right) \quad (2.41)$$

где

$\bar{Y}_{зи.j}$ - вектор, компоненты которого определяют уровень ремонта для каждой составной части ВС, у которого значение j -го элемента равно 0;

$\bar{Y}_{сц.j}$ - вектор, компоненты которого определяют уровень ремонта для каждой составной части ВС, у которого значение j -го элемента равно 1;

$\overline{A_{счзи.j}}$ - вектор, компоненты которого определяют объемы начального МТО для вектора $\bar{Y}_{зи.j}$;

$\overline{A_{хрзи.j}}$ - вектор, компоненты которого определяют объемы хранения запасных частей для вектора $\bar{Y}_{зи.j}$;

$\overline{A_{счсц.j}}$ - вектор, компоненты которого определяют объемы начального МТО для вектора $\bar{Y}_{сц.j}$;

$\overline{A_{хрсц.j}}$ - вектор, компоненты которого определяют объемы хранения запасных частей для вектора $\bar{Y}_{сц.j}$.

Используя приведенные в разделе 2.2 формулы для расчета слагаемых целевой функции и проведя несложные математические преобразования, выражение (2.41) для расчета «удельного веса» σ_j можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_j = & q_{счij} \left(\frac{M_j}{500} L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i} + C_{счj} \right) + q_{хрj} c_{хрj} - I_{прj} (1 + \rho_{инфi}) + \\ & + N_{вс} T_{с.с} \tau_{год} n_j \lambda_j \times \\ & \times \left(\frac{M_j}{500} L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i} + (\rho_i - \rho_i^*) C_{счi} - \frac{m_j}{1000} L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i} \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

где

$q_{счij}$ - количество СЧ j -го типа, приобретаемых для i -го сервисного центра (определяется при помощи алгоритма, описанного в разделе 2.4);

M_j - масса j -й СЧ (в килограммах);

$L_{3 \rightarrow 4_i}$ - расстояние между уровнями 3 и 4 для i -го сервисного центра (в километрах);

$R_{3 \rightarrow 4_i}$ - стоимость тонно-километра транспортировки грузов между уровнями 3 и 4 для i -го сервисного центра;

$C_{СЧ_j}$ - стоимость одной СЧ j -го типа;

$q_{ХР_{ij}}$ - среднее количество хранимых СЧ j -го типа в i -м сервисном центре (определяется при помощи алгоритма, описанного в разделе 2.4);

$C_{ХР_j}$ - средняя годовая стоимость хранения одной запасной части j -го типа;

$I_{ПР_j}$ - стоимость создания в сервисном центре пункта по ремонту j -го типа СЧ ВС;

$\rho_{ИНФ_i}$ - доля суммарных годовых затрат на поддержание i -го сервисного центра от затрат на его создание;

$N_{ВС}$ - количество ВС в эксплуатируемом парке;

$T_{с.с}$ - срок службы ВС в годах;

$\tau_{год}$ - средняя наработка 1-го ВС в год, выраженная в летных часах;

n_j - количество СЧ i -го типа в составе ВС;

λ_j - интенсивность отказов СЧ i -го типа в составе ВС;

ρ_i - доля стоимости ремонта СЧ i -го типа на заводе-изготовителе от ее цены;

ρ_i^* - доля стоимости ремонта СЧ i -го типа в сервисном центре от ее цены;

m_j - средняя масса компонентов, необходимых для ремонта j -й СЧ в региональном сервисном центре (в килограммах).

Удельный вес σ_j отражает разницу между затратами при использовании сервисного центра исключительно как промежуточного склада для хранения j -го типа составных частей с их ремонтом на заводе-изготовителе, и затратами на создание в сервисном центре ремонтной инфраструктуры, склада компонентов для ремонта составных частей и выполнение ремонтов до выработки назначенного ресурса изделия.

Используя выражение (2.42), для решения оптимизационной задачи (2.37) будем использовать «жадный» алгоритм, рассчитав удельный вес σ_j для каждой составной части и приняв решение о создании в сервисном центре инфраструктуры для ремонта составных частей, для которых $\sigma_j > 0$ при суммарной стоимости ремонтной инфраструктуры меньшей μ . Алгоритм такого решения задачи оптимизации представлен на рисунке 2.9.

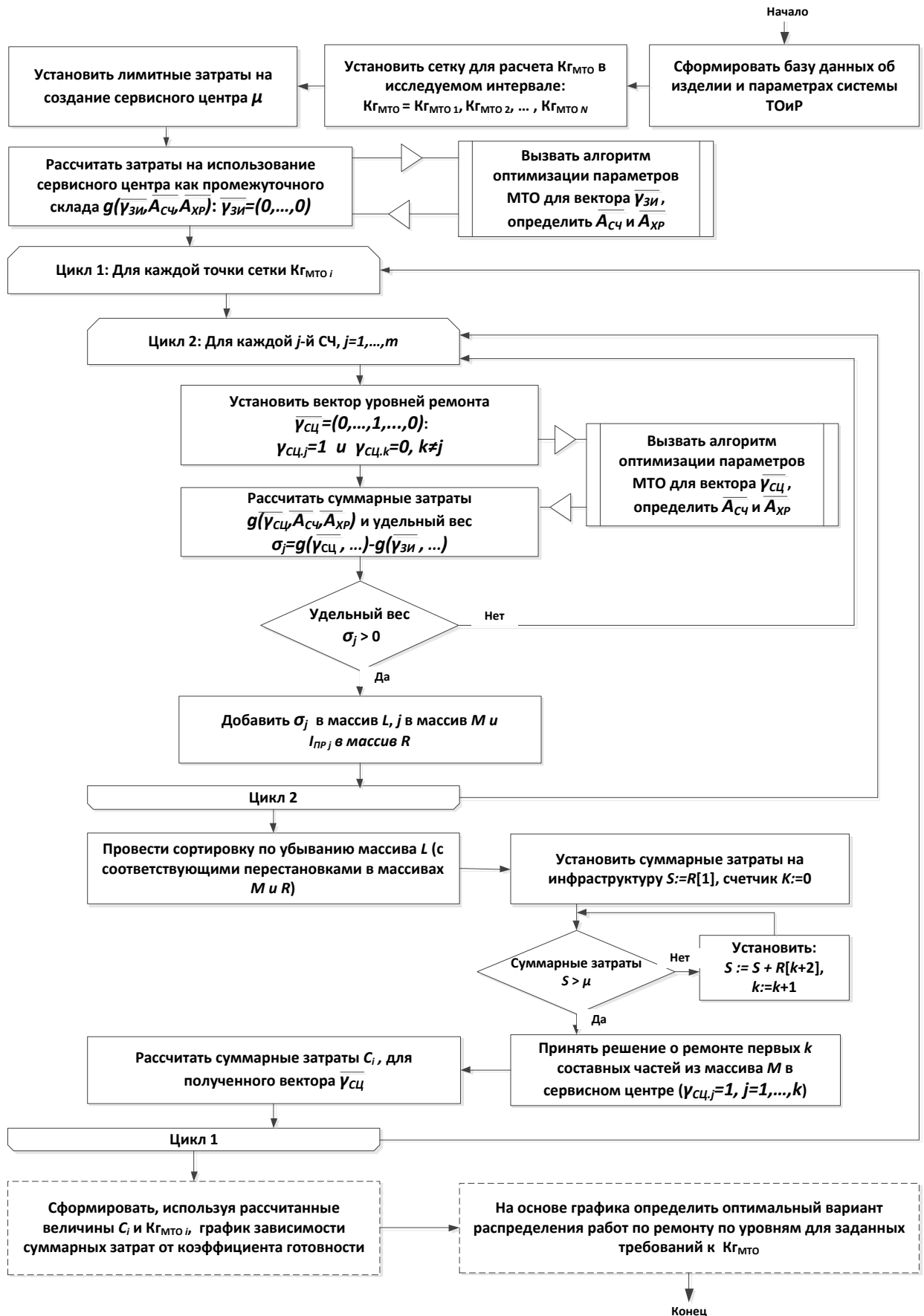


Рисунок 2.9. Алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения и производственных мощностей региональных сервисных центров

Таким образом, предлагается следующий порядок решения задачи совместной оптимизации параметров многоуровневой системы МТО и производственных мощностей:

1) Формирование массива исходных данных в форме базы данных, построенной в соответствии с приведенной в разделе 2.3 информационной моделью.

2) Последовательное, для различных требований к $K_{ГМТО}$, решение на массиве исходных данных оптимизационной задачи (2.37). Следует отметить, что данная задача сводится к классической задаче комбинаторной оптимизации «РЮКЗАК 0-1», имеющей сложность $O(n \log n)$ [52]. Соответственно, для ее решения в данном случае целесообразно применить жадный алгоритм (т.к. затраты на применение точных методов решения для задач такой размерности неприемлемы), включающий в себя следующие шаги:

- расчет для каждого типа СЧ, ремонт которого может осуществляться в сервисном центре, «удельного веса» σ_j как разности функции суммарных затрат при использовании сервисного центра исключительно как промежуточного склада и при его использовании для ремонта данного типа СЧ по формуле (2.42);

- формирование для всех СЧ, для которых значение $\sigma_j > 0$, трех массивов: массива L с величинами «удельных весов», массива M с номерами СЧ и массива R со стоимостью инфраструктуры по ремонту СЧ;

- сортировка массива L по убыванию с соответствующими перестановками в массивах M и R ;

- выбор из массива R первых n элементов, сумма которых меньше, чем величина лимитных затрат на инфраструктуру сервисного центра μ ;

- формирование вектора $\overline{Y_{СЧ}}$ (матрицы U в постановке (2.39)), у которого значения элементов с номерами из первых n компонентов массива M равны 1, а значения остальных элементов равны 0 ($u_{ij} = 1$ если $i \in \{m_1, \dots, m_n\}$ и $j = l_1$, или если $i \notin \{m_1, \dots, m_n\}$ и $j = l_2$; и $u_{ij} = 0$ в противном случае).

– расчет величины суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации C_i для вектора $\overline{Y_{\text{СЦ}}}$ по формулам, приведенным в разделе 2.2.

3) Формирование, при необходимости, по результатам решения оптимизационной задачи (2.37) графиков зависимостей затрат на обеспечение технической эксплуатации от величины $K_{\text{ГМТО}}$.

4) Определение на основе графиков диапазонов значений $K_{\text{ГМТО}}$, для которых оптимальным будет являться тот или иной вариант распределения работ по уровням ГОиР.

Решение указанной задачи предполагает использование больших объемов исходных данных, что обуславливает необходимость применения специальных средств автоматизации вычислений и базы данных, содержащей достоверные сведения об изделии, его составных частях, их компонентах, местах базирования и сценариях применения изделий по назначению. Информационная модель такой базы данных описана в разделе 2.3., а описание программного комплекса, реализующего представленную информационную модель и алгоритмы, приведено в главе 3.

2.6 Выводы

Выполненные в данной главе исследования и разработки позволяют сформулировать следующие выводы и определить направления дальнейшего исследования:

1) В поставленной в главе 1 задаче критерием оптимизации являются суммарные затраты на обеспечение ТЭ регионального парка ВС. Приведенные в разделах 2.1 и 2.2 модель системы МТО и методика расчета охватывают все компоненты затрат, включая начальные затраты – на развертывание региональных сервисных центров, создание складов запасных частей, оснащение сервисных центров необходимым оборудованием, а также периодические затраты

– на выполнение работ по ТО, на приобретение, транспортировку и хранение запасных частей и материалов, на ремонт компонентов ВС в сервисных центрах и на заводах-изготовителях.

2) В силу большого количества исходных параметров для расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ, все исходные данные и результаты расчетов должны храниться в виде структурированного хранилища информации в составе базы данных АЛП. Приведенная в разделе 2.3 информационная модель обеспечивает такое хранение данных, а также обеспечивает возможность автоматизированной обработки этой информации при помощи программных средств.

3) В разработанной информационной модели важнейшими атрибутами, определяющими величину суммарных затрат на обеспечение ТЭ, являются параметры системы МТО и параметры, определяющие производственные мощности региональных сервисных центров.

4) Определение оптимальных параметров многоуровневой системы МТО может осуществляться на основе алгоритма, реализующего метод оптимизации объемов начальных запасов имущества этой системе. Разработанный алгоритм в качестве критерия оптимизации использует суммарную величину затрат на ТЭ в течение всего срока службы ВС, в том числе затрат на создание и пополнение ремонтных комплектов при организации ремонта СЧ ВС в региональных сервисных центрах. Особенностью предложенного алгоритма является возможность поиска оптимальных параметров системы МТО для длительного периода эксплуатации, в течение которого различные компоненты затрат (хранение, транспортировка и т.п.) могут оказывать различный вклад в их общую величину.

5) Определение оптимальных производственных мощностей сервисных центров может осуществляться на основе алгоритма, одновременно обеспечивающего выбор оптимального уровня ремонта СЧ ВС и оптимизацию параметров системы МТО. Предложенный алгоритм отличается возможностью поиска рационального баланса между формированием достаточного объема запасов и развертыванием производственных мощностей по ремонту СЧ ВС в

региональных сервисных центрах при заданных требованиях к величине коэффициента эксплуатационной готовности и ограничений на затраты на инфраструктуру.

3 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНО- ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО АПРОБАЦИИ

3.1 Программный комплекс синтеза многоуровневой системы материально-технического обеспечения

Разработанные метод и алгоритмы были реализованы в специальном программном комплексе (программе) ILS Suite [4], а также КИЛП-ПЗТО и КИЛП-МТО [2,3]. Программа ILS Suite является дальнейшим развитием программы для решения задач анализа логистической поддержки LSA Suite, разработанной, в том числе, Е.В.Чубаровой [57]. Такая преемственность программ позволила использовать ранее разработанные информационные модели анализа логистической поддержки, дополнив их сущностями и атрибутами для решения задач синтеза системы МТО.

