

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Титов Юрий Павлович

**МЕТОД ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И КОМПЛЕКС
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОСЛЕПРОДАЖНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хахулин Геннадий Федорович

Москва — 2015 год

Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов

АТ ВН	-	авиационная техника военного назначения
ЖЦ	-	жизненный цикл
ППО	-	послепродажное обслуживание
АЧ	-	авиационная часть
СППО	-	система послепродажного обслуживания
ТИ	-	техническое изделие
ИЛП	-	интегрированная логистическая поддержка
МТО	-	материально-техническое обеспечение
ТОиР	-	техническое обслуживание и ремонт
ТО	-	техническое обслуживание
ПИ	-	предприятие-изготовитель
ЗЧ	-	запасная часть
СЧ	-	составная часть
ТС	-	транспортная сеть
АРЗ	-	авиационный-ремонтный завод
НС	-	надежностная структура
ВБР	-	время безотказной работы
ЗР	-	закон распределения
СППР	-	система поддержки принятия решений
ЛПР	-	лицо, принимающее решения
КВИМ	-	комплекс взаимосвязанных имитационных моделей
КОРМ	-	критерий оценки результатов моделирования
СБС	-	список будущих событий
ТЦ	-	технический центр
ВО	-	внезапный отказ
ИО	-	износостойкий отказ
ЭЗР	-	экспоненциальный закон распределения
НЗР	-	нормальный закон распределения
ММК	-	метод муравьиных колоний
ГР	-	граф решений
СКиРД	-	система кондиционирования и регулирования давления

Содержание

Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов	2
Введение.....	5
Глава 1. Системотехнический анализ системы и процессов послепродажного обслуживания авиационной техники военного назначения и методов их исследования.....	9
1.1. Послепродажное обслуживание авиационной техники военного назначения – важный этап их жизненного цикла	9
1.1.1. Жизненный цикл ТИ	9
1.1.2. Послепродажное обслуживание ТИ.	11
1.1.3. Интегрированная логистическая поддержка ТИ.....	13
1.2. Системный анализ МТО на этапе ППО АТ ВН.....	20
1.2.1. Содержательный анализ структуры отдельных компонент МТО.	21
1.2.2. Концептуальное описание процесса функционирования надежностной структуры АТ как объекта послепродажного обслуживания.	25
1.2.3. Взаимодействие структурных компонент МТО в СППО.....	28
1.2.4. Описание процесса поддержки решений.	30
1.3. Методы и математические модели анализа процессов МТО.....	30
1.3.1. Существующие модели и методы МТО на этапе ППО.	30
Выводы по главе 1.....	35
Глава 2. Разработка метода поддержки решений и комплекса имитационных моделей для системы МТО ППО АТ ВН.	36
2.1. Постановка задачи на разработку метода поддержки решений и комплекса имитационных моделей для системы МТО ППО АТ ВН.	36
2.2. Структура комплекса взаимосвязанных имитационных моделей МТО ППО АТ ВН.	39
2.3. Имитационная модель функционирования НС СЧ АТ и центра сервисного обслуживания.	41
2.4. Комплекс взаимосвязанных имитационных моделей процессов ППО АТ ВН.....	60
2.4.1. ИМ транспортировки.	60
2.4.2. ИМ процессов складского хранения ЗЧ.....	64
2.4.3. ИМ предприятия-изготовителя новых ЗЧ и ИМ восстановления отказавших СЧ АТ на АРЗ.....	66
2.4.4. Объединение и взаимодействие разработанных ИМ в единый комплекс.	71
2.5. Моделирование случайных явлений и организация зависимых имитационных экспериментов	74
2.6. Сбор статистики и расчет показателей КОРМ.	77
2.7. Метод принятия решений в системе ППО АТ ВН.....	82
2.7.1. Анализ возможных методов поиска рациональных решений.....	84
2.7.2. Метод муравьиных колоний с ограниченным числом итераций в СППР ППО АТ ВН....	90

2.7.3. Применение ММК с установленными завершающими условиями в СППР МТО ППО АТ ВН.	104
2.7.4. Реализация системы поддержки решений в системе МТО ППО АТ ВН с участием ЛПР.	106
Выводы по главе 2.	108
Глава 3. Программная реализация СППР МТО ППО АТ ВН и КВИМ и ее возможности для исследования процессов МТО ППО АТ ВН.	109
Выводы по главе 3.	117
Глава 4. Результаты имитационных исследований системы и процессов МТО ППО АТ ВН.	118
4.1. Система кондиционирования и регулирования давления как объект послепродажного обслуживания для проверки работоспособности СППР и КВИМ.	118
4.1.1. Состав, структура и процесс функционирования СКирД.	118
4.1.2. Параметры системы МТО ППО СКирД тестового примера для анализа разработанной СППР.	129
4.2. Результаты имитационных исследований по проверке работоспособности КВИМ.	133
4.2.1. Анализ процесса работы КВИМ по трассировочной печати.	133
4.2.2. Результаты верификации КВИМ.	139
4.3. Результаты работы СППР на основе ММК.	147
4.3.1 Результаты верификации СППР с заданным числом прогонов ММК.	147
4.3.2 Технологический процесс работы ЛПР с СППР.	151
4.3.3. Результаты верификации СППР с заданными завершающими условиями.	154
4.3.4. Анализ параметров ММК, устанавливаемых для работы СППР с заданными завершающими условиями.	155
4.3.5. Результаты верификации СППР на модели обслуживания парка самолетов Су-27 на территории РФ.	159
4.3.6. Результаты верификации СППР на модели обслуживания неисправного парка самолетов Су-27 с целью эффективного распределения ограниченных средств.	162
Выводы по главе 4.	162
Заключение.	164
Литература:	165

Введение

Актуальность диссертационной работы.

Актуальными научно-техническими задачами являются все задачи управления и информационной поддержки жизненного цикла (ЖЦ) технических изделий. От эффективного решения этих задач во многом зависит эффект от реализации каждого технического изделия (ТИ). Для различных этапов ЖЦ создаются специальные инструментальные средства информационной и программной поддержки.

