

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)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ)

- Научный руководитель: **Буряк Юрий Иванович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по направлению маркировка Общества с ограниченной ответственностью «Элемент-Инжиниринг», по совместительству профессор кафедры «Прикладная информатика» Московского авиационного института
- Официальные оппоненты: **Мухин Иван Ефимович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный конструктор специальных проектов Акционерного общества «Авиаавтоматика» имени В.В.Тарасова», по совместительству профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет»
- Благодарящев Игорь Вадимович**
кандидат технических наук, доцент, начальник отделения мониторинга программ беспилотных авиационных систем департамента беспилотных авиационных систем Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил» Министерства обороны Российской Федерации

Защита состоится «15» июня 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=171093

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.327.03,
доктор технических наук, доцент

Старков А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, C. 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.

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 ВС 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.

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.

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.

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», АО «НЦВ Миль и Камов».

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.

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», 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».

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)

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.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы исследования, ее актуальность для отечественных предприятий авиационной промышленности, сформулированы цели, задачи, объект и предмет исследования, представлены сведения о научной новизне, практической значимости, апробации результатов исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор существующих подходов к повышению эффективности ТЭ АТ. По результатам анализа отечественных и зарубежных работ сделан вывод, что в современных условиях основным инструментом для обеспечения требуемого уровня эксплуатационной готовности АТ при минимальных затратах являются технологии ИЛП. Показано, что комплекс технологий ИЛП включает в себя стандартизованный перечень задач, выполняемых на разных стадиях жизненного цикла АТ. При этом отмечено, что задача синтеза системы МТО в многоуровневой системе ТЭ, в зарубежной практике называемая анализом уровней ремонта (level of repair analysis), а в отечественных документах – анализом уровней ТОиР, может быть решена с использованием аппарата системного анализа на основе результатов ИЛП.

Показано, что достижение минимальных эксплуатационных затрат при обеспечении требуемого уровня готовности возможно, в том числе, за счет формирования интегрированной системы ТОиР и МТО, обеспечивающей наилучшее

распределение работ по ремонту СЧ ВС по организационным уровням ТОиР – на линейных станциях (для военной АТ - в авиационно-технических отрядах), авиационно-технической базе (технико-эксплуатационной части), сервисных центрах, на ремонтных предприятиях, заводе-изготовителе и т.п. Эта задача предполагает выбор для каждой ремонтнопригодной СЧ ВС одной из стратегий поддержания готовности: формирование необходимого объема запасов этого типа СЧ в многоуровневой системе МТО, или развертывание пунктов по ремонту в местах эксплуатации (региональных сервисных центрах).

Учитывая установленные нормативными документами принципы эксплуатации АТ, предписывающие выполнение заданного перечня работ по ТОиР силами и средствами линейных станций и авиационно-технических баз, к варьируемым параметрам, исследуемым в ходе синтеза системы МТО, можно отнести: состав пунктов по ремонту СЧ ВС в сервисных центрах, количество ремонтных ячеек в пунктах по ремонту СЧ, начальные запасы средств материалов и запасных частей.

На примере самолета Ту-204 показано, что при достаточно высокой надежности конструкции ВС фактический уровень готовности оказывается существенно ниже требуемых значений. Отмечено, что одной из причин неплановых простоев ВС является длительный срок поставки средств МТО и выполнения ремонтов СЧ, связанный с несовершенством инженерно-технических методов планирования обеспечения ТЭ и, соответственно, формированием неэффективной системы МТО для фактических условий эксплуатации парка ВС. Также отмечено, что в связи с увеличением сложности АТ одной из тенденций является переход к обеспечению ТЭ на основе т.н. контрактов жизненного цикла. В этом случае формирование системы МТО, позволяющей обеспечить требуемый уровень готовности при минимальных затратах, является для производителя критической задачей.

Проведен анализ существующих методов и алгоритмов синтеза системы МТО, в том числе методов анализа уровней ТОиР СЧ ВС, определения рационального количества ремонтных ячеек в ремонтных органах, алгоритмов оптимизации объемов запасных частей. Отмечено, что в этих методах и алгоритмах используется большое количество разнородных входных данных, часть из которых хранится в базе данных АЛП. Показано, что с учетом требований контракта жизненного цикла рассматриваемая задача синтеза многоуровневой системы МТО может быть записана как оптимизационная:

$$\begin{aligned} f_C(\bar{\gamma}, X) &\rightarrow \min \\ K_{\text{ЭГ}}(\bar{\gamma}, X) &\geq \varphi, \\ I_{\text{ИНФ}}(\bar{\gamma}, X) &< \mu, \end{aligned} \quad (1)$$

где $f_C(\bar{\gamma}, X)$ – функция суммарных затрат на обеспечение ТЭ, определяемая математической моделью системы МТО; $\bar{\gamma}$ – вектор, компоненты которого определяют уровень ТОиР для каждой ремонтнопригодной СЧ ВС; X – множество постоянных параметров; $K_{\text{ЭГ}}(\bar{\gamma}, X)$ – функция расчета КЭГ; φ – требуемое значение КЭГ; $I_{\text{ИНФ}}(\bar{\gamma}, X)$ – функция затрат на инфраструктуру, μ – предельная величина допустимых затрат на развертывание инфраструктуры сервисных центров. Компоненты вектора $\bar{\gamma}$ могут принимать следующие значения: 0 - СЧ после отказа направляется в ремонт на завод-изготовитель, 1- СЧ после отказа направляется в ремонт в сервисный центр вышестоящего уровня.