Функциональность программного комплекса ILS Suite позволяет решать следующие задачи:

1) Формирование логистической структуры изделия в базе данных АЛП, то есть структуры изделия с точностью до заменяемой в эксплуатации составной части.

2) Формирование логистической структуры функций, выполняемых изделием, его системами и агрегатами. Установление взаимосвязей между логистической структурой изделия и логистической структурой функций.

3) Проведение анализа видов, последствий и критичности отказов. На этом этапе программа позволяет описать в базе данных АЛП функциональные (связанные с невыполнением заданных функций) виды отказов систем изделия и конструктивные виды отказов его составных частей, а также описать причинно-

следственные связи между конструктивными и функциональными видами отказов.

4) Проведение работ по планированию ТОиР на этапе разработки. На данном этапе программа позволяет определять категорию последствий функциональных видов отказов в автоматизированном режиме, а также, в зависимости от выбранной категории, осуществлять выбор состава работ планового технического обслуживания на основе формальной методики RCM [44]. В результате в базе данных АЛП формируется перечень работ планового технического обслуживания.

5) Подготовка в электронном виде регламента технического обслуживания и технологических карт. Регламент формируется в программе на основе ранее подготовленного перечня работ планового обслуживания путем объединения работ, выполняемых с одинаковой периодичностью и/или в одной зоне изделия. Для каждой регламентной работы в базе данных описывается технология ее выполнения (выполняемые операции), а также необходимые для выполнения работы контрольно-проверочная аппаратура, инструмент, приспособления, расходные материалы и персонал (с указанием трудоемкости и продолжительности выполнения работы).

6) Описание сценариев эксплуатации парка изделий, включающих в себя среднюю годовую наработку изделия и его составных частей в разных единицах измерения (часы полета, посадки, включения, срабатывания и т.п.).

7) Распределение работ по ремонту составных частей изделия по уровням ремонта для тех составных частей, место ремонта которых заранее определено и не является предметом оптимизации.

8) Описание мест базирования изделий и вариантов размещения инфраструктуры системы ТЭ.

9) Оптимизация параметров материально-технического обеспечения (начальные объемы запасов) и структуры системы МТО (состава пунктов по ремонту составных частей изделия в региональных сервисных центрах и количество ремонтных ячеек в них).

10) Формирование отчетной информации в форме файлов-отчетов для пакета Microsoft Excel.

Структура программного комплекса ILS Suite (перечень программных компонентов) представлена на рисунке 3.1.

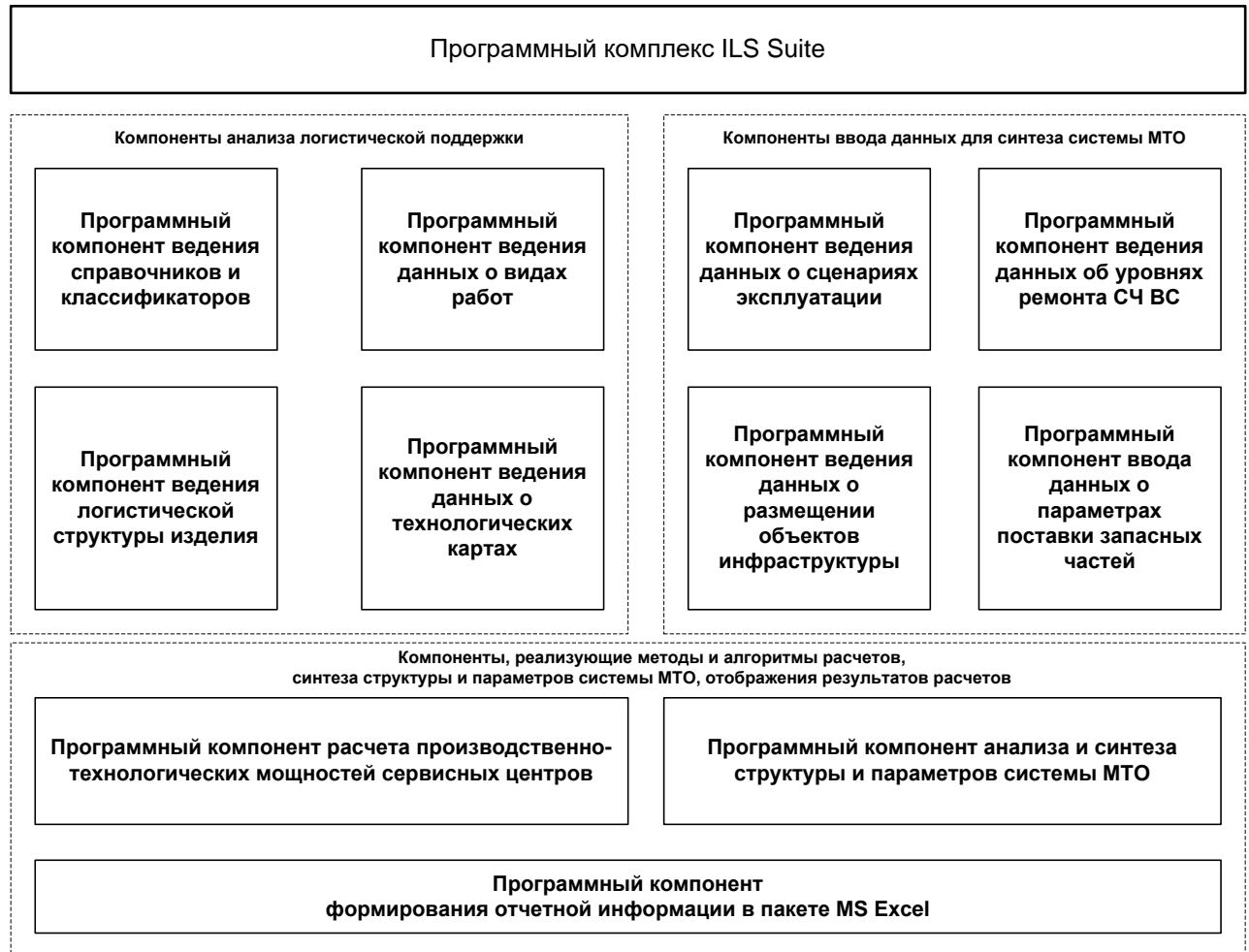


Рисунок 3.1. Структура программного комплекса ILS Suite

Программный комплекс ILS Suite состоит из совокупности программных компонентов, которые можно разделить на три группы:

1) Программные компоненты для решения задач анализа логистической поддержки: компоненты ведения справочников и классификаторов, компонент для формирования (ведения) логистической структуры изделия, компонент для ведения данных о видах работ по ТО и компонент для ведения данных о связанных с видами работ по ТО технологических картах.

2) Компоненты для ввода данных, необходимых для последующего синтеза системы МТО: компонент для ведения данных о сценариях эксплуатации ВС (как

правило, налет и количество взлетов и посадок в год), компонент для ведения данных об уровнях ремонта СЧ ВС (для тех СЧ, для которых этот уровень задается), компонент для ввода данных о параметрах поставки запасных частей, а также основной компонент для ведения данных о размещении объектов инфраструктуры.

3) Компоненты, решающие описанные в главе 2 оптимизационные задачи и, таким образом, определяющие наилучшую структуру и параметры системы МТО: компонент для расчета производственно-технологических мощностей сервисных центров, компонент анализа и синтеза структуры и параметров системы МТО и компонент, осуществляющий формирование отчетной информации по результатам расчетов в виде файлов Microsoft Excel.

Внешний вид окон пользовательского интерфейса компонента ведения справочников и компонента ведения логистической структуры изделия приведен на рисунке 3.2.

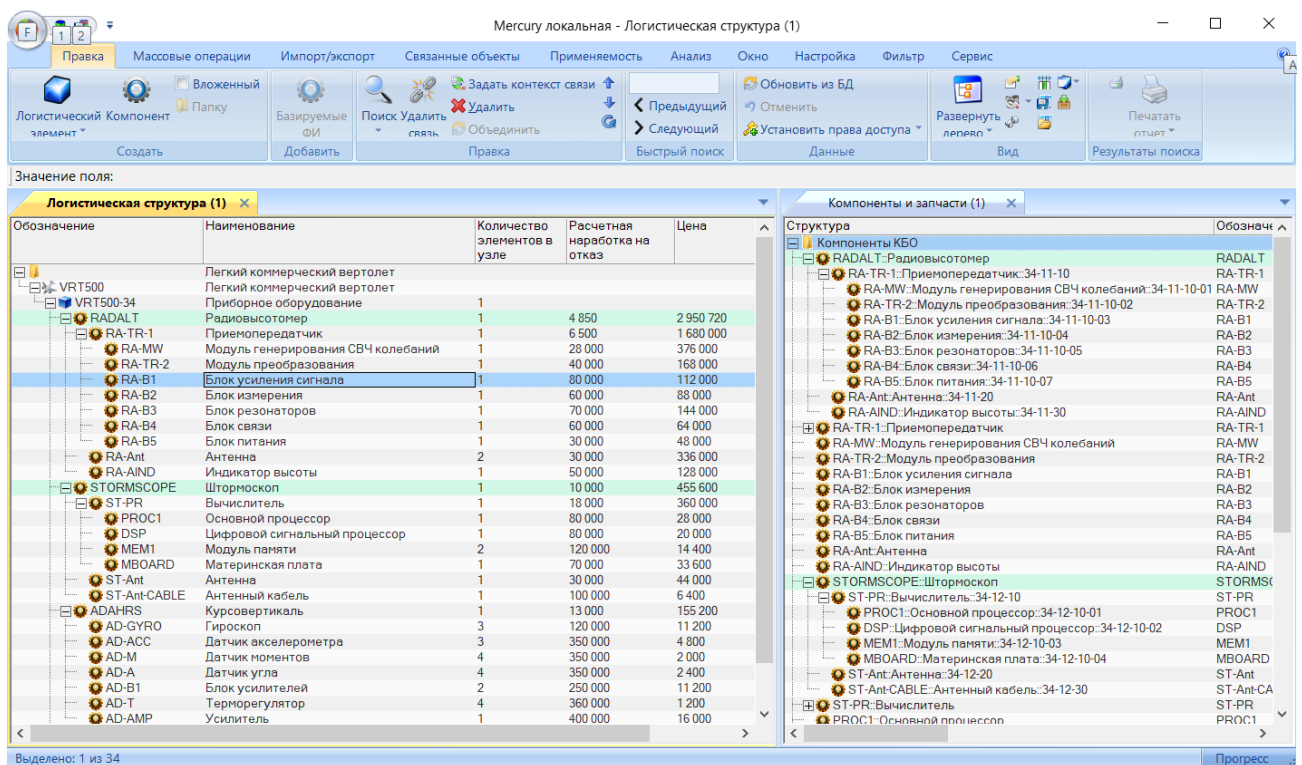


Рисунок 3.2. Компоненты ведения логистической структуры, справочников и классификаторов

В правой части окна отображается перечень и параметры всех компонентов, из которых может быть сформирована логистическая структура, с возможностью добавления компонентов и их импорта из внешних информационных систем, а в левой части окна отображается непосредственно логистическая структура ВС (или его функциональных систем).

Непосредственно формирование логистической структуры осуществляется путем перетаскивания необходимых компонентов из перечня в окно ведения логистической структуры.

Внешний вид окон пользовательского интерфейса компонентов ведения данных о видах работ планового ТОиР и технологических картах приведен на рисунке 3.3.

The screenshot shows a software window titled "Mercury локальная - Виды ТО (1)". The interface includes a menu bar with options like "Правка", "Импорт/экспорт", "Массовые операции", "Связанные объекты", "Окно", "Настройка", and "Фильтр". Below the menu is a toolbar with icons for "Технологическая карта" (Create), "Поиск", "Выполняется для логистического элемента" (Edit), "Выполняется для места установки" (Edit), "Печатать отчет", "Быстрый поиск", "Обновить из БД", "Отменить", "Установить права доступа", and "Вид".

The main area displays a table of maintenance types. The table has columns: Структура, Обозначение, Наименование, Вид ТО, Условие выполнения, DMC Check, Тип ФИ, and Компонент. The following table represents the data shown in the screenshot:

| Структура | Обозначение | Наименование | Вид ТО | Условие выполнения | DMC Check | Тип ФИ | Компонент |
|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|-----------|---------------------|-----------|
| Неклассифицирован... | Неклассифицированные | Неклассифицированные | | | | | |
| ПР | ПР | Периодические работы | Периодическое ТО | | | | |
| 100 | 100 | 100-часовые работы | Периодическое ТО | | | VRT500 : Легкий ... | |
| 150 | 150 | 150-часовые работы | Периодическое ТО | | | VRT500 : Легкий ... | |
| 200 | 200 | 200-часовые работы | Периодическое ТО | | | VRT500 : Легкий ... | |
| 300 | 300 | 300-часовые работы | Периодическое ТО | | | VRT500 : Легкий ... | |
| 50 | 50 | 50-часовые работы | Периодическое ТО | | | VRT500 : Легкий ... | |
| РСЦ | РСЦ | Текущий ремонт | Неплановый ремонт | | | VRT500 : Легкий ... | |

Below the table, there is a section titled "Технологические карты для 200" which contains a table of technological cards. The table has columns: Наименование, Среднее время выполнения, мин, and Информ. код. The following table represents the data shown in the screenshot:

| Наименование | Среднее время выполнения, мин | Информ. код |
|--|-------------------------------|-------------|
| Проверка на объекте функционирования по высокой частоте от имитатора | 120 | Нет |
| Проверка надежности крепежа преобразователя сигналов | 60 | Нет |
| Проверка параметров изделия прибором ИК (на вертолете) | 45 | Нет |
| Проверка переходного сопротивления в месте установки блока ПВ | 120 | Нет |
| Проверка работоспособности аппаратуры навигации и посадки | 180 | Нет |
| Проверка работоспособности без снятия с объекта в режиме "ТЕСТ-контроль" | 30 | Нет |

At the bottom of the window, it shows "Объектов в таблице: 6" and a "Прогресс" indicator.