Одним из важнейших этапов ЖЦ является этап эксплуатации, на котором собственно и реализуется эффект применения ТИ. Важнейшими составляющими этапа эксплуатации являются процессы послепродажного обслуживания (ППО) ТИ, в котором участвуют потребители ТИ и его создатели (разработчики, изготовители). Для осуществления этих процессов создаются специальные системы послепродажного обслуживания (СППО), представляющие территориально распределенные так называемые виртуальные предприятия, включающие в свой состав сервисные технические центры, ремонтные предприятия, предприятия по изготовлению запасных частей взамен выходящих из строя, складские центры, средства транспортировки и др. Решение задач планирования работы таких виртуальных предприятий представляет собой очень сложную научно-техническую задачу вследствие ее стохастичности, многокритериальности, динамического характера, высокой размерности.

Для создания эффективной СППО применяются технологии интегрированной логистической поддержки (ИЛП), позволяющие объединить в единое информационное пространство всех участников ППО. Кроме того ИЛП это комплекс алгоритмических моделей позволяющих решать различные задачи ППО АТ ВН. Одной из задач, входящих в состав ИЛП, является задача материально-технического обеспечения (МТО) процессов ППО, заключающаяся в планировании производства и ремонта запасных частей, их хранения и транспортировки к местам эксплуатации и ремонта ТИ.

Математический аппарат, средства автоматизированной информационной поддержки для указанных задач в настоящее время являются еще не достаточно развитыми вследствие разнородности коллективов организаций, участвующих в перечисленных процессах. Особенно актуальным этот вопрос является для ТИ (в частности авиационной техники) военного назначения (ВН) в Российской Федерации, где в соответствии с приказом МО РФ осуществляется переход на осуществлении ППО предприятиями-изготовителями, чтобы воинские части (потребители ТИ) были

сосредоточены на боевой эксплуатации. Аналогичной является ситуация с ППО авиационной техники (авиационной техники военного назначения АТ ВН).

Разработанный в настоящее время математический аппарат (математические модели и методы) не решают комплексно задачу управления МТО с учетом всех составляющих эту задачу процессов. Наиболее развиты вопросы системотехнического и математического анализа процессов ППО в работах д.т.н. профессора Шаламова. Но аналитический подход, реализованный в этих работах и основанный на предположении о Марковском характере стохастических процессов, не позволяет одновременно исследовать процесс принятия решений по управлению МТО.

Методом, не имеющим принципиальных ограничений на адекватное отображение процессов любой сложности, является имитационное моделирование.

Поэтому актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящена данная диссертационная работа, является разработка комплекса взаимосвязанных имитационных моделей (КВИМ) и метода поддержки решений с его использованием по управлению МТО в системе ППО АТ ВН.

Цель работы – разработка КВИМ, обеспечивающего адекватное отображение процессов МТО в системе ППО АТ ВН, и на его основе эффективного метода поддержки решений по управлению указанными процессами.

Объект исследования – система и процессы МТО ППО АТ ВН.

Предмет исследования – метод поддержки принятия решений для управления процессами МТО в системе ППО АТ ВН.

Методы исследования – Методы системного анализа, принятия решений, имитационного моделирования, объектно-ориентированного программирования.

Цели и задачи диссертационного исследования. Основной целью диссертационной работы является разработка метода поддержки решений и комплекса взаимосвязанных имитационных моделей и организации их взаимодействия для управления процессами МТО ППО АТ ВН.

Задачи исследования:

1. Осуществление системного анализа процессов МТО ППО АТ ВН, как основы для формирования КВИМ и метода поддержки решений
2. Разработка комплекса КВИМ, адекватно отображающего процессы МТО ППО АТ ВН.
3. Разработка эффективного метода поддержки решений по управлению процессами МТО ППО АТ ВН.

4. Разработка информационного, алгоритмического и программного обеспечения КВИМ и метода поддержки решений.
5. Проведение экспериментальных исследований, показывающее возможности разработанного математического, алгоритмического и программного обеспечения для исследования процессов ППО АТ ВН и управления ими.

Новые научные результаты, полученные в диссертационной работе и выносимые на защиту:

- разработанный впервые КВИМ, адекватно отображающий процессы МТО в системе ППО АТ ВН и позволяющий получить эффективную оценку (в достаточной степени точную и быструю) показателей критерия эффективности реализации управляющих решений;

- впервые в составе КВИМ разработана имитационная модель надежностных структур (НС) множества обслуживаемых АТ ВН, рассредоточенных по множеству авиационных частей (АЧ), позволяющая моделировать процессы возникновения различного рода отказов (внезапных, износных) с учетом многоуровневого характера НС, возможности возникновения зависимых отказов отдельных ее частей, многорежимности процесса функционирования АТ, заданной стратегии его технического обслуживания;

- впервые разработан эффективный метод поддержки управляющих решений процессами МТО в системе ППО АТ ВН, позволяющий во взаимодействии с КВИМ решать высокоразмерные, дискретные, стохастические многокритериальные оптимизационные задачи принятия решений. Новизна метода заключается в том, что его работа основывается на специально формируемом графе решений, вершинами которого являются элементы (составляющие общего решения. Можно сказать, что разработан новый механизм неявного перебора для решения дискретных целочисленных оптимизационных задач.

Новые практически значимые результаты диссертационной работы:

- все перечисленные выше новые научные результаты (КВИМ, ИМ НС, метод поддержки решений) доведены до эффективной алгоритмической и программной реализации, выполненной на основе современного объектно-ориентированного программирования.

- диссертационная работа была связана со следующими плановыми хозрасчетными и госбюджетными научно-исследовательскими работами, проводимыми на кафедре №302 МАИ:

- комплексная госбюджетная фундаментальная НИР факультета №3 МАИ (номер гос. Регистрации 7.2017.2011,2013 г.).
- СЧ НИР с предприятием ФГУП ЦНИАГ, тема №37240-03020-8/597, 2012-2013 г.
- хоз. Договорная НИР №44140 – 03020. 2012 г.