Отмечено, что коэффициент эксплуатационной готовности можно представить как произведение коэффициентов готовности, планируемого применения и готовности запаса: $K_{ЭГ} = K_{пп} K_{Г_{\infty}} K_{Г_{МТО}}$, что позволяет использовать в задаче (1) коэффициент готовности системы МТО ($K_{Г_{МТО}}$) вместо $K_{ЭГ}$.

Таким образом, для решения задачи (1) необходимо:

- 1) Определить функцию суммарных затрат на обеспечение ТЭ;
- 2) Дополнить информационную модель базы данных АЛП сущностями и атрибутами для хранения исходных данных;
- 3) Разработать алгоритм оптимизации параметров системы МТО, то есть выбора оптимальных объемов запасов в каждом сервисном центре;
- 4) Разработать алгоритм совместной оптимизации параметров системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров на основе выбора оптимальных уровней ТОиР \bar{y} для каждой СЧ ВС.

Вторая глава диссертации посвящена разработке методики расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ, дополненной информационной модели АЛП, алгоритмов выбора оптимальных уровней ТОиР СЧ ВС и оптимизации параметров многоуровневой системы МТО.

Предложена **модель описания многоуровневой системы МТО**, отражающая зависимость величины суммарных затрат на обеспечение ТЭ (как показателя эффективности) от множества входных параметров, в том числе распределения работ по уровням (как множества альтернатив). С учетом предложенной модели и принятых допущений задача (1) может быть представлена в виде:

$$f_c(\bar{y}, X) = \sum_{i=1}^M C_i(\bar{y}, X) \rightarrow \min \quad (2)$$

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

$$I_{инф}(\bar{y}, X) < \mu,$$

где M – количество учитываемых статей затрат; $C_i(\bar{y}, X)$ – расчетная функция для i -й статьи затрат.

Предложено для расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ использовать их постатейную оценку инженерным методом. Рассмотрены существующие способы структуризации затрат по статьям, описанные в отечественных и зарубежных нормативных документах. По результатам анализа выделено 13 статей затрат, классифицированных по следующим признакам: по времени возникновения (начальные и периодические), по характеру (затраты на труд, затраты на материалы, затраты на ремонт СЧ во внешних организациях), по отношению к ТОиР как виду деятельности (прямые и косвенные), по прогнозируемости возникновения (неплановые и плановые). Предложенная структура затрат представлена на рис.1.

Предложена **методика расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ**, основанная на расчете каждой из предложенных статей затрат.

Так, например, величина затрат на запасные части и расходные материалы, используемые при проведении непланового ТО, рассчитывается по формуле:

$$C_{НТО.зчм} = N_{ВС} \cdot T_{с.с} \cdot \tau_{год} \sum_{i=1}^{N_{СЧ}} n_i \cdot \lambda_i \cdot (K_i^* + \sum_{j=1}^{N_{ЗАМ.ПМ_i}} C_{ЗАМ.ПМ_{ij}} \cdot q_{ЗАМ.ПМ_{ij}}), \quad (3)$$

где N_{BC} – количество ВС в эксплуатируемом парке, $T_{с.с}$ - срок службы ВС в годах, $\tau_{год}$ – средняя наработка 1-го ВС в год, выраженная в летних часах, $N_{сч}$ – количество типов составных частей в составе ВС, n_i – количество СЧ i -го типа в составе ВС, λ_i – интенсивность отказов СЧ i -го типа в составе ВС, $N_{ЗАМ.РМ_i}$ – количество типов расходных материалов, используемых при замене i -го типа СЧ ВС, $C_{ЗАМ.РМ_{ij}}$ – стоимость единицы расходного материала j -го типа, используемого при замене i -го типа СЧ ВС, $q_{ЗАМ.РМ_{ij}}$ – количество единиц расходного материала j -го типа, используемого при замене i -го типа СЧ ВС, K_i^* – затраты на восстановление отказавших изделий:

$$K_i^* = \begin{cases} C_{сч_i}, & \text{для невозстанавливаемых СЧ} \\ \rho_i C_{сч_i}, & \text{для восстанавливаемых СЧ} \end{cases}, \quad (4)$$

где ρ_i – доля стоимости ремонта СЧ i -го типа от ее цены, $C_{сч_j}$ – стоимость одной СЧ j -го типа.