Рисунок 3.3. Компоненты ведения данных о видах работ и технологических картах

В верхней части окна отображается перечень и параметры всех видов работ по ТОиР, выполняемых на ВС. Этот перечень, как правило, соответствует

перечню видов работ планового ТО, перечисленных в регламенте технического обслуживания. В нижней части окна для выбранного вида работ по ТО отображается перечень технологических карт, в соответствии с которыми выполняются работы по техническому обслуживанию.

Для каждой технологической карты указываются:

- 1) Перечень операций, выполняемых при выполнении работы.
- 2) Нормативная трудоемкость выполнения работы (в человеко-минутах).
- 3) Нормативная продолжительность выполнения работы (в минутах).
- 4) Используемые при выполнении работ вспомогательное оборудование, инструмент и приспособления.

5) Расходуемые в ходе выполнения работы материалы и запасные части, включая расходуемое количество и единицы измерения количества материала.

Программный компонент ведения данных о сценариях эксплуатации ВС позволяет вносить в базу данных сведения о типовых циклах применения ВС по назначению и количеству циклов, выполняемых в год. Каждый из типовых циклов характеризуется продолжительностью полета и наработкой оборудования ВС (для изделий с индивидуальным учетом наработки).

С каждым типом ВС может быть связано несколько возможных сценариев его применения по назначению. Кроме этого, программный компонент позволяет ассоциировать со сценарием введенные ранее виды работ по ТО в случае, если отдельные виды работ выполняются только при эксплуатации изделия по определенному сценарию (например, для ВС, находящихся на хранении).

Программный компонент для ведения данных о параметрах поставки обеспечивает ввод сведений о СЧ ВС, необходимых для последующего расчета затрат на приобретение (ремонт на заводе-изготовителе), хранение, транспортирование. Внешний вид окна пользовательского интерфейса компонента ведения данных о параметрах поставки приведен на рисунке 3.4.

Mercury LCM - Mercury локальная - Предметы поставки

Правка Массовые операции Импорт/экспорт Связанные объекты Применяемость Анализ Окно Настройка Фильтр Выбор задачи

Логистический элемент Папку Базируемые ФИ Поиск Удалить связь ПечатаТЬ отпарт Быстрый поиск Обновить из БД Отменить Установить права доступа Развернуть левую Вид

Значение поля:

Предметы поставки

| Структура | Обозначение | Наименование | Цена | Валюта цены | Доля стоимости ремонта |
|--|--------------|------------------------------------|-----------|-------------|------------------------|
| Легкий коммерческий вертолет | | Легкий коммерческий вертолет | | | |
| VRT500: Легкий коммерческий вертолет | VRT500 | Легкий коммерческий вертолет | | Не задано | |
| 34- Приборное оборудование: VRT500-34 | VRT500-34 | Приборное оборудование | | Не задано | |
| RADALT: Радиовысотомер: 34-11 | RADALT | Радиовысотомер | 2 950 720 | RUB | 0,4 |
| RA-TR-1: Приемопередатчик: 34-11-10 | RA-TR-1 | Приемопередатчик | 1 680 000 | RUB | 0,4 |
| RA-MW: Модуль генерирования СВЧ колебаний: 34-11-10-02 | RA-MW | Модуль генерирования СВЧ колебаний | 376 000 | RUB | |
| RA-TR-2: Модуль преобразования: 34-11-10-02 | RA-TR-2 | Модуль преобразования | 168 000 | RUB | |
| RA-B1: Блок усиления сигнала: 34-11-10-03 | RA-B1 | Блок усиления сигнала | 112 000 | RUB | |
| RA-B2: Блок измерения: 34-11-10-04 | RA-B2 | Блок измерения | 88 000 | RUB | |
| RA-B3: Блок резонаторов: 34-11-10-05 | RA-B3 | Блок резонаторов | 144 000 | RUB | |
| RA-B4: Блок связи: 34-11-10-06 | RA-B4 | Блок связи | 64 000 | RUB | |
| RA-B5: Блок питания: 34-11-10-07 | RA-B5 | Блок питания | 48 000 | RUB | |
| RA-Ant: Антенна: 34-11-20 | RA-Ant | Антенна | 336 000 | RUB | |
| RA-AIND: Индикатор высоты: 34-11-30 | RA-AIND | Индикатор высоты | 128 000 | RUB | |
| STORMSCOPE: Штормоскоп: 34-12 | STORMSCOPE | Штормоскоп | 455 600 | RUB | 0,4 |
| ST-PR: Вычислитель: 34-12-10 | ST-PR | Вычислитель | 360 000 | RUB | 0,4 |
| PROC1: Основной процессор: 34-12-10-01 | PROC1 | Основной процессор | 28 000 | RUB | |
| DSP: Цифровой сигнальный процессор: 34-12-10-02 | DSP | Цифровой сигнальный процессор | 20 000 | RUB | |
| MEM1: Модуль памяти: 34-12-10-03 | MEM1 | Модуль памяти | 14 400 | RUB | |
| MBOARD: Материнская плата: 34-12-10-04 | MBOARD | Материнская плата | 33 600 | RUB | |
| ST-Ant: Антенна: 34-12-20 | ST-Ant | Антенна | 44 000 | RUB | |
| ST-Ant-CABLE: Антенный кабель: 34-12-30 | ST-Ant-CABLE | Антенный кабель | 6 400 | RUB | |
| ADAHRS: Курсовертикаль: 34-13 | ADAHRS | Курсовертикаль | 155 200 | RUB | 0,4 |
| AD-GYRO: Гироскоп: 34-13-10 | AD-GYRO | Гироскоп | 11 200 | RUB | |
| AD-ACC: Датчик акселерометра: 34-13-20 | AD-ACC | Датчик акселерометра | 4 800 | RUB | |
| AD-M: Датчик моментов: 34-13-30 | AD-M | Датчик моментов | 2 000 | RUB | |
| AD-A: Датчик угла: 34-13-40 | AD-A | Датчик угла | 2 400 | RUB | |
| AD-B1: Блок усилителей: 34-13-50 | AD-B1 | Блок усилителей | 11 200 | RUB | |
| AD-T: Терморегулятор: 34-13-60 | AD-T | Терморегулятор | 1 200 | RUB | |

Объектов в таблице: 34

Прогресс

Рисунок 3.4. Компонент ведения данных о параметрах поставки

Для каждой СЧ, являющейся предметом поставки (запасной частью ВС), компонент позволяет вводить следующие данные:

- 1) Цена новой составной части.
- 2) Средняя доля стоимости ремонта от цены нового изделия (в случае, если ремонт производится на заводе-изготовителе).
- 3) Модель пополнения запасов: непрерывная, периодическая или пополнение по уровню.
- 3) Периодичность выполнения поставок (параметры модели пополнения).
- 4) Поставщик составной части.
- 5) Средняя продолжительность ремонта в днях.
- 6) Масса составной части в упаковке;
- 7) Размер минимальной партии поставки.
- 8) Средняя стоимость хранения составной части в год (с учетом проведения ТО при хранении).

Перечень предметов поставки отображается в окне в виде таблицы с возможностью редактирования отдельных полей.

Программный компонент ведения данных об уровнях ремонта СЧ ВС обеспечивает ввод данных о том, на каком уровне производится ремонт СЧ ВС. Ввод этих данных производится только для тех СЧ, для которых место их ремонта заранее определено. В программном компоненте заранее predeterminedены 4 уровня ТОиР, используемые при технической эксплуатации авиационной техники:

- 1-й уровень – линейная станция по ТО;
- 2-й уровень – авиационно-техническая база;
- 3-й уровень – региональный сервисный центр;
- 4-й уровень – завод-изготовитель СЧ (или ремонтное предприятие).

Внешний вид окна пользовательского интерфейса компонента ведения данных об уровнях ремонта СЧ ВС приведен на рисунке 3.5.

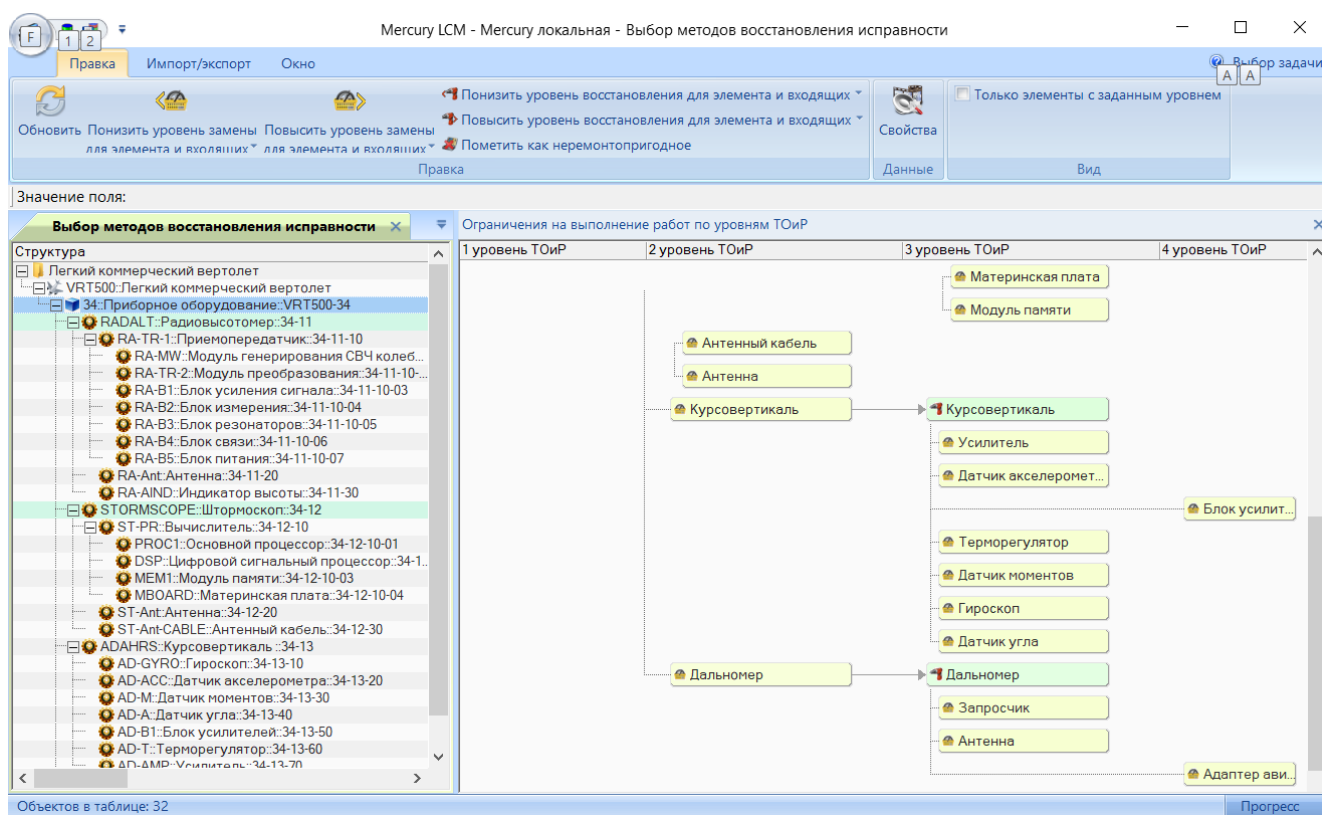


Рисунок 3.5. Компонент ведения данных об уровнях ремонта СЧ ВС

В левой части окна отображается логистическая структура ВС. Для выбранных элементов в правой части окна визуальное отображается распределение СЧ по уровням ТОиР.

При этом элементы логистической структуры верхнего уровня разукрупнения (крупные агрегаты), как правило, могут быть демонтированы с ВС и частично диагностированы в авиационно-технической базе и, соответственно, в окне программного компонента отображаются во втором столбце. Составные части этих агрегатов далее могут быть направлены в ремонт на 3-й (сервисный центр) или 4-й (завод-изготовитель) уровень. В окне программного компонента при этом визуальное отображается как структура сборки, так и место ремонта ее СЧ (в соответствующих уровню ремонта столбцах).

Для тех СЧ, для которых уровень ремонта определяется в результате решения оптимизационной задачи, описанной в главе 2, уровни ремонта отображаются после выполнения синтеза в соответствующих столбцах таблицы в окне программного компонента.

Программный компонент ведения данных о размещении объектов инфраструктуры обеспечивает визуальное представление мест базирования этих объектов (авиационно-технических баз, сервисных центров) и логистических потоков между ними. Внешний вид окна пользовательского интерфейса компонента ведения данных о размещении объектов инфраструктуры приведен на рисунке 3.6.