- результаты экспериментальных исследований разработанного метода поддержки решений позволяют осуществить обоснованный выбор его параметров с целью улучшения его сходимости к оптимальному решению.

Апробация диссертационной работы.

Результаты работы докладывались на следующих научно-технических конференциях: «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (Ульяновск, 2014г.); Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» (Москва, 2014г.); «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации» (Алушта, 2014г.); 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2013» (Москва, 2013г.); «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2012); 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика 2010» (Москва, 2010г.); Научно-практическая конференция студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2010» (Москва, 2010г.);

Публикация результатов диссертационной работы.

Все основные научные и практические результаты работы опубликованы в 6 научных статьях и 7 тезисах докладов НТК, в том числе 4 статей опубликовано в журналах по списку ВАК.

Структура диссертационной работы.

Содержание диссертационной работы состоит из введения, четырех разделов и заключения. Содержит 61 рисунок и 60 таблиц.

Глава 1. Системотехнический анализ системы и процессов послепродажного обслуживания авиационной техники военного назначения и методов их исследования

1.1. Послепродажное обслуживание авиационной техники военного назначения – важный этап их жизненного цикла

1.1.1. Жизненный цикл ТИ

Жизненный цикл (ЖЦ) технического изделия (ТИ) это – совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [19].

В том же ГОСТе Р 56136-2014 [19] определено понятие стадии жизненного цикла: часть жизненного цикла, выделяемая по признакам характерных для нее явлений, процессов и конечных результатов.

Выделяются следующие стадии жизненного цикла конкретного экземпляра изделия для военной техники [18]:

1. Создание научно-технического задела.
2. Формирование концепции образа продукции военного назначения.
3. Разработка.
4. Производство.
5. Эксплуатация (для изделий военной техники) или хранение (применение) (для материалов).
6. Капитальный ремонт (при необходимости).
7. Утилизация.

Для повышения конкурентоспособности ТИ необходимо учитывать затраты на весь жизненный цикл ТИ, которые вычисляются по формуле: [44]

$$СЖЦ = C_{и} + C_{соэ} + C_{уч} + C_{ТОиР} + C_{утил} \quad (1.1)$$

Где: $C_{и}$ - стоимость изделия, включая его закупочную цену, затраты на транспортировку и развертывание на месте предполагаемого использования; $C_{соэ}$ - затраты на средства обслуживания и эксплуатации; $C_{уч}$ - затраты на обучение обслуживающего персонала; $C_{ТОиР}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонты; $C_{утил}$ – затраты на утилизацию изделия.

Для снижения стоимости ТИ производится оптимизация всех процессов его жизненного цикла. Для этого создаются различные системы с применением

вычислительных средств. [40] В настоящее время невозможно представить разработку и производство сложного ТИ без применения различных систем автоматизации (рис 1.1.): [6,25]



Рис 1.1. Системы автоматизации различных процессов жизненного цикла ТИ

1. CAD системы (ComputerAidedDesign – компьютерная поддержка этапа разработки), являются системами автоматизированного проектирования и позволяют сократить затраты на разработку ТИ.

2. CAM (ComputerAidedManufacturing - системы автоматизированной подготовки производства), это различные автоматизированные системы, созданные для управления станками. Данные системы позволяют сократить затраты на производство ТИ.

3. CAE (ComputerAidedEngineering - Системы автоматического анализа проекта), При помощи CAE инженер может оценить работоспособность изделия, не прибегая к значительным временным и денежным затратам. В своей работе они используют различные математические расчеты: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов.

4. PDM (ProductDataManagement - Системы управления производственной информацией) — организационно-технические системы, обеспечивающая управление всей информацией о ТИ в течении всего жизненного цикла.

5. ERP (Enterprise Resource Planning, Системы планирования ресурсов предприятия)– организационно-технические системы, обеспечивающие оптимизацию ресурсов предприятия путем применения различных методов управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами.

Для комплексного управления всем жизненным циклом изделия применяются информационные технологии поддержки жизненного цикла (ИПИ-технологии). Также данные технологии применяют для обеспечения информационной поддержки управления

жизненным циклом, процессов и технологий, используемых при разработке, производстве и эксплуатации продукции военного назначения. [18]

В англоязычной литературе для обозначения ИПИ-технологий используется аббревиатура CALS - Continuous Acquisition and Lifecycle Support. Целевая программа CALS активно развивалась в США со второй половины 1980-х годов. Результатом 15-ти летней деятельности Министерства обороны США стала концепция совместно используемой информации. Ее задачей является создание среды, в которой элементы военной инфраструктуры могут свободно обмениваться данными о военной технике с промышленностью, обеспечивая поставщиков необходимой информацией в виде единой базой данных. Реализация данной концепции осуществляется с целью повышения эффективности деятельности всех субъектов, задействованных в процессе создания, производства, поставок и эксплуатации продукции.

Для сложных наукоемких изделий, к которым относятся АТ военного назначения стоимость их обслуживания иногда в десятки раз превосходит стоимость самого изделия. Поэтому, при разработке АТ большое внимание уделяется его послепродажному обслуживанию.

1.1.2. Послепродажное обслуживание ТИ.

Послепродажное обслуживание ТИ – это совокупность видов деятельности, направленных на предоставление покупателю дополнительных товаров (услуг) связанных с оптимальным использованием приобретенной продукции. Среди услуг послепродажного обслуживания ТИ выделим, рассматриваемое в данной работе - материально-техническое обеспечение (МТО) эксплуатации изделий.