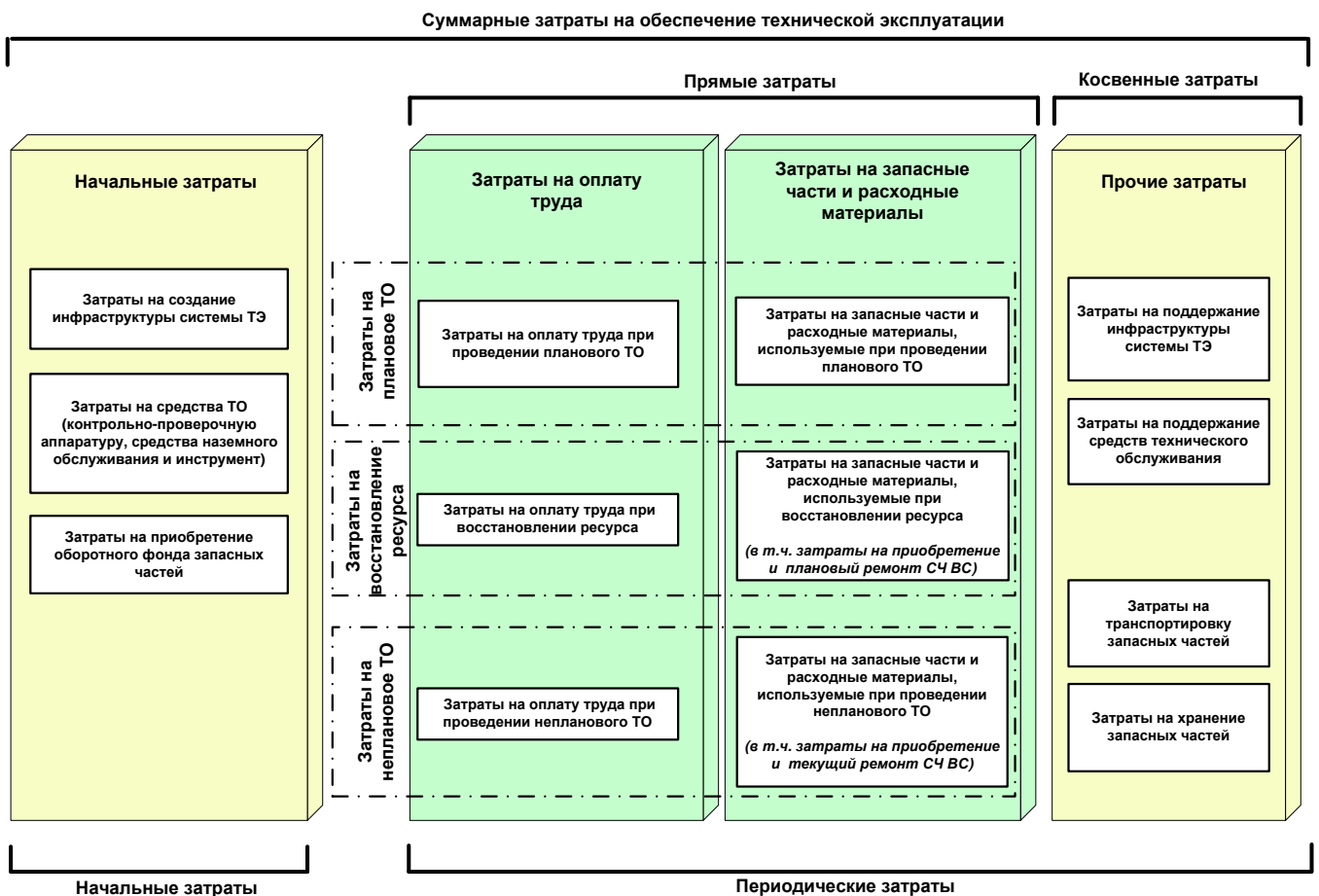


Рис. 1. Структура суммарных затрат на обеспечение ТЭ АТ

Таким образом, определен состав и методики расчета статей затрат, используемых в задаче (2) в качестве целевой функции. Функции для расчета отдельных статей затрат в качестве параметров используют переменные, определяющие уровень ТОиР для СЧ ВС \bar{y} и начальный объем запасов для каждой СЧ ВС в i -ом сервисном центре $A_{сч_i}$.

Входные данные, необходимые для расчета суммарных затрат на обеспечение ТЭ, классифицированы по следующим категориям: данные о ВС, данные о СЧ ВС, данные о сценариях эксплуатации ВС, видах и технологии планового и непланового ТО, средствах

ТО, расходных материалах, сервисных центрах и логистических потоках. Всего выделено 43 типа исходных параметров, часть из которых хранится в базе данных АЛП. В связи с большим объемом необходимых для расчетов входных данных, для их структурированного представления отмечена целесообразность использования базы данных АЛП.

Для этого предложено расширить известную информационную модель АЛП, дополнив ее сущностями и атрибутами, необходимыми для структурированного представления данных о сервисных центрах, параметрах хранения и транспортировки запасных частей. С использованием объектно-ориентированного подхода **разработана информационная модель АЛП**, включающая в себя 12 новых сущностей. Отмечено, что разработанная информационная модель может быть реализована в программных комплексах для формирования схемы базы данных. Фрагмент разработанной информационной модели, выполненный в нотации EXPRESS-G, представлен на рис.2.