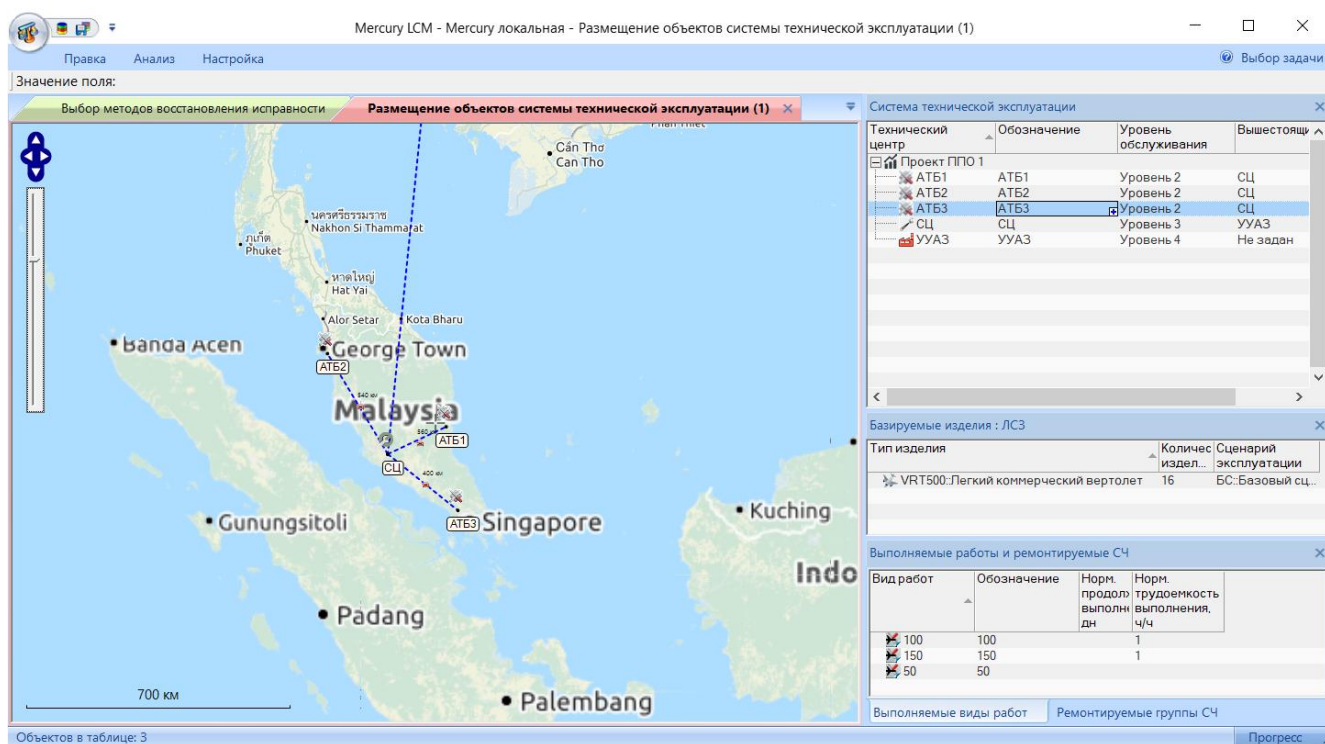


Рисунок 3.6. Компонент ведения данных о размещении объектов инфраструктуры

В правой верхней части окна программного компонента отображаются проекты (варианты) размещения объектов инфраструктуры. Для одного парка ВС в программе может быть задано несколько вариантов размещения объектов инфраструктуры, например, при развертывании в месте эксплуатации сервисного центра для ремонта СЧ ВС или при организации ремонта только силами заводоизготовителей. При последующем расчете программа определит наилучший из заданных вариантов размещения объектов инфраструктуры.

В левой части окна программного компонента отображается карта мира, на которую могут быть помещены отметки о местоположении объектов инфраструктуры.

Для каждого объекта инфраструктуры осуществляется ввод следующих параметров:

- 1) Наименование и обозначение объекта инфраструктуры.
- 2) Тип объекта инфраструктуры (уровень ТОиР): завод-изготовитель, сервисный центр или авиационно-техническая база (первый уровень ТОиР в данной программе не рассматривается).

3) Вышестоящий объект инфраструктуры – объект инфраструктуры, из которого осуществляется поставка запасных частей в заданный объект. Таким образом, в программе может быть задана многоуровневая система МТО, предполагающая наличие промежуточных складов запасных частей. В окне программного компонента логистические потоки отображаются пунктирной линией на карте.

4) Способ транспортировки запасных частей между объектами инфраструктуры. В программе предусмотрены четыре способа транспортировки: автомобильным, железнодорожным, морским и воздушным транспортом. Для каждого способа транспортировки в каждый объект инфраструктуры вводится также стоимость тонно-километра перевозки груза данными видом транспорта в данном регионе.

5) Величина единовременных (начальных) затрат на развертывание объекта инфраструктуры и ежегодных затрат на поддержание объекта инфраструктуры.

6) Периодичность пополнения запасов из вышестоящего объекта инфраструктуры (при использовании периодической модели пополнения запасов).

Кроме этого, в правой части окна программного компонента для объектов 2-го уровня отображается парк ВС, техническое обслуживание и ремонт которых осуществляется в данном объекте инфраструктуры. Указываются типы ВС, их количество и сценарии эксплуатации.

В правой нижней части окна программного компонента для объектов 2-го и 3-го уровня отображаются виды работ по ТОиР, которые выполняются в данном объекте инфраструктуры.

Три основных программных компонента - расчета производственно-технологических мощностей сервисных центров, анализа и синтеза структуры и параметров системы МТО, формирования отчетной информации – объединены в единый модуль, выполняющий расчеты и отображающий их результаты в программе Microsoft Excel. Этот модуль позволяет формировать следующие основные отчеты:

1) Отчет о суммарных затратах на обеспечение технической эксплуатации парка ВС в течение заданного периода времени.

2) Отчет о структуре затрат на обеспечение технической эксплуатации парка ВС.

3) Отчет, отражающий зависимость суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации от величины коэффициента эксплуатационной готовности парка ВС.

4) Отчет, содержащий сведения об оптимальном составе пунктов по ремонту СЧ ВС в сервисных центрах и количестве ремонтных ячеек.

5) Отчет об оптимальной величине начального запаса запасных частей в местах хранения.

Форма отчета о величине суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации парка ВС представлена на рисунке 3.7. Левая часть отчета содержит сведения о количестве эксплуатируемых изделий, сценариях их эксплуатации и, соответственно, планируемом налете, периоде расчета, принятой в расчетах стоимости нормо-часа работ инженерно-технического персонала.

| Исходные данные для расчета | | Результаты расчета | |
|------------------------------------|--------------|---|-----------|
| Проект ППО: | Проект ППО-1 | | |
| Общее количество изделий: | 54 | Суммарные затраты | |
| Сценарии эксплуатации: | | Суммарные затраты за 10 лет, тыс.руб: | 8 431 409 |
| Сценарий 1 (налет 300 часов в год) | | Удельные затраты (тыс.руб.) в расчете на: | |
| Количество изделий: | 30 | одно изделие в год: | 15 613 |
| Наработка, л.ч./год: | 300 | один летный час: | 40 |
| Наработка, ч/год: | - | один час работы: | - |
| Сценарий 2 (налет 500 часов в год) | | Структура затрат в приложении | |
| Количество изделий: | 24 | Готовность | |
| Наработка, л.ч/год: | 500 | Кoeffициент эксплуатационной готовности: | 0,8055 |
| Наработка, ч/год: | - | Кoeffициент планируемого применения: | 0,9421 |
| Стоимость нормочаса, руб: | 500 | Кoeffициент собственной готовности: | 0,9500 |
| Рентабельность, %: | 20 | Кoeffициент готовности системы МТО: | 0,9000 |
| Период расчета, лет: | 10 | | |
| Показатели надежности: | Расчетные | | |

Рисунок 3.7. Отчет о суммарных затратах на обеспечение технической эксплуатации

В правой части отчета отображаются:

– величина суммарных затрат за рассматриваемый период;

– удельные затраты за рассматриваемый период, приведенные к часу налета ВС и в расчете на одно изделие в год;

– рассчитанные величины показателей готовности: коэффициента планируемого применения, коэффициента готовности и коэффициента готовности системы МТО;

– рассчитанная величина коэффициента эксплуатационной готовности.

Форма отчета о структуре затрат на обеспечение технической эксплуатации парка ВС приведена на рисунке 3.8.

Отчет представлен в виде таблицы, в столбцах которой перечислены уровни, а в строках - статьи затрат в соответствии с предложенным методом оценки суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации (некоторые из статей сгруппированы для удобства представления и анализа).

В полях таблицы отображаются расчетные величины затрат по конкретной статье затрат на определенном уровне ТОиР.

| Начальные затраты, тыс.руб | 1 уровень ТОиР | 2 уровень ТОиР | 3 уровень ТОиР | 4 уровень ТОиР | Поставщик | ИТОГО |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| Создание инфраструктуры ЦС | - | 4 500 | 5 000 | - | - | 9 500 |
| Затраты на оборудование | - | 4 000 | 4 000 | - | - | 8 000 |
| Приобретение комплектующих изделий (начальный запас) | 8 288 | 229 881 | 76 627 | - | - | 314 796 |
| Периодические затраты, тыс.руб | | | | | | |
| Затраты на плановое ТОиР, тыс.руб | 1 уровень ТОиР | 2 уровень ТОиР | 3 уровень ТОиР | 4 уровень ТОиР | Поставщик | ИТОГО |
| Оплата труда | - | 8 356 | 113 000 | - | - | 121 356 |
| Приобретение комплектующих изделий (пополнение запаса) | 272 580 | 155 885 | - | - | - | 428 465 |
| Приобретение расходных материалов | - | 137 644 | 22 600 | - | - | 160 244 |
| Затраты на текущий ремонт на данном уровне, тыс.руб | 340 736 | 369 619 | 2 906 254 | - | 3 337 507 | 6 954 116 |
| Оплата труда | - | 10 333 | - | - | - | 10 333 |
| Приобретение неремонтопригодных комплектующих изделий (пополнение запаса) | 340 736 | 308 947 | 625 877 | - | - | 1 275 560 |
| Приобретение расходных материалов | - | 3 876 | - | - | - | 3 876 |
| Прочие затраты на текущий ремонт, тыс. руб (в % от цены) см.'Ремонты' | - | 46 464 | 2 280 377 | - | 3 337 507 | 5 664 347 |
| Затраты на хранение запасов на данном уровне, тыс. руб | 4 735 | 172 406 | 57 469 | - | - | 234 611 |
| Суммарные затраты на транспортировку, тыс.руб | | | | | | 149 323 |
| Затраты на транспортировку комплектующих изделий | | | | | | 84 358 |
| Затраты на транспортировку Изделий (для выполнения работ ТОиР) | | | | | | 64 965 |
| Затраты на поддержку инфраструктуры ЦС и средств ТО, тыс. руб | - | 21 000 | 30 000 | - | - | 51 000 |

Рисунок 3.8. Отчет о суммарных затратах на обеспечение технической эксплуатации

Форма отчета, отражающего зависимость суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации от величины коэффициента эксплуатационной готовности, приведена на рисунке 3.9.

| № варианта расчета | Кпп | Кг | Кгмто | Значение Кэг | Суммарные затраты на МТО, тыс.руб. | Затраты на 1 изделие в год, руб. | Затраты на летный час, руб. |
|--------------------|------|------|-------|--------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,96 | 0,95 | 0,78 | 0,71 | 6 631 741 | 2 278 949 | 19 886 |
| 2 | 0,96 | 0,95 | 0,88 | 0,81 | 6 658 601 | 2 288 179 | 19 967 |
| 3 | 0,96 | 0,95 | 0,98 | 0,90 | 6 731 477 | 2 313 222 | 20 186 |

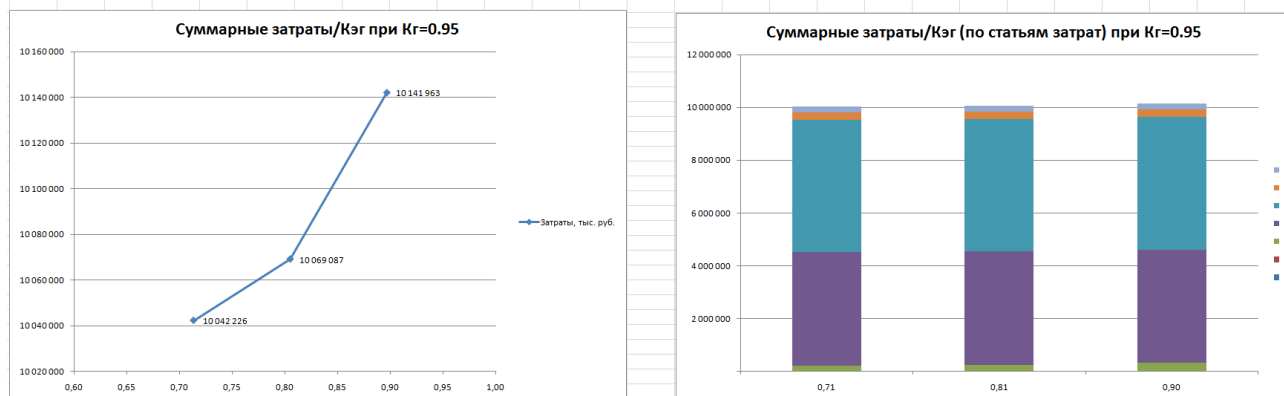


Рисунок 3.9. Отчет о зависимости суммарных затрат от величины коэффициента эксплуатационной готовности

В верхней части отчета отображается величина суммарных затрат на МТО, в том числе удельные величины – в расчете на одно изделие в год и на один летный час, для заданной величины коэффициента эксплуатационной готовности.

В нижней левой части отчета на графике представлена зависимость затрат от требуемой величины коэффициента эксплуатационной готовности. В правой нижней части отчета аналогичная зависимость представлена в виде диаграммы, на которой, кроме этого, цветами показано изменение вклада отдельных статей затрат при изменении коэффициента эксплуатационной готовности.

Форма отчета, отражающего сведения об оптимальном количестве ремонтных ячеек, приведена на рисунке 3.10 (отчет о составе пунктов по ремонту представлен в программе виде простой таблицы).