Для выполнения данных услуг с минимальными затратами создаются системы ППО ТИ (СППО). СППО ТИ – это комплекс технического, организационного и информационного обеспечений этапа эксплуатации ТИ с целью снижения затрат. На практике в силу сложности управления такой системой как единым целым и, как следствие, организационной раздробленности экономическая эффективность СППО ТИ далека от желаемой. Решение проблемы раздробленности СППО ТИ заключается в использовании единых стандартов, общих методов осуществления процесса ППО ТИ и глобальном внедрении информационных технологий, объединяющих всех участников жизненного цикла ТИ. СППО, по сути, является виртуальным предприятием, включающим в себя материальную инфраструктуру и организационно-управляющие структуры всех участников жизненного цикла изделий на стадии их эксплуатации.

Среди нерешенных к настоящему моменту проблем СППО следует отметить следующие:

1. Неприемлемые для заказчиков сроки поставки запасных частей (ЗЧ) (от 6 месяцев до 1 года) и выполнения технического обслуживания и ремонта.
2. Отраслевая и ведомственная разобщенность субъектов жизненного цикла.
3. Отсутствие систем информационной поддержки процессов послепродажного обслуживания.
4. Несовершенство правовой базы, определяющей порядок послепродажного обслуживания наукоемкой продукции.
5. Отсутствие электронной эксплуатационной документации на поставляемые изделия.

Для организации ППО ОАО «Туполев» реализует программу поддержки заказчика в виде единой информационной среды, объединяющей всех участников послепродажного обслуживания авиатехники марки «Ту» (Рис. 1.2).[39]

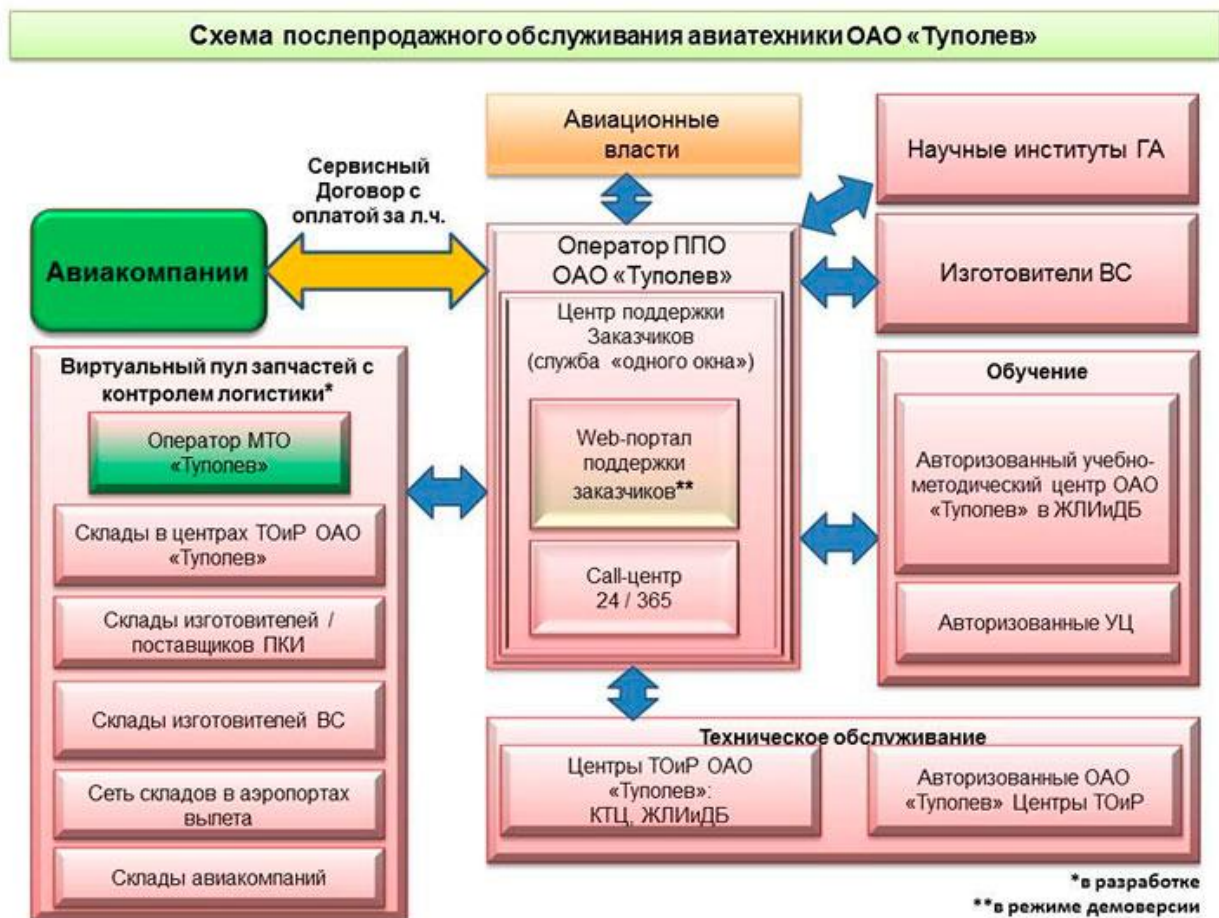


Рис 1.2. Схема системы послепродажного обслуживания авиатехники ОАО «Туполев»

Система послепродажного обслуживания ОАО «Туполев» состоит из 4-х основных компонентов:

1. Техническое обслуживание и ремонт авиационной техники; Работу данного компонента осуществляют центры технического обслуживания и ремонта ОАО «Туполев»
2. Материально-техническое обеспечение (МТО); Данный компонент управляет поставкой ЗЧ и расходных материалов для обеспечения процесса функционирования АТ. Для управления данным компонентом ОАО «Туполев» создает пул ЗЧ, объединяющий множество складов ЗЧ.
3. Обучение авиационного персонала, эксплуатирующего АТ. Данное обучение обеспечивают созданные авторизированные учебные центры.
4. Информационная поддержка участников процесса послепродажного обслуживания авиационной техники; Данный компонент обеспечивает поддержку заказчика в вопросах послепродажного обслуживания. Через данный центр заказчик может сообщить о проблемах в эксплуатации АТ, заказать ЗЧ и расходные материалы, а так же восстановительные работы.