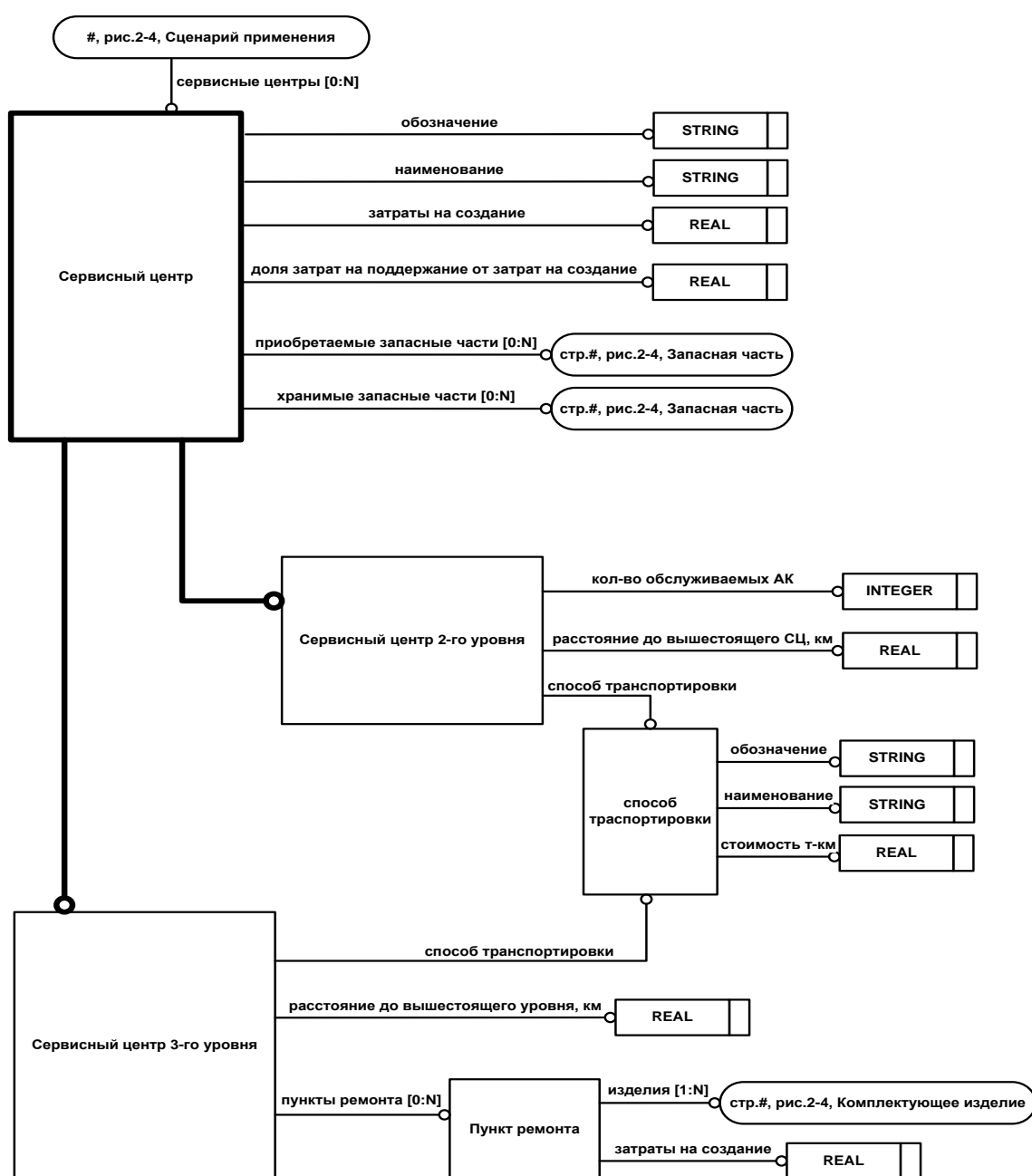


Рис. 2. Группа сущностей информационной модели для описания характеристик сервисных центров

Для оценки начального объема запасов каждого типа СЧ ВС в i -ом сервисном центре $\overline{A_{СЧ_i}}$ предложен **алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы МТО**. Отмечено, что для АТ система МТО состоит из 4-х уровней: групповой ЗИП, склад авиационно-технической базы, региональный склад сервисного центра, центральный склад поставщика АТ. При этом запасы на центральном складе поставщика (4-й уровень) можно рассматривать как неисчерпаемые, а запасы в групповом ЗИП (1-й уровень) учитываются при расчете коэффициента готовности ВС. Таким образом, в задаче (2) в качестве ограничений можно рассматривать коэффициенты готовности системы МТО на 2-м и 3-м уровнях. Подставив в целевую функцию задачи (2) функции для расчета статей затрат и сократив слагаемые, не зависящие от объемов запасов $\overline{A_{СЧ_i}}$, задачу (2) можно записать как:

$$f_{\text{МТО}} \left(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ_1}}, \dots, \overline{A_{СЧ_{N_{СЧ}}}} \right) = I_{\text{ЗЧ}} + K_{\text{ТрЗЧ}} + K_{\text{ХрЗЧ}} \rightarrow \min \quad (5)$$

$$K_{\text{ГМТО}} \left(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ_1}}, \dots, \overline{A_{СЧ_{N_{СЧ}}}} \right) = K_{\text{ГМТО}}^{(2)} \left(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ_1}^{(2)}}, \dots, \overline{A_{СЧ_j}^{(2)}} \right) K_{\text{ГМТО}}^{(3)} \left(\bar{\gamma}, \overline{A_{СЧ}^{(3)}} \right) \geq \varphi$$

где $I_{\text{ЗЧ}}$ – начальные затраты на приобретение ЗЧ, $K_{\text{ТрЗЧ}}$ – затраты на транспортировку ЗЧ, $K_{\text{ХрЗЧ}}$ – затраты на хранение ЗЧ, $K_{\text{ГМТО}}^{(2)}$, $K_{\text{ГМТО}}^{(3)}$ – функции расчета коэффициента готовности системы МТО на 2-м и 3-м уровнях, соответственно, $\overline{A_{СЧ_i}^{(2)}}$, $\overline{A_{СЧ}^{(3)}}$ – объемы запасов на 2-м и 3-м уровнях, соответственно.

Получить заданную величину φ можно при помощи различных комбинаций коэффициентов $K_{\text{ГМТО}}^{(2)}$ и $K_{\text{ГМТО}}^{(3)}$. Параметры системы МТО $\overline{A_{СЧ}^{(3)}}$ и $\overline{A_{СЧ_i}^{(2)}}$ должны определяться таким образом, чтобы обеспечить наилучшее сочетание $K_{\text{ГМТО}}^{(2)}$ и $K_{\text{ГМТО}}^{(3)}$ – такое, при котором величина $f_{\text{МТО}}$ минимальна. Непосредственно алгоритм определения параметров системы МТО на 3-м уровне (алгоритм для уровня 2 аналогичен) представлен на рис.3, реализует метод градиентного спуска и состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Определяется начальный вектор $\overline{Z^{(0)}}$, в котором запасы всех типов СЧ равны минимально допустимым значениям исходя из требуемого коэффициента готовности системы МТО φ . Значение компонентов вектора $Z_i^{(0)}$, можно получить путем решения следующего неравенства относительно k :

$$\varphi \leq \sum_{j=0}^k \frac{(h_i \lambda_i)^j}{j!} e^{-h_i \lambda_i} \quad (6)$$

где h_i – количество эксплуатируемых СЧ i -го типа.