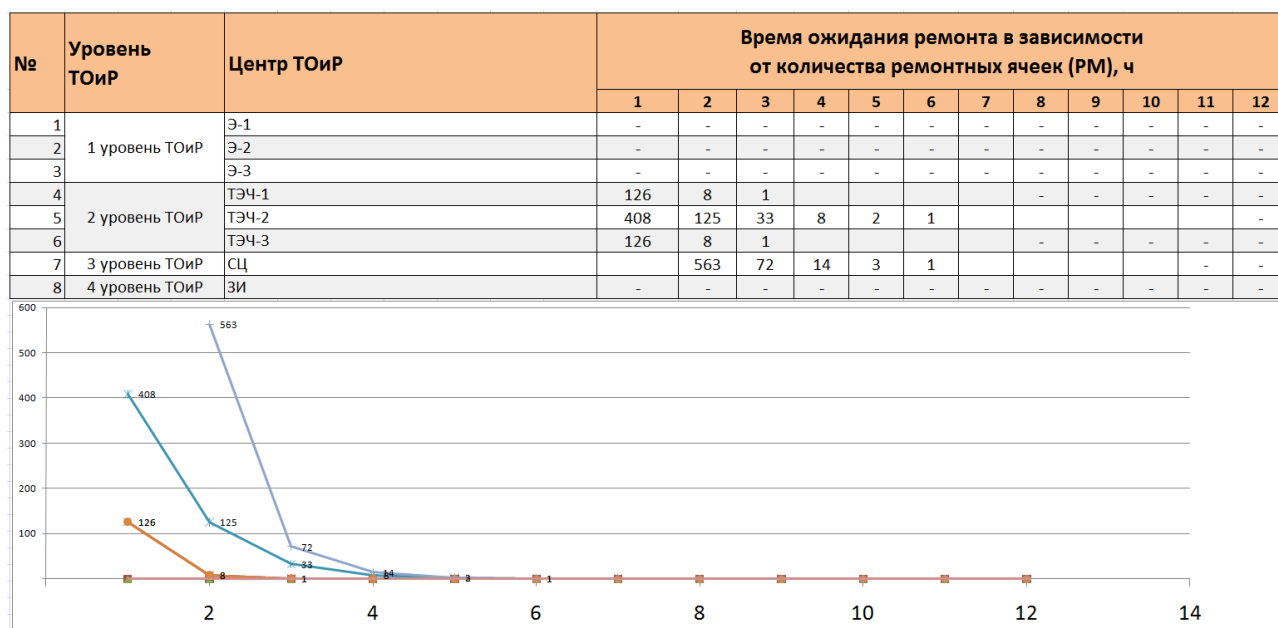


Рисунок 3.10. Отчет, отражающий оптимальное количество ремонтных ячеек

В верхней части отчета в таблице отображается среднее время выполнения ремонта СЧ ВС с учетом времени ожидания в очереди на ремонт, зависящее от количества ремонтных ячеек в пункте по ремонту. Время ожидания рассчитывается по известным формулам [67] с использованием математического аппарата теории массового обслуживания.

В нижней части отчета график зависимости времени ремонта СЧ ВС от развернутого количества ремонтных ячеек для каждого ремонтного органа 2-го и 3-го уровней.

Форма отчета об оптимальной величине начального запаса запасных частей в местах хранения приведена на рисунке 3.11.

| Обозначение запаса | Наименование запаса | Количество в изделии | Объемы и стоимость оборотного фонда при KгМТО = 0.98 | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|----------------------|--|---------|----------|---------|----------------|---------------|----------|---|
| | | | 2 уровень ТОиР | | | | 3 уровень ТОиР | | | |
| | | | ТЭЧ-1 | ТЭЧ-2 | ТЭЧ-3 | ТЭЧ-4 | СЦ - 012 - 01 | СЦ - 012 - 02 | | |
| КМИВ.468369.016 | Корпус унифицированный КУ-18М | 1 | - | - | 3 | 38 808р | - | - | - | - |
| | | | - | 4 | 51 744р | - | - | - | - | |
| | | | 3 | 38 808р | - | - | 3 | 38 808р | - | - |
| ЭВ-0,7-1640 | Вентилятор | 1 | - | 4 | 26 445р | - | - | - | - | |
| | | | - | - | - | 3 | 19 834р | - | - | |
| | | | 3 | 19 834р | - | - | - | 3 | 19 834р | - |
| ИТКС.685623.002 | Жгут | 2 | - | 5 | 595р | - | - | - | - | |
| | | | - | - | - | 4 | 476р | - | - | |
| | | | 3 | 357р | - | - | - | - | - | |
| РШПИ.465644.004-04 | ПУ-95-04 | 1 | - | 5 | 86 720р | - | - | - | - | |
| | | | - | - | - | 3 | 52 032р | - | - | |
| | | | 3 | 52 032р | - | - | 4 | 69 376р | - | - |
| РШПИ.468213.020-05 | Блок СРПБЗ | 1 | - | 4 | 163 072р | - | - | - | - | |
| | | | - | - | - | 3 | 122 304р | - | - | |
| | | | 2 | 81 536р | - | - | - | 3 | 122 304р | - |
| КМИВ.685621.066 | Жгут | 1 | - | 5 | 3 960р | - | - | - | - | |
| | | | - | - | - | 4 | 3 168р | - | - | |
| | | | 3 | 2 376р | - | - | - | 4 | 3 168р | - |

Рисунок 3.11. Отчет об оптимальной величине начального запаса

Отчет представляет собой таблицу, в строках которой перечислены все предметы поставки, а в столбцы отражают места хранения в соответствии с заданным перечнем объектов инфраструктуры.

В ячейках таблицы приведено рассчитанное в соответствии с описанным в главе 2 алгоритмом количество запасных частей каждого типа, которое требуется приобрести и разместить в заданном объекте инфраструктуры для поддержания требуемого уровня эксплуатационной готовности парка ВС. Также приведена стоимость приобретаемого комплекта запасных частей для каждого объекта инфраструктуры.

Таким образом, представленный программный комплекс содержит все программные компоненты, необходимые для:

- ведения базы данных анализа логистической поддержки;
- ввода данных об элементах системы МТО в соответствии с представленной в разделе 2.3 информационной моделью;
- выполнения расчетов в соответствии с предложенными в разделах 2.2, 2.4 и 2.5 методикой и алгоритмами;
- формирование отчетной информации, содержащей результаты синтеза структуры и параметров системы ТОиР.

3.2 Анализируемые варианты размещения региональных сервисных центров для обслуживания и ремонта парка вертолетов

Для проведения практических расчетов затрат на обеспечение технической эксплуатации парка ВС с использованием разработанного метода и алгоритмов, рассмотрен парк легких многоцелевых вертолетов VRT500. Для контрольного примера предполагается, что вертолеты размещены в трех местах базирования, в которых размещено 10, 10 и 16 вертолетов. Размер всего парка составляет, соответственно, 36 единиц.

Для обеспечения технической эксплуатации предполагается два варианта размещения объектов инфраструктуры:

1) Первый вариант предполагает отсутствие сервисного центра на территории эксплуатанта с развертыванием следующих объектов инфраструктуры:

- центральный склад на территории эксплуатанта для хранения запасных частей;

- авиационно-техническая база (АТБ 1) в месте базирования 10 вертолетов, расстояние до центрального склада – 260 км;

- авиационно-техническая база (АТБ 2) в месте базирования 10-х вертолетов, расстояние до центрального склада – 370 км;

- авиационно-техническая база (АТБ 3) в месте базирования 16-ти вертолетов, расстояние до центрального склада – 380 км.

2) Второй вариант аналогичен первому в части размещения авиационно-технических баз, но при этом предполагает создание сервисного центра на территории эксплуатанта (вместе с центральным складом в том же месте базирования).

В обоих вариантах предполагается, что доставка запасных частей на центральный склад осуществляется воздушным транспортом с завода-

изготовителя (8000 км), доставка с центрального склада к местам базирования осуществляется автомобильным транспортом.

Схема размещения объектов инфраструктуры представленного контрольного примера приведена на рисунке 3.12.

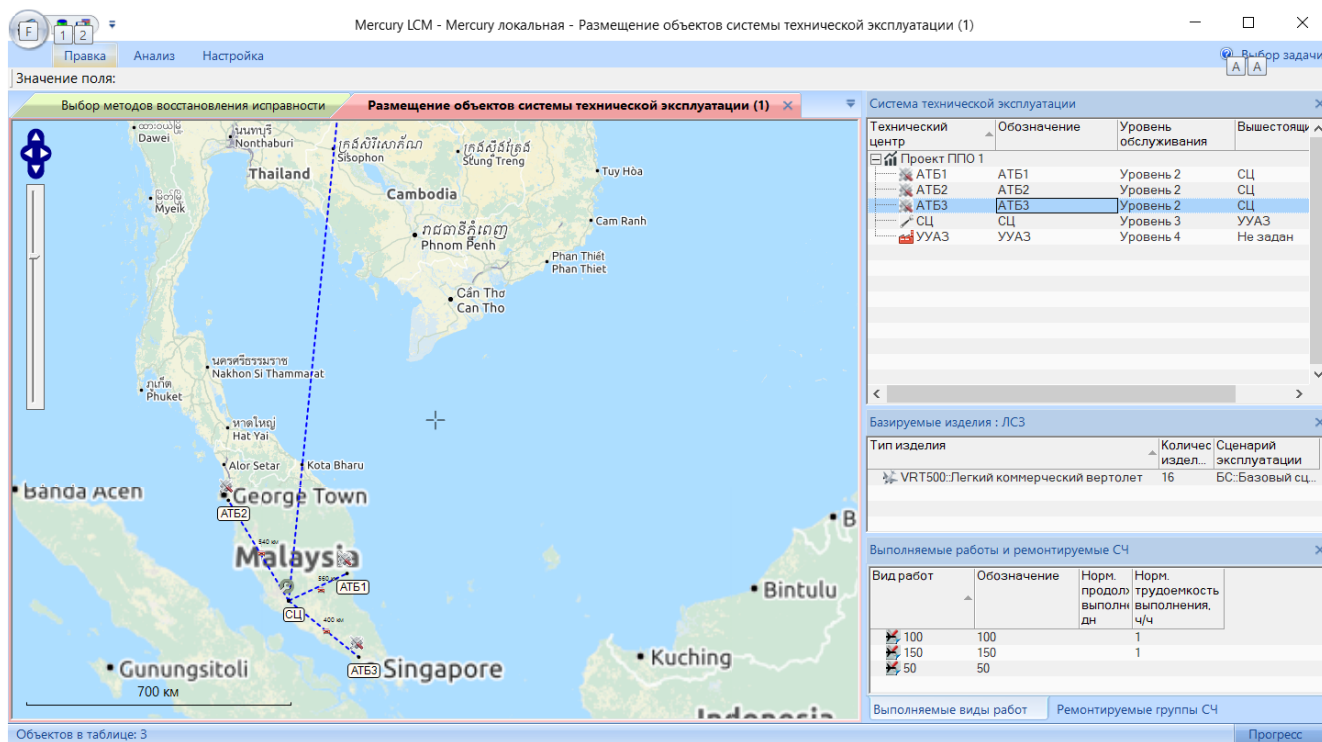


Рисунок 3.12. Схема размещения объектов инфраструктуры для контрольного примера

В контрольном примере приняты следующие затраты на транспортировку запасных частей:

- поставки со склада производителя на центральный склад эксплуатирующей организации осуществляются авиационным транспортом, стоимость перевозок составляет 46 рублей за тонно-километр;

- поставки с центрального склада эксплуатирующей организации в авиационно-технические базы осуществляются автомобильным транспортом, стоимость перевозок составляет 12 рублей за тонно-километр.

В качестве анализируемой составной части вертолета VRT500 взят комплекс бортового оборудования. В силу большого количества составных частей

комплекса, в данной главе приведены исходные данные и результаты расчета для следующих блоков, входящих в его состав:

- Радиовысотомер (RADALT);
- Штормоскоп;
- Курсовертикаль (ADAHRS);
- Дальномер (DME).

Состав указанных блоков и характеристики входящих в них элементов приведены в таблице 3.1. В контрольном примере принято, что элементы блоков не могут быть отремонтированы на 3-м уровне и для ремонта направляются на завод-изготовитель. Также приняты следующие ценовые параметры:

– стоимость развертывания в сервисном центре одной ремонтной ячейки для ремонта радиовысотомера составляет 15 миллионов рублей, ежегодная стоимость поддержания в исправном состоянии оборудования ремонтной ячейки – 0,5 миллиона рублей;

– стоимость развертывания в сервисном центре одной ремонтной ячейки для ремонта штормоскопа составляет 12 миллионов рублей, ежегодная стоимость поддержания в исправном состоянии оборудования ремонтной ячейки – 0,4 миллиона рублей;

– стоимость развертывания в сервисном центре одной ремонтной ячейки для ремонта курсовертикали составляет 18 миллионов рублей, ежегодная стоимость поддержания в исправном состоянии оборудования ремонтной ячейки – 1 миллион рублей;

– стоимость развертывания в сервисном центре одной ремонтной ячейки для ремонта дальногомера составляет 10 миллионов рублей, ежегодная стоимость поддержания в исправном состоянии оборудования ремонтной ячейки – 0,3 миллиона рублей;

– стоимость хранения блоков и их элементов составляет 5% от их стоимости (в год);

– стоимость ремонта блоков на заводе-изготовителе составляет 60% от их цены.