На IV международной научно-практической конференции "Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития" [43] представлено множество разработок в области поддержки проектирования и производства летательных аппаратов, при этом отмечалось необходимость создания систем поддержки эксплуатации путем оптимизации ППО ТИ. Кроме того, необходимость создания систем послепродажного обслуживания ТИ обуславливается высокой стоимостью мероприятий по обслуживанию ТИ на этапе эксплуатации.

1.1.3. Интегрированная логистическая поддержка ТИ

Системы интегрированной логистической поддержки (ИЛП – IntegratedLogisticSupport) ТИ позволяют обеспечить все составляющие процесса послепродажного обслуживания ТИ в течение всего периода эксплуатации. ИЛП ТИ – это организационно-технологический комплекс ППО ТИ, обладающий современной системой управления логистическими процессами на основе новых технологий информационной и интеллектуальной поддержки принимаемых решений.[42,56]

ИЛП включает в себя следующие процессы (Рис 1.3.):

1. Анализ логистической поддержки – это совокупность процессов всестороннего исследования ТИ и элементов системы ППО в течение всего жизненного

цикла изделия с целью определения необходимых ресурсов и услуг для обеспечения требуемого качества обслуживания изделия с минимальными затратами, а также установление требований:

- к конструкции изделия
- к размещению его агрегатов и узлов, подлежащих регулярному обслуживанию, замене и ремонту
- к численности и квалификации эксплуатационного и обслуживающего персонала
- к системе и средствам обучения
- к номенклатуре и количеству запасных частей и расходных материалов
- к организации хранения, транспортировки, упаковки изделия.

2. Планирование технического обслуживания (ТО) и ремонта изделия - это разработка концепции ТО, требований к изделию для осуществления его обслуживания и ремонта, а также реализация плана ТО. Проводится на стадии проектирования и уточняется в процессе производства и эксплуатации изделия;

3. Процедуры поддержки материально-технического обеспечения (МТО) - определение параметров МТО; планирование закупок; управление поставками ЗЧ; управление заказами; управление счетами. Проводится на стадии проектирования и уточняется в процессе производства и эксплуатации изделия;

4. Меры по обеспечению персонала электронной эксплуатационной и ремонтной документацией. Проводится на стадии проектирования и реализуется в процессе производства конкретных экземпляров ТИ.



Рис 1.3. Структура системы ИЛП

Функциональные блоки ИЛП взаимодействуют между собой и с другими системами через интегрированную информационную среду (совокупность распределенных баз данных, содержащих информацию, как о конкретном экземпляре ТИ, так и обо всем парке таких ТИ).

Информационные потоки, связанные с интегрированной логистической поддержкой:

Таблица 1.1.

№ информационного потока	Содержание передаваемых данных.
1	Данные о регламентах, перечни работ, требуемые ресурсы, результаты и исходные данные анализа логистической поддержки, сведения о неисправностях, отказах и инцидентах.
2	Данные о составе и содержании типовой эксплуатационной документации, решения по ее изменениям и доработкам.
3	Данные о регламентах, перечни работ, требуемые ресурсы, задания на проведение работ, данные о выполненных работах, текущее состояние изделия.
4	Данные о требуемых ресурсах и фактическом расходовании ресурсов, данные о состоянии запасов, заявки на запчасти и материалы, прогноз расхода запчастей и материалов.

Интегрированная логистическая поддержка позволяет объединить в единую систему действий всех государственных и коммерческих организаций, принимающих участие в заказе, разработке, производстве, обслуживании, ремонте и утилизации предметов снабжения вооруженных сил на всех этапах жизненного цикла.

Зарубежный опыт создания систем ИЛП описан в стандартах Mil-Std 1388 (США) и DefStan 00-600 «Integrated Logistic Support. Requirements for MOD Project» («Интегрированная логистическая поддержка. Требования к проектам Министерства обороны») (Великобритания). На основании данных стандартов разработаны рекомендации для создания систем ИЛП ТИ [68]. В данных документах определены цели ИЛП ТИ среди которых стоит отметить:

1. Планирование обслуживания:
 - a. Определить политику ремонта,
 - b. Определить возможные операции по ремонту,

- с. Определить запасные части, технические средства и персонал для осуществления ремонта.
- 2. Поддержка поставок запасных частей и расходных материалов:
 - а. Определение пунктов для поставки запасных частей,
 - б. Определение количества запасных частей.
- 3. Управление упаковкой, обращением, хранением и транспортировкой изделия, ЗЧ и расходных материалов (Packaging, Handling, StorageAndTransportation «PHS&T»).

Стандарт DefStan 00-600 является составной частью CALS – технологии, применяемой в странах НАТО. Система военных закупок и технического обеспечения войск США опирается на систему информационной поддержки, в которую входят взаимосвязанные автоматизированные системы:

1. Федеральная система информации по логистике (FLIS)[65] предназначенная для: предзакупочной проверки на отсутствие дублирующих изделий, информирование закупающих органов о возможных местах и условиях закупки, информирование полевого персонала об основных свойствах изделий, правил хранения, транспортирования и обслуживания.

2. Система автоматизированных баз данных по анализу логистической поддержки, в рамках которой производится планирование закупок военной техники и технического обеспечения войск на основе методов логистики.

3. Объединенная база данных по вооружению (IWSDB) [62], организационно построенная как совокупность баз данных всех поставщиков вооружения.

Данная система поддержки позволяет осуществлять заказ необходимых запасных частей не только у предприятия изготовителя изделия, но также и у сторонних фирм, производящих данные изделия или изделия–аналоги.

На основе DesStan 00-600 составлен ГОСТ Р 53394-2009 [17] и позднее, ГОСТР 56136-2014[19](Управление жизненным циклом продукции военного назначения), в котором вводится понятие ИЛП ТИ как совокупности видов инженерной деятельности, реализуемых посредством управленческих, инженерных и информационных технологий, ориентированных на обеспечение высокого уровня готовности ТИ при одновременном снижении затрат, связанных с их эксплуатацией и обслуживанием.