Шаг $i+1$. На $i+1$ шаге рассматриваются вектора $\overline{Z^{(i)(+j)}}$, полученные путем увеличения величины запасов j -го типа СЧ на единицу. Для каждого j -го типа запасных частей рассчитывается значение:

$$\Delta N_j = \frac{\ln K_{\text{ГМТО}}^{(3)} \left(\overline{Z^{(i)(+j)}} \right) - \ln K_{\text{ГМТО}}^{(3)} \left(\overline{Z^{(i)}} \right)}{C_j} \quad (7)$$

Значение $K_{\text{ГМТО}}^{(3)}$ рассчитывается с использованием зависимостей, описанных в работах Г.Н.Черкесова. Величина C_j рассчитывается следующим образом:

$$\text{Для 3-го уровня: } C_j = C_{\text{сч}j} + \frac{M_j}{1000} L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i} + T_{\text{с.с}} \frac{c_{\text{хр}j}}{2} \quad (8)$$

$$\text{Для 2-го уровня: } C_j = C_{\text{сч}j} + \frac{M_j}{1000} (L_{2 \rightarrow 3i} R_{2 \rightarrow 3i} + L_{3 \rightarrow 4i} R_{3 \rightarrow 4i}) + T_{\text{с.с}} \frac{c_{\text{хр}j}}{2} \quad (9)$$

где M_j – масса СЧ j -го типа, $L_{3 \rightarrow 4i}, R_{3 \rightarrow 4i}$ – дальность и стоимость тонно-километра перевозки грузов между 3 и 4 уровнями системы МТО, соответственно, $c_{\text{хр}j}$ – средняя годовая стоимость хранения СЧ j -го типа, $L_{2 \rightarrow 3i}, R_{2 \rightarrow 3i}$ – дальность и стоимость тонно-километра перевозки грузов между 2 и 3 уровнями системы МТО, соответственно.

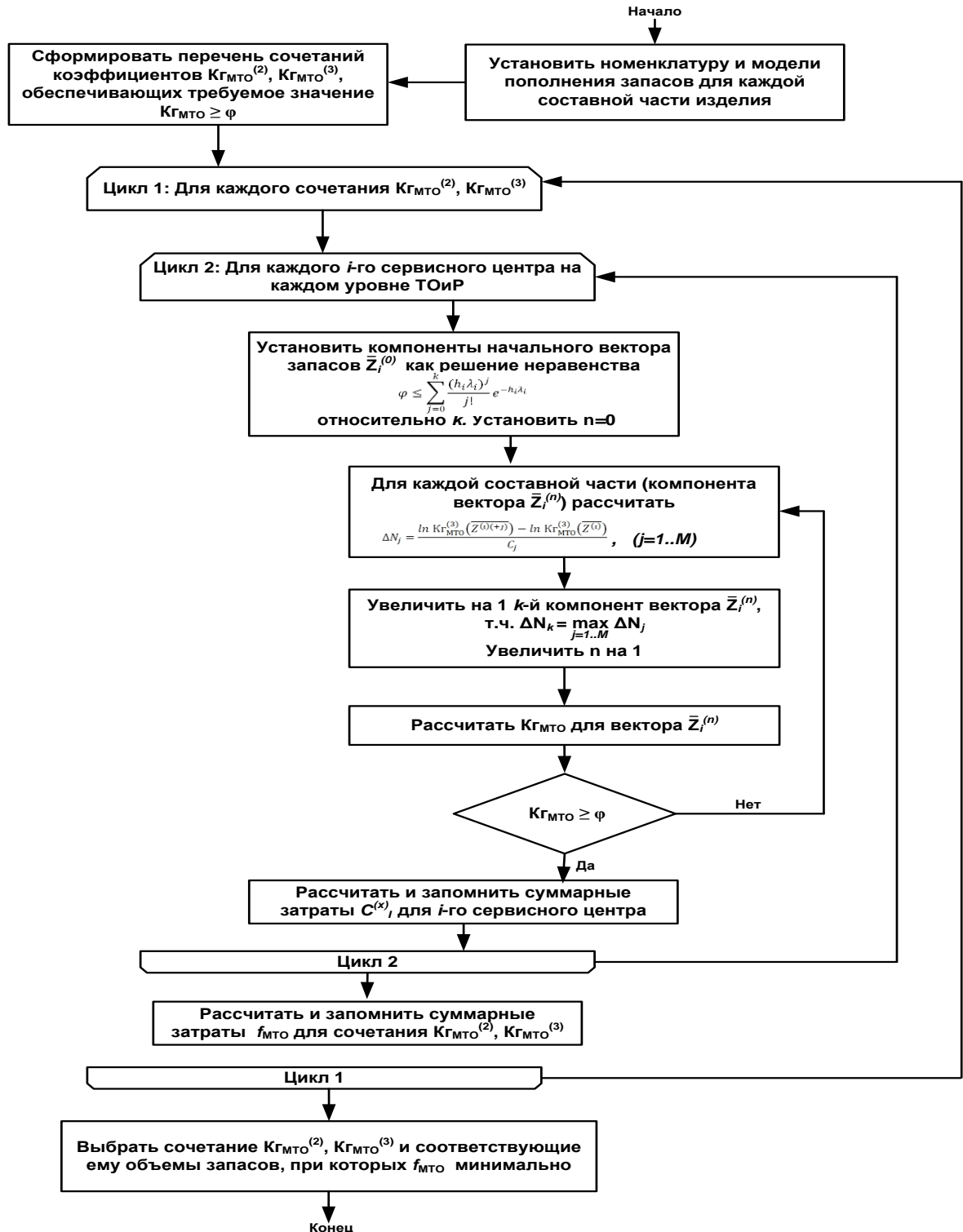


Рис. 3 Алгоритм оптимизации параметров многоуровневой системы МТО

Значение вектора $\overline{Z^{(l+1)}}$ устанавливается равным значению вектора $\overline{Z^{(l)(+j)}}$ с таким индексом j , для которого величина ΔN_j максимальна. После этого выполняется проверка условия $K_{\text{МТО}}^{(3)}(\overline{Z^{(l+1)}}) \geq \varphi$. Если это условие выполняется, искомый вектор $\overline{A_{\text{СЧ}}^{(3)}}$ равен $\overline{Z^{(l+1)}}$.