Таблица 3.1. Составные части комплекса бортового оборудования VRT500

| ЛКН | Наименование | Кол-во | Цена, USD | Средняя наработка на отказ, ч. | Масса, кг | Ремонто- пригодно (3 ур.) | Назначенный ресурс, ч. |
|--------------|---------------------------------------|----------|--------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------|
| 34-11 | Радиовысотомер (RADALT) | 1 | 36884 | 4850 | 2,1 | Да | 18000 |
| 34-11-10 | Приемопередатчик | 1 | 21000 | 6500 | 1,9 | Да | - |
| 34-11-10-01 | Модуль генерирования СВЧ колебаний | 1 | 4700 | 28000 | 0,1 | Нет | - |
| 34-11-10-02 | Модуль преобразования | 1 | 2100 | 40000 | 0,1 | Нет | - |
| 34-11-10-03 | Блок усиления сигнала | 1 | 1400 | 80000 | 0,3 | Нет | - |
| 34-11-10-04 | Блок измерения | 1 | 1100 | 60000 | 0,2 | Нет | - |
| 34-11-10-05 | Блок резонаторов | 1 | 1800 | 70000 | 0,2 | Нет | - |
| 34-11-10-06 | Блок связи | 1 | 800 | 60000 | 0,1 | Нет | - |
| 34-11-10-07 | Блок питания | 1 | 600 | 30000 | 0,4 | Нет | - |
| 34-11-20 | Антенна | 2 | 4200 | 30000 | 0,2 | Нет | - |
| 34-11-30 | Индикатор высоты | 1 | 1600 | 50000 | 0,2 | Нет | - |
| 34-12 | Штормоскоп | 1 | 5695 | 7000 | 1,8 | Да | 30000 |
| 34-12-10 | Вычислитель | 1 | 4500 | 18000 | 1,2 | Да | - |
| 34-12-10-01 | Основной процессор | 1 | 350 | 80000 | 0,05 | Нет | - |
| 34-12-10-02 | Цифровой сигнальный процессор DSP | 1 | 250 | 80000 | 0,05 | Нет | - |

| ЛКН | Наименование | Кол-во | Цена, USD | Средняя наработка на отказ, ч. | Масса, кг | Ремонто- пригодно (3 ур.) | Назначенный ресурс, ч. |
|--------------|---------------------------------|----------|--------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------|
| 34-12-10-03 | Модуль памяти | 2 | 180 | 120000 | 0,03 | Нет | - |
| 34-12-10-04 | Материнская плата | 1 | 420 | 70000 | 0,5 | Нет | - |
| 34-12-20 | Антенна | 1 | 550 | 30000 | 0,4 | Нет | - |
| 34-12-30 | Антенный кабель | 1 | 80 | 100000 | 0,2 | Нет | - |
| 34-13 | Курсовертикаль (ADAHRS) | 1 | 19400 | 3340 | 0,8 | Да | 5000 |
| 34-13-10 | Гироскоп | 3 | 1400 | 12000 | 0,05 | Нет | 5000 |
| 34-13-20 | Датчик акселерометра | 3 | 600 | 35000 | 0,02 | Нет | - |
| 34-13-30 | Датчик моментов | 4 | 250 | 35000 | 0,02 | Нет | - |
| 34-13-40 | Датчик угла | 4 | 300 | 35000 | 0,02 | Нет | - |
| 34-13-50 | Блок усилителей | 2 | 1400 | 25000 | 0,3 | Нет | - |
| 34-13-60 | Терморегулятор | 4 | 150 | 36000 | 0,01 | Нет | - |
| 34-13-70 | Усилитель | 1 | 2000 | 40000 | 0,1 | Нет | - |
| 34-14 | Дальномер (DME) | 1 | 26565 | 7000 | 2,8 | Да | 30000 |
| 34-14-10 | Запросчик | 1 | 10300 | 9000 | 1,3 | Нет | - |
| 34-14-20 | Антенна DME | 1 | 8100 | 30000 | 0,2 | Нет | - |
| 34-14-30 | Адаптер авиационных интерфейсов | 1 | 2500 | 18000 | 1,3 | Нет | - |

Налет каждого вертолета в контрольном примере в год принят равным 500 летным часам, наработка комплекса бортового оборудования принята равной налету вертолета. Требуется обеспечить величину коэффициента эксплуатационной готовности не менее, чем 0,9.

Для доставки блоков с 4-го уровня ТОиР на 3-й принята периодическая стратегия пополнения запасов с периодичностью один раз в год. Для доставки запасных частей с 3-го уровня на 2-й принимаются следующие допущения:

– в случае, если блок ремонтируется на 3-м уровне (в региональном сервисном центре развернут пункт по ремонту), для этого блока применяется непрерывная модель пополнения запасов с периодичностью 2 месяца;

– в случае, если блок не ремонтируется на 3-м уровне, применяется периодическая модель пополнения запасов с периодичностью 3 месяца.

Указанные допущения, в целом, соответствуют принятой для авиационной техники практике снабжения эксплуатирующих и ремонтных организаций запасными частями [48].

В соответствии с приведенной в главе 1 постановкой, задача определения наилучшей структуры и параметров системы МТО заключается в выборе:

– оптимального количества ремонтных ячеек в сервисном центре для каждого из 4-х перечисленных выше блоков (определение структуры системы МТО);

– номенклатуры и объемов хранимых блоков и их элементов на 2-м и 3-м уровнях системы МТО (в АТБ и в региональном сервисном центре) с учетом принятых стратегий пополнения запасов (определение параметров системы МТО).

Очевидно, что решение задачи для указанных 4-х блоков путем полного перебора потребует выполнения расчетов параметров МТО (путем решения соответствующей оптимизационной задачи) для 16 (2^4) вариантов состава ремонтных ячеек в сервисных центрах. Для решения аналогичной задачи для всего оборудования вертолета (около 500 составных частей) потребуется, соответственно, перебор 2^{500} вариантов состава ремонтных ячеек, что займет

длительное время даже на современных высокопроизводительных компьютерах. Во избежание необходимости полного перебора будет применен описанный в разделе 2.5 алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров.

Результаты расчетов для описанного выше контрольного примера приведены в разделе 1.3.

3.3 Результаты апробации программного комплекса на примере бортового оборудования вертолета VRT500

Расчет наилучших структуры и параметров системы МТО с использованием разработанного программного комплекса выполняется в следующей последовательности:

1) Расчет оптимального количества ремонтных ячеек в региональном сервисном центре для каждого пункта по ремонту блоков определенного типа. Определение цены развертывания пункта по ремонту для каждой составной части.

2) Расчет с использованием алгоритма и методики, приведенных в разделах 2.4 и 2.2, суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации для каждого варианта размещения пунктов по ремонту для блоков. Перебор возможных вариантов осуществляется по алгоритму, приведенному в разделе 2.5.

3) Формирование отчетов о величине и структуре суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации для наилучшего варианта.

Для сравнения, при помощи разработанного программного комплекса также выполняется расчет суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации для указанных в эксплуатационной документации условий (использование комплектов ЗИП-О и ЗИП-Г без ремонта блоков в региональном сервисном центре).

Результаты расчета оптимального количества ремонтных ячеек в пунктах по ремонту сервисного центра для каждого из 4-х рассматриваемых блоков показали, что для изделий следует размещать приведенное ниже количество ремонтных ячеек:

– для радиовысотомера – 2 ремонтные ячейки суммарной стоимостью 30 миллионов рублей;

– для штормоскопа – 2 ремонтные ячейки суммарной стоимостью 24 миллионов рублей;

– для курсовертикали – 4 ремонтные ячейки суммарной стоимостью 72 миллиона рублей;

– для дальномера – 2 ремонтные ячейки суммарной стоимостью 20 миллионов рублей.

Следующим этапом является расчет суммарной стоимости затрат на обеспечение технической эксплуатации для каждого варианта размещения пунктов по ремонту. Использование разработанного в разделе 2.5 алгоритма позволяет сразу определить наилучшее сочетание развертывания в сервисном центре пунктов по ремонту или его использование в качестве промежуточного склада. Но для оценки экономического эффекта от применения разработанных алгоритмов также выполнен расчет путем полного перебора.

Суммарные затраты на обеспечение технической эксплуатации при разных вариантах структуры сервисного центра приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Суммарные затраты на обеспечение технической эксплуатации для разных вариантов структуры сервисного центра

| № | Развертывание пункта по ремонту в сервисном центре | | | | Суммарные затраты, тыс.руб. |
|---|--|------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|
| | Радиовысотомер (RADALT) | Штормоскоп | Курсовертикаль (ADAHRS) | Дальномер (DME) | |
| 1 | нет | нет | нет | нет | 163 412 |
| 2 | нет | нет | нет | да | 168 017 |
| 3 | нет | нет | да | нет | 143 662 |

| № | Развертывание пункта по ремонту в сервисном центре | | | | Суммарные затраты, тыс.руб. |
|----|--|------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|
| | Радиовысотомер (RADALT) | Штормоскоп | Курсовертикаль (ADAHRS) | Дальномер (DME) | |
| 4 | нет | нет | да | да | 150 602 |
| 5 | нет | да | нет | нет | 178 492 |
| 6 | нет | да | нет | да | 183 097 |
| 7 | нет | да | да | нет | 161 077 |
| 8 | нет | да | да | да | 165 682 |
| 9 | да | нет | нет | нет | 178 620 |
| 10 | да | нет | нет | да | 183 225 |
| 11 | да | нет | да | нет | 161 205 |
| 12 | да | нет | да | да | 165 810 |
| 13 | да | да | нет | нет | 193 700 |
| 14 | да | да | нет | да | 198 305 |
| 15 | да | да | да | нет | 176 285 |
| 16 | да | да | да | да | 180 890 |

В первой строке таблицы 3.2 представлены суммарные затраты при обеспечении технической эксплуатации в соответствии с действующей нормативно-технической документацией с использованием комплектов одиночного и группового ЗИП.

Как показывают результаты расчетов, приведенные в таблице 3.2, четыре варианта развертывания пунктов по ремонту СЧ в сервисном центре дают лучший результат по суммарным затратам при достижении того же уровня готовности:

- развертывание пункта по ремонту для курсовертикали (сокращение затрат на 19750 тыс. руб.);

- развертывание пунктов по ремонту для курсовертикали и дальномера (сокращение затрат на 12 810 тыс. руб.);

- развертывание пунктов по ремонту для штормоскопа и курсовертикали (сокращение затрат на 2 335 тыс. руб.);

– развертывание пунктов по ремонту для радиовысотомера и курсовертикали (сокращение затрат на 2 207 тыс. руб.).

Наилучшим является вариант с развертыванием пункта по ремонту только для курсовертикали, так как несмотря на то, что пункт по ремонту данной составной части является самым дорогим (72 млн.руб.), наличие пункта по ремонту снижает суммарные затраты в течение срока службы вертолетов на более значительную величину. Экономический эффект от развертывания пункта по ремонту составляет 12%.

Следует отметить, что выполненные расчеты определяют наилучшую структуру и параметры системы ТОиР для заранее определенного размера парка изделий и известных требований к коэффициенту эксплуатационной готовности. При этом на практике количество эксплуатируемых воздушных судов в парке может меняться во времени (например, в случае постепенных поставок ВС в эксплуатацию). Требования к коэффициенту эксплуатационной готовности также могут устанавливаться заказчиком в контрактах жизненного цикла в зависимости от имеющегося у него бюджета на обеспечение технической эксплуатации.

В связи с этим актуальной также является задача исследования зависимости изменения величины суммарных затрат на обеспечение технической эксплуатации от изменения, например, размера парка и требований отношении коэффициента эксплуатационной готовности. Для описанного выше контрольного примера рассмотрим изменение величины суммарных затрат в следующих условиях:

- размер эксплуатируемого парка меняется от 5 до 25 ВС;
- требования к величине коэффициента эксплуатационной готовности могут варьироваться от 0,3 до 0,9.

Рассмотрим также изменение величины суммарных затрат для трех вариантов структуры системы МТО:

А – вариант без развертывания пунктов по ремонту СЧ в сервисном центре (вариант, соответствующий действующей документации);

Б – вариант с развертыванием в сервисном центре пункта по ремонту курсовертикали (наилучший вариант для рассмотренного в таблице 3.2 примера);

В – вариант с развертыванием в сервисном центре пунктов по ремонту радиовысотомера, штормоскопа и дальномера (наихудший вариант для рассмотренного в таблице 3.2 примера).

Величина затрат на обеспечение технической эксплуатации для этих трех вариантов представлена на рисунке 3.13.