ГОСТ Р 53394-2009 [17] дает расшифровку видов деятельности, среди которых стоит отметить:

- Планирование и управление техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) ТИ.
- Планирование и управление материально-техническим обеспечением (МТО) процесса ППО ТИ.
- Разработка инфраструктуры системы технической эксплуатации ТИ.
- Планирование и организация процессов упаковки, погрузки/разгрузки, хранения, транспортирования ТИ.

Также определяется понятие технической эксплуатации как – части эксплуатации, включающей транспортирование, хранение, ТОиР изделия.

Рассмотрим более подробно некоторые процедуры, входящие в состав процесса анализа логистической поддержки. [56]

Анализ отказов и их последствий.

В данном анализе рассматривается весь конструкторский граф («дерево» физической или функциональной структуры) ТИ, вплоть до конкретных функционально и физически важных элементов. Для каждого из них анализируются предельные состояния, достижение которых возможно для составных частей ТИ (элементы, блоки, агрегаты) в процессе эксплуатации, а также связанные с ними отказы.

Анализ уровней обслуживания и ремонта.

Эта процедура применяется как к отдельным составным частям ТИ, так и к изделию в целом.

Цели анализа уровней обслуживания и ремонта:

- Определение минимально необходимых работ по снятию составных частей ТИ для осуществления ТО в технологической зоне 1-го (оперативного) уровня.
- Определение минимального количества обслуживающего персонала и оборудования, позволяющего выполнить ТО в технологической зоне 2-го уровня с минимальными затратами времени и средств.
- Определение минимальных затрат времени и средств на транспортировку различных ЗЧ, составных частей ТИ в район нахождения ремонтного предприятия и обратно (при проведении восстановительного ремонта)

Анализ плана технического обслуживания и материально-технического обеспечения.

План обслуживания для ТИ по сути представляет собой согласованную совокупность планов ТО физически важных элементов. Важным свойством плана ТО

является возможность его реализации с минимальными затратами всевозможных ресурсов при обеспечении требуемых показателей надежности, готовности, эффективности и безопасности эксплуатации изделия. Поэтому для его окончательного утверждения необходимо произвести оценку стоимости затрачиваемых ресурсов, а так же различных показателей качества на предстоящем этапе эксплуатации.

Среди элементов, влияющих на стоимость и качество системы ППО, выделим:

- ТОиР
- МТО – снабжение оборудованием и ЗЧ.
- Инфраструктура системы ППО
- Количество и квалификация персонала
- Упаковка, хранение и транспортировка
- Создание и поставка эксплуатационной документации в электронном виде (в виде Standart Generalized Markup Language – SGML [67]).

Для формирования плана ТОиР используются элементы автоматизированной системы проектирования ТИ и СППО, а именно систему поставок ЗЧ по критерию минимальных эксплуатационных затрат при заданных показателях эксплуатационно-технического качества.

Информация о результатах проектирования ТИ и СППО накапливается в базе данных, определяющих электронную модель изделия (PDM). Логистическая база данных, сосредотачивающая в себе результаты анализа логистической поддержки должна обеспечить возможность интеграции с PDM с целью обеспечения автоматизированного обмена данными. Хранение электронной технической документации осуществляется в соответствии со стандартом ASD-AIA 1000D.

А процессе анализа логистической поддержки все процедуры создания СППО должны заканчиваться на процедуре оценки стоимости ППО.

МТО продукции военного назначения – это совокупность процедур и методов, направленных на обеспечение своевременных поставок предметов снабжения в количестве, достаточном для удовлетворения требований к применению, ТОиР изделия, а также – обеспечение хранения, распределения, пополнения запасов указанных предметов снабжения. [19]

Существующая система управления МТО (поставки ЗЧ) имеет свои специфические недостатки:[56]

1. Низкая оперативность, многократное дублирование информации и «бумажная» технология управления. В результате возникает необходимость иметь в запасе по возможности большое количество ЗЧ.
2. Жесткое бюджетное финансирование ограничивает финансовую составляющую МТО.
3. Важнейшее значение имеет фактор эксплуатационной готовности АТ. В данной работе в качестве показателя эксплуатационной готовности применяется коэффициент готовности. Из этого следует, что поставка и распределение ЗЧ должны осуществляться исходя из выполняемых эксплуатирующими организациями задач.

Кроме того в системе ППО АТ ВН существует информационный разрыв в цепочке «годовое планирование полетов – планирование требуемого уровня технической готовности – планирование требуемого количества ЗЧ». В данной цепочке фактически отсутствует возможность иметь годовой план поставок ЗЧ, обеспечивающих необходимую готовность АТ. В результате для устранения большинства отказов используют механизм подачи срочных заявок, что приводит к невозможности оценить готовность АТ и нарушению ритмичности производства. [13]

Для устранения данных недостатков необходимо создать систему, позволяющую связать в едином информационном пространстве всех участников, осуществляющих МТО. При этом система должна определить рациональное количество ЗЧ и распределить ЗЧ так, чтобы удовлетворить ограничениям по бюджету и при этом обеспечить максимальную эксплуатационную готовность АТ. Кроме того система должна иметь возможность вносить различные планы эксплуатации для каждого экземпляра АТ.

Особенности послепродажного обслуживания АТ ВН.

В соответствии приказом Министра обороны Российской Федерации 2010 года №320 «О Концепции адаптации системы обслуживания и ремонта вооружений и военной техники к новому облику Вооруженных Сил Российской Федерации» [24] вводится понятие сервисного центра в лице ОАО «Оборонсервис». Основная идея создания сервисного центра – минимизировать функции АЧ по ремонту отказавшей военной техники, переложив обязанности ППО военной техники на сервисный центр. Следует отметить, что в настоящий момент происходит процесс передачи авиаремонтных заводов от ОАО «Оборонсервис» предприятиям-изготовителям.