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

Для определения оптимальных уровней $\bar{\gamma}$ предложен **алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров**. Вектор $\bar{\gamma}$ должен представлять собой результат решения задачи выбора оптимального уровня ТОиР, на котором каждая ремонтпригодная СЧ ВС восстанавливается путем замены входящих в ее состав узлов и агрегатов, настройки, регулировки и т.п. Такое распределение 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.

Подставив в целевую функцию задачи (2) функции для расчета статей затрат и сократив слагаемые, не зависящие от объемов запасов и распределения СЧ по уровням ТОиР, целевую функцию можно записать как:

$$g(\bar{\gamma}, \overline{A_{\text{СЧ}}}, \overline{A_{\text{ХР}}}) = I_{\text{ИНФ}} + I_{\text{ЗЧ}} + C_{\text{НТО.ЗЧМ}} + K_{\text{ИНФ}} + K_{\text{ТрЗЧ}} + K_{\text{ХрЗЧ}} \rightarrow \min \quad (10)$$

где $I_{\text{ИНФ}}$ - затраты на создание инфраструктуры, $I_{\text{ЗЧ}}$ - затраты на приобретение ЗЧ, $C_{\text{НТО.ЗЧМ}}$ - затраты на ЗЧ и расходные материалы, используемые при проведении непланового ТО, $K_{\text{ИНФ}}$ - затраты на поддержание инфраструктуры, $K_{\text{ТрЗЧ}}$ - затраты на транспортировку ЗЧ, $K_{\text{ХрЗЧ}}$ - затраты на хранение ЗЧ.

Решаемая задача относится к классу NP-полных задач комбинаторной оптимизации. Для ее решения предложено использовать алгоритм, основанный на расчете «удельного веса» принятого решения о ремонте j -й составной части изделия в сервисном центре (рис.4). «Удельный вес» σ_j рассчитывается как разница целевых функций (10) при ремонте j -й составной части изделия на заводе-изготовителе и в сервисном центре:

$$\begin{aligned} \sigma_j = & q_{\text{СЧ}_{ij}} \left(\frac{M_j}{500} L_{3 \rightarrow 4_i} R_{3 \rightarrow 4_i} + C_{\text{СЧ}_j} \right) + q_{\text{ХР}_{ij}} c_{\text{ХР}_j} - I_{\text{ПР}_j} (1 + \rho_{\text{ИНФ}_i}) + \\ & + N_{\text{ВС}} T_{\text{с.с}} \tau_{\text{год}} n_j \lambda_j \times \\ & \times \left(\frac{M_j}{500} L_{3 \rightarrow 4_i} R_{3 \rightarrow 4_i} + (\rho_i - \rho_i^*) C_{\text{СЧ}_i} - \frac{m_j}{1000} L_{3 \rightarrow 4_i} R_{3 \rightarrow 4_i} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

где $q_{\text{СЧ}_{ij}}$ - количество ЗЧ j -го типа, приобретаемых для i -го сервисного центра, $q_{\text{ХР}_{ij}}$ - среднее количество хранимых ЗЧ j -го типа в i -м сервисном центре, $I_{\text{ПР}_j}$ - стоимость создания в сервисном центре пункта по ремонту j -го типа СЧ ВС, $\rho_{\text{ИНФ}_i}$ - доля суммарных годовых затрат на поддержание i -го сервисного центра от затрат на его создание, 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.