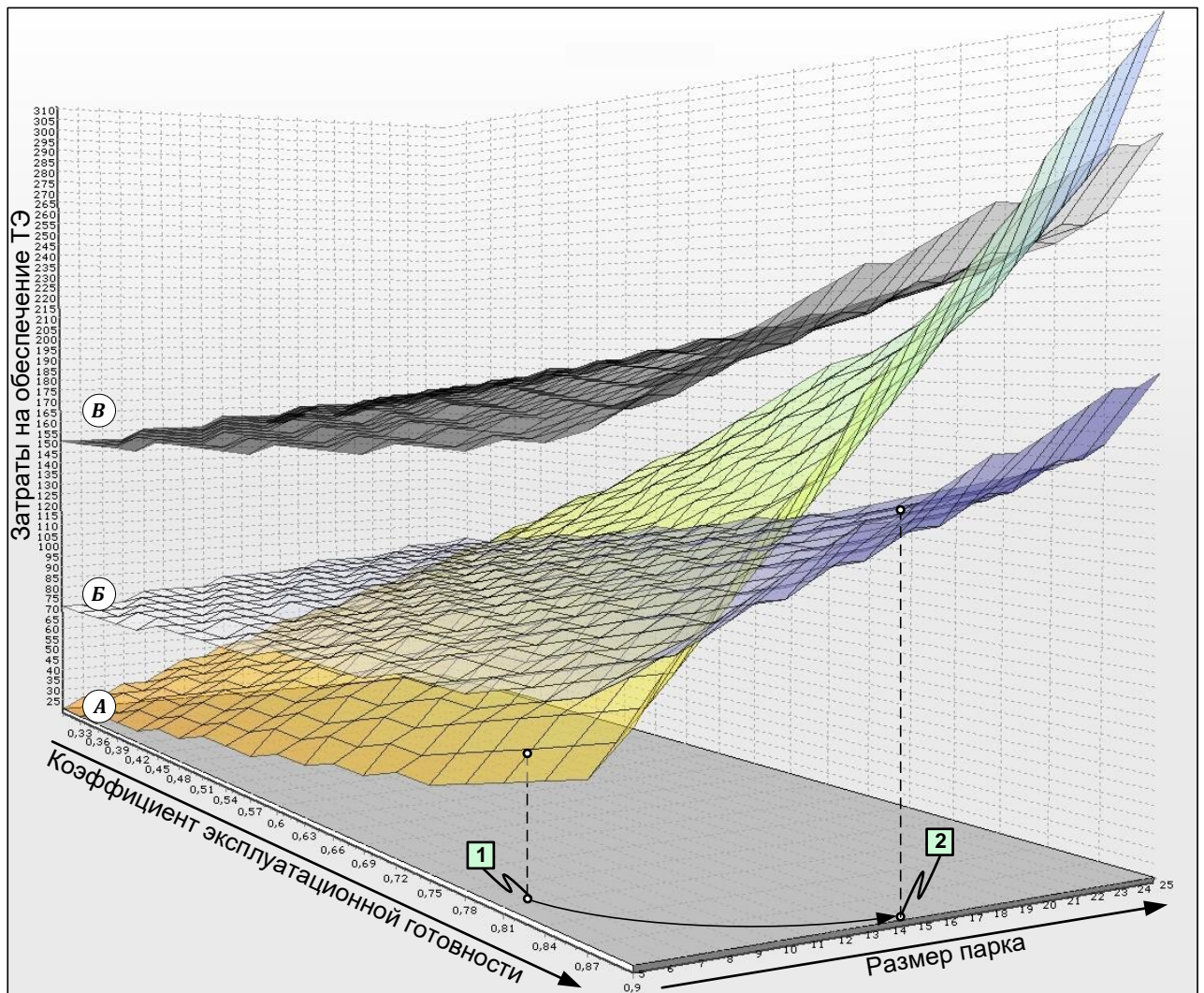


Рисунок 3.13. Зависимость суммарных затрат от размера парка и коэффициента эксплуатационной готовности

Как видно из рисунка 3.13, при достаточно малом парке и невысоких требованиях к коэффициенту эксплуатационной готовности (точка 1) наилучшим является вариант без развертывания пунктов по ремонту (вариант А).

При увеличении парка и увеличении требований к величине коэффициента эксплуатационной готовности (точка 2) более выгодным становится вариант Б (с развертыванием пункта по ремонту для курсоверткали). Вариант В ни при каких условиях не является экономически выгодным.

Таким образом, предложенные метод и алгоритмы позволяют также проводить исследования зависимости изменения затрат на обеспечение технической эксплуатации от варьируемых параметров - требований в отношении коэффициента эксплуатационной готовности и размера парка. К варьируемым параметрам также можно отнести:

- применение различных стратегий пополнения запасов для СЧ ВС;
- параметры стратегий пополнения запасов (периодичность и продолжительность транспортировки, уровень неснижаемого запаса);
- методы технической эксплуатации СЧ ВС;
- стоимость и продолжительность транспортировки различными видами транспорта и т.п.

Построение зависимостей затрат от перечисленных параметров в рамках данной работы не проводилось и является предметом для дальнейших исследований.

3.4 Выводы

1) Разработан программный комплекс, обрабатывающий информацию в базе данных АЛП и реализующее предложенные метод и алгоритмы. Для определения эффективности предложенных решений разработанный программный комплекс применен для синтеза многоуровневой системы МТО на реальных данных по изделию АТ.

2) Для комплекса бортового оборудования был сформирован массив исходных данных для синтеза структуры и параметров системы МТО на примере

парка легких вертолетов VRT500. Исходные данные структурированы в соответствии с предложенной в главе 2 информационной моделью и размещены в базе данных АЛП.

3) При помощи разработанного программного комплекса, реализующего описанные в главе 2 алгоритмы, определены оптимальные состав и количество оборудования сервисных центров.

4) С использованием метода оценки суммарных затрат на обеспечение ТЭ, описанного в главе 2, проведено сравнение затрат при использовании полученных при помощи программного комплекса параметров системы МТО, а также при использовании параметров, установленных действующей документацией на ВС. Расчет показал, что для комплекса бортового оборудования экономический эффект от применения разработанных алгоритмов составил 12%.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы и результаты работы:

1) На основе проведенного анализа существующих подходов к обеспечению технической эксплуатации АТ, в том числе применяемых методик, алгоритмов и программных средств, выявлены направления повышения эффективности процессов технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения эксплуатации региональных парков ВС. Предложен и обоснован подход к повышению эффективности за счет синтеза многоуровневой системы МТО с оптимизацией ее структуры и параметров для достижения заданного уровня готовности парка АТ при минимизации затрат на обеспечение технической эксплуатации.

2) Разработана модель описания многоуровневой системы МТО, позволяющая организовать такое распределение работ и связанных с ними ресурсов (запасные части, оборудование) по уровням системы, которое обеспечивает оптимальную эффективность системы по критерию суммарных затрат.

3) Разработан алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы материально-технического обеспечения и производственных мощностей региональных сервисных центров. Алгоритм обеспечивает поиск оптимального распределения работ по ремонту составных частей ВС по уровням и позволяет определить номенклатуру, объем запасов предметов снабжения и состав оборудования региональных сервисных центров для ТОиР парка ВС при известных требованиях к величине коэффициента эксплуатационной готовности. Алгоритм позволяет одновременно определить оптимальные номенклатуру, объем запасов предметов снабжения и состав оборудования региональных сервисных центров для ТОиР заданного парка ВС

переменного состава при заданных требованиях к величине коэффициента эксплуатационной готовности.

4) Разработан алгоритм оптимизации параметров системы МТО по критерию минимизации затрат при ограничениях на величину эксплуатационной готовности, отличающийся от известных использованием в качестве критерия оптимизации суммарной величины затрат на ТЭ в течение всего срока службы ВС, в том числе затрат на транспортировку, хранение, создание и пополнение ремонтных комплектов при организации ремонта составных частей ВС в региональных сервисных центрах. Алгоритм обеспечивает определение оптимальных параметров системы МТО для длительного периода эксплуатации, в течение которого различные компоненты затрат (хранение, транспортировка и т.п.) могут оказывать различный вклад в их общую величину.

5) По результатам анализа существующих в отечественной и международной практике подходов к оценке затрат на обеспечение технической эксплуатации предложена методика расчета показателей затрат на обеспечение ТЭ. Методика позволяет рассчитывать различные составляющие затрат на ТЭ (начальные, периодические, прямые, косвенные затраты и др.) и дает возможность обоснования стоимости контрактов жизненного цикла.

6) Разработана информационная модель анализа логистической поддержки, обеспечивающая описание в информационных системах сведений о базировании парка ВС, сценариях их эксплуатации, размещении и производственных мощностях региональных сервисных центров, местах хранения запасных частей и логистических потоках. Информационная модель позволяет на основе обработки информации в базе данных анализа логистической поддержки синтезировать оптимальные структуру и параметры системы МТО для конкретного парка ВС и условий его эксплуатации.

7) Разработанные методика, алгоритмы и информационная модель реализованы в программном комплексе, обеспечивающем наилучший по критерию суммарных затрат выбор между созданием в сервисных центрах

пунктов по ремонту составных частей ВС или их использование в качестве промежуточного склада.

8) Внедрение и экспериментально-промышленная апробация результатов работ в АО «НЦВ Миль и Камов» и ОКБ Сухого ПАО «ОАК» позволили сформировать научно обоснованные подходы к планированию послепродажного обслуживания АТ, повысить эффективность и сократить затраты на обеспечение ее технической эксплуатации.

Таким образом, достигнута поставленная цель и решена важная задача повышения технико-экономической эффективности процессов технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения эксплуатации парка ВС и их адаптации под требования контрактов жизненного цикла. В качестве направления дальнейших исследований могут быть рассмотрены методы совершенствования системы ТЭ, основанные на анализе зависимостей показателей готовности и затрат от параметров стратегий МТО и методов технической эксплуатации СЧ ВС.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|-------|---|
| PBL | Performance-based lifecycle support |
| RCM | Reliability centered maintenance |
| АВПКО | Анализ видов, последствий и критичности отказов |
| АЛП | Анализ логистической поддержки |
| АТ | Авиационная техника |
| АТБ | Авиационно-техническая база |
| БД | База данных |
| ВС | Воздушное судно |
| ВСК | Встроенная система контроля |
| ЗИП | Запасные части, инструмент и приспособления |
| ИЛП | Интегрированная логистическая поддержка |
| ИЭТР | Интерактивное электронное техническое руководство |
| ЛА | Логистический анализ |
| ЛСИ | Логистическая структура изделия |
| ЛСТО | Линейная станция по техническому обслуживанию |
| МТО | Материально-техническое обеспечение |
| ПКР | Показатель конечного результата |
| РД | Ремонтная документация |
| СТЭ | Система технической эксплуатации |
| СУБД | Система управления базами данных |
| СЧ | Составная часть |
| ТО | Техническое обслуживание |
| ТОиР | Техническое обслуживание и ремонт |
| ТЭ | Техническая эксплуатация |
| ЭВМ | Электронно-вычислительная машина |
| ЭД | Эксплуатационная документация |
| ЭТХ | Эксплуатационно-технические характеристики |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АС 1.1.0060.0.С-2005. Авиационный справочник. Анализ логистической поддержки авиационной техники военного назначения. Структура базы данных. – М.: ФГУП «НИИСУ», 2005. – 181 с.
2. Бороздин Д.Н., Карасев В.О., Акуленко А.А., Петров А.В., Буряк Ю.И., Бутылин В.И. «Модуль разработки плана материально-технического обеспечения эксплуатации авиационных комплексов - комплекс интегрированной логистической поддержки (КИЛП-МТО)». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613953 от 14.04.2014г.
3. Бороздин Д.Н., Карасев В.О., Акуленко А.А., Петров А.В., Чердакова Е.В., Буряк Ю.И. «Модуль расчета затрат на техническое обслуживание авиационных комплексов - комплекс интегрированной логистической поддержки (КИЛП-ПЗТО)». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613590 от 04.04.2014г.
4. Бороздин Д.Н., Петров А.В., Карасев В.О., Лобанов А.А. и др. «Integrated Logistic Support Suite (ILS Suite), версия 1.0». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013617942 от 14.10.2013г.
5. Бриндигов А.Н., Незаленов Н.И., Карташев А.В. и др. Повышение конкурентоспособности российской продукции военного назначения за счет применения технологий интегрированной логистической поддержки и каталогизации // CAD/CAM/CAE-Observer, 2012. - №8 (76). – с.66-75
6. Бром А.Е., Александров А.А. Разработка экономико-математической модели интеграции участников и процессов жизненного цикла наукоемкой продукции в систему логистической поддержки // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2008. - №3. – с. 73-92.

7. Бром А.Е., Терентьева З.С. Разработка динамической модели системы интегрированной логистической поддержки наукоемкой продукции на стадии эксплуатации // Вестник машиностроения. – 2005. – № 12. – с. 51-60.
8. Гипич Г.Н. Обеспечение и поддержание летной годности воздушных судов гражданской авиации (теория и практика). // автореферат дисс. докт. техн. наук, 05.22.14, - Москва, 2005. – 41. с.
9. Головин В.Я. Шаламов А.С., Миронычев В.Н. и др. / Под редакцией Головина В.Я. Управление организационно-техническими системами. – М.: Издательство ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. – 580 с.
10. ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 34 с.
11. ГОСТ 18675-2012. Документация эксплуатационная и ремонтная на авиационную технику и покупные изделия для нее. – М.: Стандартинформ, 2013. – 225 с.
12. ГОСТ 25866-83. Эксплуатация техники. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.
13. ГОСТ 27.507-2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. – М.: Стандартинформ, 2018. – 52с.
14. ГОСТ Р 53392-2017 Интегрированная логистическая поддержка. Анализ логистической поддержки. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 35 с.
15. ГОСТ Р 53393-2017 Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 20 с.
16. ГОСТ Р 53394-2017 Интегрированная логистическая поддержка. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 26 с.
17. ГОСТ Р 55931-2013. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Стоимость жизненного цикла продукции военного назначения. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.

- 18.ГОСТ Р 56111-2014. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
- 19.ГОСТ Р 57104-2016 Интегрированная логистическая поддержка. Программа обеспечения технической эксплуатации. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
- 20.ГОСТ Р 58296-2018 Интегрированная логистическая поддержка продукции военного назначения. Планирование и управление материально-техническим обеспечением. Формирование номенклатуры предметов снабжения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
- 21.ГОСТ Р 58297-2018 Интегрированная логистическая поддержка. Многоуровневое техническое обслуживание и ремонт. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 17 с.
- 22.ГОСТ Р ИСО 10303-1-99 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. – М.: Стандартинформ, 1999. – 16 с.
- 23.ГОСТ Р ИСО 10303-11-2009 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 11. Методы описания. Справочное руководство по языку EXPRESS. – М.: Стандартинформ, 2010. – 202 с.
- 24.ГОСТ Р ИСО 10303-41-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 41. Интегрированные обобщенные ресурсы. Основы описания и поддержки изделий.
- 25.Далецкий С.В. Проблемы формирования системы технического обслуживания и ремонта воздушных судов гражданской авиации. - М.: Изд-во МАИ, 2001. - 135 с.