Сервисные центры ОАО «Оборонсервис» по месту базирования военной техники в соответствии с документацией предприятий-изготовителей осуществляют:

1. систематическую диагностику изделий,
2. ведение учета технического состояния и сервисного обслуживания каждого изделия на протяжении всего жизненного цикла от поступления в войска до утилизации (электронные формуляры разработаны, но еще не внедрены),
3. работы по сервисному обслуживанию изделий военной техники,
4. проведение текущего, среднего и капитального ремонта,
5. предоставление предприятиям-изготовителям своевременной информации о потребностях в запасных частях в соответствии с выявленными неисправностями,
6. заказ ЗЧ на предприятиях-изготовителях,
7. организацию системы складов,
8. участие во взаимодействии с войсковыми ремонтными органами в мероприятиях по эвакуации и восстановлению образцов военной техники, поврежденных в ходе боевых действий, учений и стихийных бедствий.

Услуги, оказываемые сервисным центром, обеспечивают техническую эксплуатацию всей военной техники в необходимом объеме. Для сервисного центра необходимо создание систем, позволяющих управлять процессами ППО с минимальными затратами. В результате актуальными являются новые математические модели современных процессов ППО и системы поддержки решений, помогающие параметры ППО. Проведем анализ этапа ППО АТ ВН.

1.2. Системный анализ МТО на этапе ППО АТ ВН.

Запасные части, предназначенные для замены отказавших составных частей (СЧ) АТ (термин составная часть взят из ГОСТ Р 56135-2014 [18]) поставляются в эксплуатирующие организации через склады системы ППО. Для восстановления отказавшей АТ в первую очередь используются возможности поставки необходимых ЗЧ за счет наличия их на складах системы МТО ППО, перераспределения внутри системы МТО ППО между подчиненными эксплуатирующими организациями, а также возможностями сервисного центра и авиационно-ремонтных заводов (АРЗ).

Командир авиационной части (АЧ) на основании данных фактического расхода ЗЧ и плана замены СЧ АТ по выработке ресурса составляет расчет потребности в ЗЧ и расходных материалов для обеспечения эксплуатации АТ в предстоящем году. Расчет отправляется в авиационно-техническую часть, поставляющую ЗЧ, а так же в органы системы ППО для проведения контроля потребности в запасных частях в целом. При отсутствии ЗЧ на складах в технической службе формируется заявка либо на

первоочередной ремонт соответствующих ЗЧ, либо на их изготовление на предприятии-изготовителе (ПИ). [41]

Анализ процесса МТО позволяет выделить следующие структурные компоненты:

1. Сервисный центр, организующий управление МТО ППО.
2. Предприятия-изготовители (ПИ), производящие новые ЗЧ.
3. Складские центры, обеспечивающие накопление и хранение ЗЧ.
4. Центры технического обслуживания, осуществляющие проведение ремонтных работ по устранению отказов АТ.
5. Авиационно-ремонтные заводы (АРЗ), осуществляющие восстановление конкретного перечня отказавших СЧ АТ.
6. Авиационные части (АЧ), эксплуатирующие множество экземпляров АТ, в которых реализуются стохастические процессы отказов и восстановлений и которые требуют ППО.
7. Транспортная сеть для перевозки ЗЧ и транспортные компании, осуществляющие транспортировку ЗЧ и отказавших СЧ АТ

1.2.1.Содержательный анализ структуры отдельных компонент МТО.

Сервисный центр.

Основной задачей сервисного центра является управление МТО ППО АТ ВН. В настоящий момент отдельного сервисного центра не существует и задачами МТО ППО АТ ВН занимается сервисный центр производителя. Задачами управляющего сервисным центром, рассматриваемыми в данной работе, являются:

- составление заказа на производство новых ЗЧ для каждого планового периода. Данный заказ формируется для каждого ПИ с учетом тех, ЗЧ восстановление которых возможно на различных АРЗ,
- определение мест хранения ЗЧ на складах ТЦ,
- управление очередностью на ПИ и АРЗ.

Предприятия-изготовители ЗЧ.

ПИ осуществляют производство новых ЗЧ для замены отказавших блоков и агрегатов. Каждое предприятие изготовитель ЗЧ производит ЗЧ определенных типов, располагая для этого определенными производственными мощностями, позволяющими в определенные сроки изготовить необходимые ЗЧ. ПИ характеризуются определенной мощностью, равной объему (стоимости) производимых работ в единицу времени. На ПИ для каждой отдельной ЗЧ определяются:

- возможность производства данной ЗЧ,
- интервал времени, необходимый для производства ЗЧ, (T_i)
- стоимость производства ЗЧ, (S_p)
- объем занимаемого места на складе (в m^2) для данной ЗЧ.

Мощность ПИ, задействованная для производства конкретной ЗЧ (M_p) определяется по формуле:

$$M_p = S_p / T_i. \quad (1.2)$$

Данная мощность является ограничением для количества одновременно производимых ЗЧ.

На ПИ осуществляется планирование изготовления ЗЧ на некоторый плановый период (например, на год). Как правило, планирование определяет очередность изготовления ЗЧ. Формирование управления очередностью осуществляется возможностью назначения приоритета для определенной ЗЧ.

После изготовления, ЗЧ размещаются на складах предприятия. Данные склады имеют привязку к узлам транспортной сети. В результате изготовления новых ЗЧ на складах ПИ формируются партии для транспортировки. Партия считается готовой к отправке в случае полного заполнения транспортного средства.

Консигнационный склад.

Цель создания консигнационного склада (далее складов ТЦ) – сглаживание неритмических поставок ЗЧ, что обеспечивает поддержание исправность парка АТ на заданном уровне. Задачами консигнационного склада являются:

- обеспечение хранения ЗЧ на складских территориях,
- учет расхода ЗЧ,
- выдача требуемых ЗЧ службам сервисного технического центра.

За эксплуатацию складских территорий взимается плата в установленном размере. При этом у каждого складского центра имеются ограничение на общий объем (в m^2) и набор ЗЧ, возможных к хранению на данном складе. Определяют 3 типа хранения запасных частей: хранение в отапливаемом ангаре, под навесом и на открытой площадке. Тип хранения влияет на надежность характеристики ЗЧ.