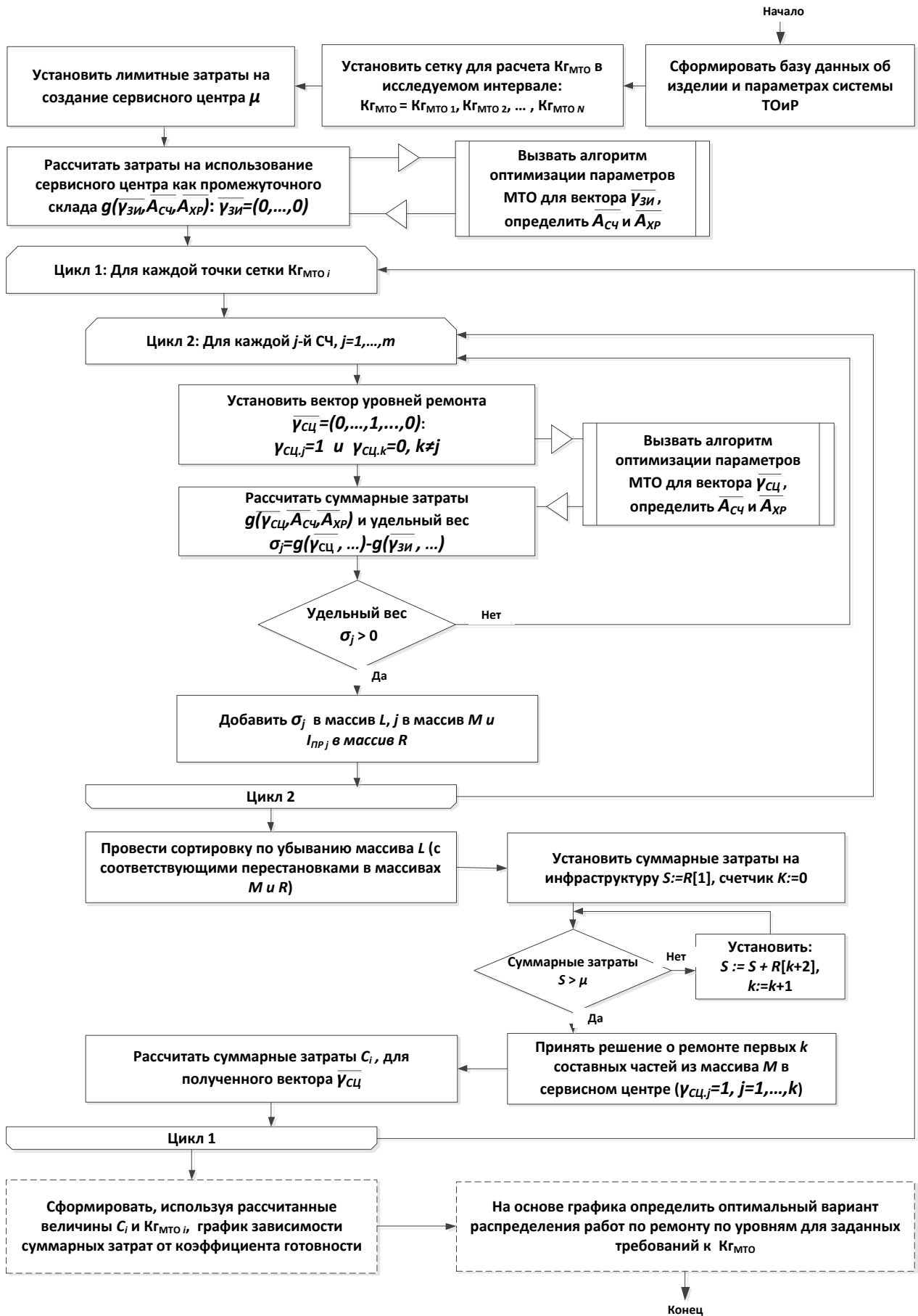


Рис. 4. Алгоритм совместной оптимизации параметров многоуровневой системы МТО и производственных мощностей региональных сервисных центров

Предложенный алгоритм включает в себя следующие шаги:

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

2) Последовательное, для различных требований к $K_{ГМТО}$, решение на массиве исходных данных оптимизационной задачи с использованием «жадного» алгоритма:

- 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 (11);

- 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 $\overline{Y_{СЦ}}$, у которого значения элементов с номерами из первых n компонентов массива M равны 1, а значения остальных элементов равны 0;

- расчет величины суммарных затрат на обеспечение ТЭ для вектора $\overline{Y_{СЦ}}$ в соответствии с предложенной методикой.

3) Формирование, при необходимости, по результатам решения оптимизационных задач графиков зависимостей затрат на обеспечение ТЭ от величины $K_{ГМТО}$ и размера парка ВС.

4) Определение на основе графиков диапазонов значений $K_{ГМТО}$, для которых оптимальным будет являться тот или иной вариант распределения СЧ ВС по уровням ТОиР.

Решение указанной задачи предполагает использование больших объемов данных, что обуславливает необходимость применения специальных программных комплексов.

Третья глава диссертации посвящена разработанному **программному комплексу синтеза многоуровневой системы МТО** и оценке эффективности его применения.

Программный комплекс включает в себя 11 программных компонентов, функционально разделенных на три группы:

1) Компоненты для решения задач АЛП: 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 структуры и параметров системы МТО: компонент для ведения данных о сценариях эксплуатации ВС, компонент для ведения данных об уровнях ТОиР СЧ ВС, компонент для ввода данных о параметрах поставки запасных частей, а также основной компонент для ведения данных о размещении объектов инфраструктуры системы ТЭ.

3) Компоненты, решающие оптимизационные задачи (4), (9) и, таким образом, определяющие наилучшую структуру и параметры системы МТО: компонент для расчета производственных 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.

Непосредственно автором разработана третья группа компонентов.

Для оценки эффективности предложенных метода и алгоритмов, при помощи разработанного программного комплекса проведены расчеты для контрольного примера, включающего в себя отдельные блоки легкого многоцелевого вертолета VRT500. Оценка проводилась для следующих составных частей комплекса бортового оборудования: радиовысотомер (RADALT), штормоскоп, курсовертикаль (ADAHRS), дальномер.

В рамках контрольного примера предполагалось, что вертолеты размещены в трех местах дислокации (рис.5), в которых размещено 10, 10 и 16 вертолетов. Также исследована зависимость затрат от размера парка. Рассмотрено два варианта размещения объектов инфраструктуры – с развертыванием регионального склада (вариант 1) и регионального сервисного центра (вариант 2). Анализ для перечисленных блоков VRT500 выполнялся 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 предложенных методики и алгоритмов суммарных затрат на обеспечение ТЭ для каждого варианта размещения пунктов по ремонту.