26. Далецкий С.В., Деркач О.Я., Петров А.Н. Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации. - М.: Воздушный транспорт, 2002. — 223 с.
27. Деркач О.Я. Формирование систем технического обслуживания самолетов при их создании. - М.: Машиностроение, 1993. — 216 с.
28. Друри К. Учет затрат методом стандарт-костс. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1998. - 224с.
29. Елизаров П.М., Судов Е.В., Бриндигов А.Н. и др. Послепродажное обслуживание экспортируемой продукции военного назначения: проблемы, технологии их решения и перспективы развития // Альманах «Россия: Союз технологий», 2012. – с.20-36
30. Заковряшин А.И., Агалецкий П.С. Элементы интегрированной логистической поддержки. // Труды МАИ. – 2011.- №49. – с.80-81
31. Иглсон Д.К. Канонические разложения процессов гибели и размножения, Теория вероятностей и ее применение, том 14 выпуск 2 (1969), с.217–225
32. Ицкович А. А. Оценка эффективности программ поддержания летной годности воздушных судов в центрах технического обслуживания и ремонта авиационной техники [Текст] / А.А. Ицкович, Ю.М. Чинючин, Н.Н. Смирнов, И.А. Файнбург // Научный вестник МГТУ ГА. - 2013. - № 197. - с.5-9.
33. Клочков В.В. CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты / М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008 - 124с.
34. Клочков В.В. Методы и программное обеспечение экономико-математического моделирования и оптимизации технического обслуживания и ремонта авиадвигателей // Авиакосмическая техника и технология, № 1, 2005, с. 62-68
35. Клочков В.В. Организация интегрированной логистической поддержки эксплуатации и ремонта авиадвигателей // Авиакосмическая техника и технология, № 4, 2005. - с. 52-60

36. Ключков В.В. Организация сети территориальных центров технического обслуживания и ремонта авиадвигателей // Организатор производства, № 4, 2004, с. 78-83
37. Ключков В.В., Бабкин Н.В. Современные методы реализации продукции авиационного двигателестроения // Полет, 2005. – №10. - с. 42-47
38. Костенко В.А. Алгоритмы комбинаторной оптимизации, сочетающие жадные стратегии и ограниченный перебор. // Известия РАН. Теория и системы управления, 2017. - №2. – с.48-56
39. Кудашкин В.В. Правовое регулирование военно-технического сотрудничества Российской Федерации с иностранными государствами. // дисс. докт. юрид. наук, 20.02.03., - М.: РАГС, 2003. - 342 с.
40. Кулешов А.А. Методологические основы формирования конкурентных преимуществ российской авиационной техники на этапах жизненного цикла // автореферат дисс. докт. техн. наук, 05.02.22, - Москва, 2005. – 36. с.
41. Левин А. И., Хроменко А. А. Использование имитационного моделирования в задачах управления распределенными запасами. // Научный вестник МГГУ, 2010. - № 3. - с. 3-10.
42. Левин А.И., Судов Е.В., Петров А.В., Чубарова Е.В. Расчетные задачи анализа логистической поддержки сложных технических изделий. // Материалы V Международной конференции-форума «Применение ИПИ (CALS)-технологий для повышения качества и конкурентоспособности наукоемкой продукции». - М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – с. 29-34
43. Левин А.И., Хроменко А.А. Управление распределенными многономенклатурными запасами: состояние проблемы и пути ее решения. // – Информационные технологии в проектировании и производстве, 2008, №4, с. 7-12.
44. МУ 1.1.296-2014. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Функциональные системы, зоны и планер воздушного судна. Методы планирования технического обслуживания и ремонта. – М.: ФГУП «НИИСУ», 2014. – 101 с.

45. Николаев А.М. Технология формирования стратегии послепродажного обслуживания авиационной техники российского производства в рамках военно-технического сотрудничества. // дисс. канд. экон. наук, 08.00.05., - М.: МАИ, 2010. - 192 с.
46. Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. – М.: Сов. Радио, 1969. – 400 с.
47. Новикова Н.М. Основы оптимизации. Курс лекций. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 65 с.
48. ОСТ 1 02786-2009. Типовые условия поставки и послепродажного обеспечения эксплуатации авиационной техники гражданского назначения. Общие сведения. – М.: ФГУП «НИИСУ», 2009. – 35 с.
49. Отчет о выполнении работы по теме «Разработка элементов системы интегрированной логистической поддержки самолета ТУ-204СМ», НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2008.
50. Отчет о НИР «Применение процедур каталогизации при обеспечении интегрированной логистической поддержки экспортируемой продукции военного назначения в соответствии с требованиями иностранных заказчиков», ОАО «Рособоронэкспорт», 2013. – 116 с.
51. Отчет о НИР «Разработка концепции и основ построения корпоративной системы послепродажного обслуживания продукции военного назначения Открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» имени Ф.Э.Дзержинского» шифр «А-119», 2013.
52. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. М.: Издательство «Мир», 1985. – 510 с.
53. Петров А.Н., Томич В.К. Исследования и разработка методов определения рациональной периодичности технического обслуживания функциональных систем летательного аппарата. // Труды ЛИИ, 1988. - №524. – с.1-40
54. Постановление Правительства РФ от 28 ноября 2013 г. N 1087 «Об определении случаев заключения контракта жизненного цикла»

55. Приказ Минтранса РФ от 20.06.1994 N ДВ-58 (ред. от 30.11.1995) Об утверждении Наставления по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России.
56. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управление запасами. – СПб: Питер, 2001. – 384 с.
57. Селезнева (Чубарова) Е.В. Автоматизация процессов анализа логистической поддержки изделий машиностроения в интегрированной информационной среде // дисс. канд. техн. наук, 05.13.06., М.: ЭНИМС, 2007 – 180 с.
58. Синицин И.Н., Шаламов А.С. Лекции по теории систем интегрированной логистической поддержки. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012. – 624 с.
59. Синицын И.Н. Шаламов А.С. Моделирование и синтез системы послепродажного обслуживания продуктов на стороне поставщика // Системы высокой доступности, 2013. - № 4 – с.25-47
60. Системный анализ в инженерных исследованиях: учебное пособие / В.Т. Бобронников; Министерство образования и науки Российской Федерации, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - М: Издательство МАИ, 2018. - 143 с.
61. Станкевич А.М., Суворова О.А. Типовая структура процессов технического обслуживания и ремонта авиационной техники. // Научно-технический вестник Поволжья, 2012. - №5. – с.320-323
62. Стрекоз В.Б. Мировая практика послепродажной поддержки заказчика в ОПК: смена парадигмы // Материалы IX международного форума пользователей спецификации S1000D, 2010. - Интернет-сайт www.s1000d.ru
63. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы Модели. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – 264 с.
64. Судов Е.В. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки процессов жизненного цикла наукоемкой продукции. // дисс. док. техн. наук, 05.13.06., - М.: Станкин, 2004. - 311 с.

65. Судов Е.В., Левин А.И. Петров А.В, Петров А.Н., Бороздин Д.Н. Анализ логистической поддержки. Теория и практика. – М.: ООО Издательский дом «ИнформБюро», 2014. – 260 с.
66. Судов Е.В., Левин А.И., Петров А.В., Чубарова Е.В. Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения. М.: ООО «Издательский дом «ИнформБюро», 2006. - 232 с.
67. Таха Х. Исследование операций. - М.: Вильямс И.Д., 2019. - 1056 с.
68. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие / Е.С.Вентцель, Л.А.Овчаров. - 5-е изд. - М.: КНОРУС, 2016. - 448с.
69. Турко А.Н. Особенности таможенно-правового регулирования ввоза и вывоза продукции военного назначения. // автореферат дисс. канд. юрид. наук, 12.00.14, 20.02.03., - Люберцы: РТА, 2009. - 23 с.
70. Федутин Д.В. Контракты жизненного цикла. // Военно-промышленный курьер, 2013. - №13 (481). – с.8
71. Хоботов Е.Н. Управление в технических системах. Управление запасами: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 96 с.
72. Хроменко А.А. Граничный метод оптимизации в задачах управления распределенными запасами с использованием имитационного моделирования. // СТИН, 2010. - №8. - с. 32-38.
73. Хроменко А.А. Имитационное моделирование процесса управления многономенклатурными распределенными запасами. // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2010. - №2. - с. 69-76.
74. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. - СПб.: Питер, 2005. - 479 с.
75. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 480с.
76. Чинючин Ю. М. Проблемы совершенствования системы поддержания летной годности воздушных судов [Текст] / Ю. М. Чинючин, Н. Н. Смирнов, В. С. Кирдюшкин // Научный вестник МГТУ ГА, 2012. - № 178. - с.7-12.

77. Чинючин Ю.М. Современные проблемы технической эксплуатации воздушных судов [Текст]: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 2 / Ю. М. Чинючин, Н. Н. Смирнов. - М.: МГТУ ГА, 2008. - 96 с.
78. Чмыхов А.В., Дядищев А.В., Петров А.В. Нормативные документы в области интегрированной логистической поддержки и практика их применения для изделий авионики. // Авиакосмическое приборостроение, 2016. - №1. - с. 43-52.
79. Шаламов А.С. Интегрированная логистическая поддержка наукоемкой продукции. - М.: Университетская книга. 2008. - 464 с.
80. Шура-Бура А.Э., Топольский М.В. Методы организации, расчета и оптимизации комплектов запасных элементов сложных технических систем. – М.: Знание, 1981. – С.58-112
81. Шура-Бура, А.Э. Обеспечение технических объектов запасными элементами / А.Э. Шура-Бура // Надежность технических систем: Справочник. Гл. 14. -М.: Радио и связь, 1985. -С.205-233.
82. Ямпольский С.М., Головин В.Я., Рубинов В.И. Модель функционирования перспективной системы для автоматизированного планирования мероприятий инженерного авиационного обеспечения // Вестник Московского авиационного института, 2012. - № 3. - с.19-26.
83. Яцкевич А.И. Разработка и исследование методов управления конструкторскими данными в компьютеризированном интегрированном производстве // дисс. канд. техн. наук, 05.13.06., - М.: ЭНИМС, 2003. - 175 с.
84. ASD S3000L. International procedure specification for Logistics Support Analysis, 2009
85. Bajari P., Tadelis S. Incentives versus Transaction Costs: a theory of procurement contracts // RAND Journal of Economics, 2001. – Vol.32, No.3, с.387-407
86. Basten R.J.I., Schutten J.M.J., M.C. van der Heijden. Level of Repair Analysis: A Generic Model. – Enschede: University of Twente, 2008. – 33с.
87. DEF STAN 00-60. Integrated Logistic Support, 2004 // Стандарт министерства обороны Великобритании

88. Elmon A. Genest. Integrated Logistic Support: from Concept to Reality. - Washington: Industrial College of Armed Forces, 1969. - 37 c.
89. Guajardo J.A., M. Cohen, S. Netessine, S.-H. Kim. Impact of Performance Based Contracting on Product Reliability: An Empirical Analysis. // Management Science, 2012. – Vol.58, No.5
90. IEC 60300-3-3 IEC 60300-3-3 Dependability management. Part 3-3: Application guide - Life cycle costing, 2005. – 130 c.
91. Jiujiu Fan, Linhan Guo, Yi Yang, Rui Kang. EBO Optimization Considering the Joint of LORA and Spare Stocks. // Chemical Engineering Transactions, 2013 - №33. – c. 631-636
92. Kim S.-H., M. Cohen, S. Netessine, S. Veeraraghavan. Contracting for Infrequent Restoration and Recovery of Mission-Critical Systems // Management Science, 2010. – Vol.56, No.9, c.1551-1567
93. Kim S.-H., M.A. Cohen, S. Netessine. Performance contracting in after sales supply chains // Management Science, 2007. – Vol.53, No.12. – c.1843-1858
94. Leite J.D. Engine Contract Comparisons // Engine Yearbook, 2003. – c. 26-31
95. MIL-STD 1388 Logistic Support Analysis, 1983 // Стандарт министерства обороны США
96. Operating and Support Cost Estimating Guide, U.S. Department of Defense (DoD), 2007. – 56 c.
97. Performance Based Contracting Handbook // Australian DoD, DMO, Aerospace Systems Division, 2007, c. 138
98. Performance Based Logistics. A Program Manager's Product Support Guide. – Defense Acquisition University Press, 2005. – c.75
99. Performance Based Logistics: A Global Trend in the Aerospace & Defence Sector. – Frost & Sullivan Market Insight, 2009. – c. 15
100. Plambeck E.L., Zenios S.A.. Performance-Based Incentives in a Dynamic Principal-Agent Model // Manufacturing and Service Operations Management, 2000. – Vol.2, No.3, c.240-263

101. Saranga H., Kumar U.D. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms - level of repair analysis // *Annals of Operations Research* 143(1), 2006. – c. 91-106
102. Sherbrooke Craig C. VARI-METRIC: Improved Approximations for Multi-Indenture, Multi-Echelon Availability Models. // *Operations Research*, 1986. - №34. – c. 311-319
103. Sherbrooke Craig C., *Optimal Inventory Modeling of Systems. Multi-Echelon Techniques.* - Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 349 c.
104. Sherbrooke Craig C.. METRIC: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control. // *Operations Research*, 1968. - №16. – c. 122-141.
105. Taoufik Bouachera, Mohammed Kishk, Laurie Power. *Level of Repair Analysis based on Genetic Algorithm with Tabu Search.* – London: World Congress on Engineering, 2010. – 7 c.
106. Taoufik Bouachera. *Whole life costing optimization with integrated logistics considerations.* - Aberdeen: Robert Gordon University Press, 2012. - 216 c.
107. *The mathematical model* // *Airbus Integrated Provisioning Services*, 2014 - №17. – c. 3-12
108. TR-SAS -054. Technical report. *Methods and Models for Life Cycle Costing*, 2007. – 226 c.
109. Vitasek K., Cothran J., Geary S., Rutner S. *Performance Based Logistics. The Changing Landscape in Support Contracting.* – University of Tennessee White Paper, 2006. – c. 11
110. VIVACE 1.6/2/EADS-CRC-F/T/06030-1.0 *Report on maintenance economics model dissemination*, 2005. – 12 c.