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

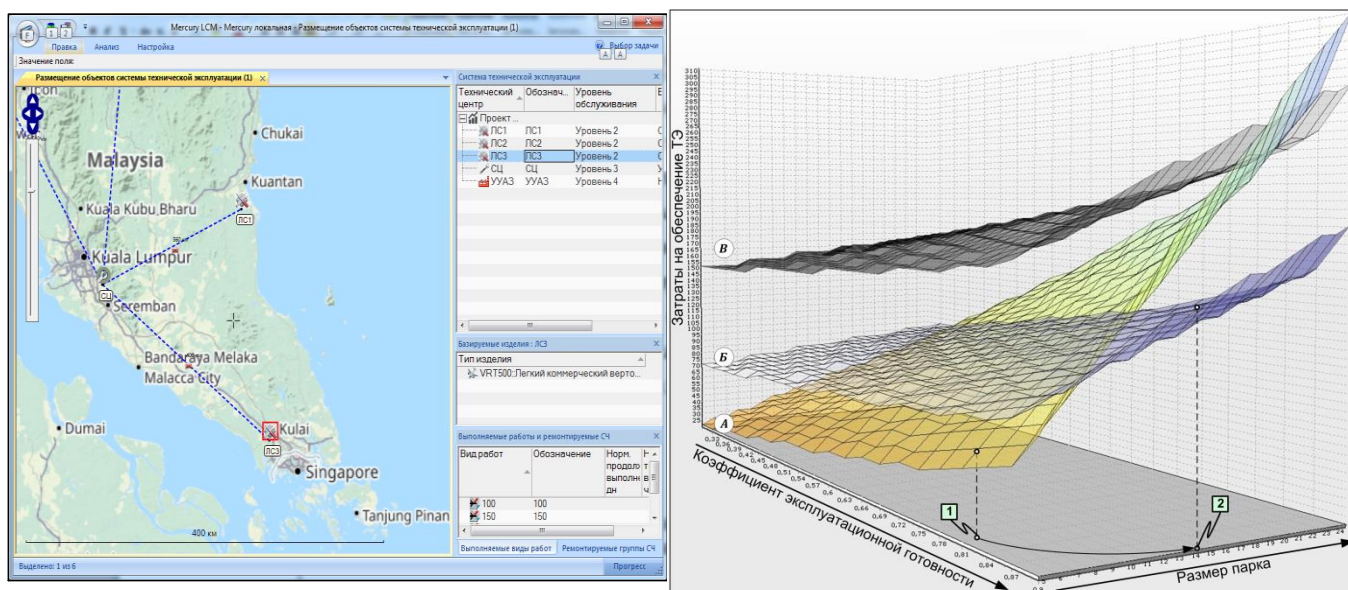


Рис. 5. Размещение объектов инфраструктуры системы ТЭ и график зависимости суммарных затрат от размера парка и коэффициента эксплуатационной готовности

Результаты расчета показали целесообразность развертывания регионального сервисного центра для ремонта курсовертикали с 4-мя ремонтными ячейками. С использованием предложенного метода проведено сравнение затрат на обеспечение ТЭ при использовании полученных при помощи программного комплекса параметров системы МТО, а также при использовании параметров, установленных действующей документацией на ВС. Расчет показал, что для изделия комплекса бортового оборудования вертолета экономический эффект от применения разработанных алгоритмов составляет 12%.

В заключении сформулированы выводы и основные результаты диссертационной работы.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы и результаты работы:

1) На основе проведенного анализа существующих подходов к обеспечению ТЭ 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 ТЭ.

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 МТО 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 ТЭ предложена методика расчета показателей этих затрат. 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 АЛП, обеспечивающая описание в информационных системах сведений о дислокации 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 АЛП 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», ОКБ Сухого ПАО «ОАК», позволило сформировать научно обоснованные подходы к планированию послепродажного обслуживания АТ, повысить эффективность и сократить затраты на обеспечение ее ТЭ.

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 ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ:

1. Буряк Ю.И., Михальченко И.Н., Петров А.В. Автоматизированная технология управления интегрированными процессами технического обслуживания, ремонта и материально-технического обеспечения. // Автоматизация в промышленности, 2022. - №3. – с.38-44
2. 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.
3. Петров А.В. Методы расчета и анализа прямых затрат на техническую эксплуатацию сложной машиностроительной продукции. // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2012. - №1. - с. 71-76.
4. Петров А.В. Применение методов имитационного моделирования при выполнении анализа логистической поддержки наукоемких изделий. // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2011. - №4, с. 26-31.

Монографии:

5. Судов Е.В., Левин А.И., Петров А.В, Чубарова Е.В. Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения. – М.: ООО Издательский дом «ИнформБюро», 2006. - с. 107-166.
6. Судов Е.В., Левин А.И., Петров А.Н, Петров А.В, Бороздин Д.Н. Анализ логистической поддержки: теория и практика. – М: ООО Издательство «ИнформБюро», 2014. – с. 196-206, 215-223, 226-241
7. Судов Е.В., Петров А.Н., Петров А.В., Осяев А.Т., Серебрянский С.А. Технологии интегрированной логистической поддержки в процессах жизненного цикла авиационной техники. Учебное пособие. – М.: Эдитус, 2018. - с. 118-131, 153-167.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ:

8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Петров А.В., Бороздин Д.Н., Кобзев Д.В., Лобанов А.А., Михеев Н.А. «Программный комплекс технико-экономического моделирования процессов технической эксплуатации изделий «Mercury», версия 1». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664222 от 25.08.2021г.

Другие публикации:

12. Судов Е.В., Левин А.И., Петров 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
13. Петров А.В., Судов Е.В. Технологии анализа затрат на техническую эксплуатацию продукции военного назначения. // Альманах «Россия: Союз технологий», 2012. – С.91-96.
14. Петров А.В., Судов Е.В. Программные средства интегрированной логистической поддержки экспортируемой продукции военного назначения. // Альманах «Россия: Союз технологий», 2012. – С.107-113.
15. 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