Для организации транспортировки ЗЧ каждый склад, в соответствии со своим местоположение, привязан к узлу транспортной сети. Конкретное размещение и логистика склада в данной работе не рассматривается.

Сервисный технический центр

Для организации эффективной системы МТО ППО АТ ВН необходимо создание технического центра, обеспечивающего поддержку эксплуатации АТ до завершения гарантийного периода. Задачей центра технического обслуживания является обеспечение поддержания состояния парка АТ на заданном уровне готовности путем проведения ремонтных работ (среднего и текущего ремонта) по восстановлению работоспособности СЧ АТ. Для проведения ремонтных работ конкретного экземпляра АТ выделяется ремонтная бригада. Технический центр имеет ограниченное количество ремонтных бригад. На содержание ремонтной бригады необходимы средства. В случае если для ремонта АТ в техническом центре нет свободной бригады, то АТ ставятся в очередь на ремонт.

Снабжение технического центра ЗЧ осуществляется с собственного склада (склада технического центра). Неисправные СЧ АТ, восстановление которых возможно, отправляются на склады авиационно-ремонтных заводов или могут быть восстановлены собственными средствами в случае наличия лицензии. Обычно в сервисном техническом центре осуществляется текущий и средний ремонт отказавших СЧ АТ.

Авиационно-ремонтные заводы.

Задачей АРЗ является капитальный ремонт отказавших СЧ АТ, допускающих восстановление, с целью пополнения набора ЗЧ на консигнационных складах и складах технического центра. Для восстановления отказавшую часть необходимо доставить на склад АРЗ. АРЗ характеризуются определенной мощностью, равной объему (стоимости) производимых работ в единицу времени. Каждая СЧ АТ, восстановление которой возможно на АРЗ, определяется следующими параметрами:

- стоимость мероприятий по восстановлению части,
- время восстановления части.

Определение загруженности АРЗ осуществляется аналогично определению загруженности ПИ ЗЧ. Отказавшие СЧ, ремонт которых в данный момент невозможен на АРЗ (из-за загруженности АРЗ), хранятся на складах АРЗ. Для транспортировки отказавших СЧ АТ на АРЗ и восстановленных на складах технического центра, АРЗ привязан к узлу транспортной сети.

Авиационные части

Авиационная часть (АТ) является местом базирования АТ. В авиационной части может находиться несколько различных типов АТ по несколько экземпляров каждый. Для каждого экземпляра АТ имеется свой план эксплуатации.

В данной работе рассматриваются следующие задачи персонала АЧ:

- эксплуатация АТ, находящейся в распоряжении АЧ.
- проведение мероприятий по ТО АТ. Во время проведения ТО возможно обнаружение «скрытых» отказов СЧ АТ. После обнаружения отказа СЧ АТ необходим вызов специалистов технического центра для проведения мероприятий по восстановлению отказавшей АТ.

Кроме этого следует отметить что по итогам эксплуатации АТ именно командир АЧ составляет заявку на поставку новых ЗЧ и отправляет его в центр сервисного обслуживания.

Транспортная сеть и транспортные компании.

Транспортные компании осуществляют перевозку ЗЧ и отказавших СЧ АТ между компонентами МТО. Транспортная сеть, представленная в виде транспортного графа имеет, транспортные пути, соединяющие между собой ПИ, АРЗ, АЧ и склады ТЦ.

Транспортные компании организуют перевозку ЗЧ и отказавших СЧ АТ по транспортной сети. Основными показателями перемещения между двумя узлами транспортной сети являются: стоимость и время перемещения.

1.2.2. Концептуальное описание процесса функционирования надежностной структуры АТ как объекта послепродажного обслуживания.

Под надежностной структурой АТ (НС АТ) понимается совокупность его СЧ (СЧ АТ: элементы, блоки, подсистемы), процесс функционирования которых рассматривается с точки зрения обеспечения требований к надежности АТ и реализации задач их послепродажного обслуживания. Составляющими процесс функционирования НС являются: безотказная работа, регламентное техническое обслуживание, появление отказов, выполнение ремонтных работ, использование для этого имеющихся запасных частей, ремонтных ресурсов и т.п. Показатели, характеризующие надежность: вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и др.

Коэффициент готовности по ГОСТ 18322-78[15,13] – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается. Данный показатель, вычисленный у АТ в целом является критерием эффективности работы СППО.

НС СЧ АТ представляется в виде многоуровневой древовидной, структуры, в которой на верхнем уровне располагается компонента, соответствующая всей НС ЧС АТ или АТ в целом. На следующем, более низком уровне, НС АТ система разделяется на части, соответствующие подсистемам АТ, выполняющие отдельные жизненно важные и целевые функции (планер, двигатель, система управления полетом, система управления оружием и др.). Подсистемы в свою очередь делятся на более мелкие функциональные подсистемы и далее на блоки. Блоки же состоят из других блоков и элементов. На самом низком уровне любой древовидной ветви НС находятся элементы.

Элемент с точки зрения процесса функционирования НС считается неделимым. Для элементов НС задаются законы распределения вероятности безотказной работы (ВБР). Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в заданном интервале времени не возникнет отказ изделия. (ГОСТ 27.002-89[16]) В общем случае вероятность безотказной работы является функцией времени.

В теории надежности вводится понятие отказа как события, заключающегося в нарушении работоспособного состояния объекта (ГОСТ 27.002-89[16]). Отказы элементов по своей природе могут быть постепенными (износowymi) и внезапными. [2,3] Постепенными отказами называются отказы, возникшие в результате износа элемента. Внезапные отказы же вызваны случайными факторами (повреждениями, резкими перегрузками и т.д.). Те и другие отказы могут реализоваться параллельно.

Для формализованного вероятностного описания ВБР используются различные виды законов распределения (ЗР) времени между отказами. Наиболее распространенными из них являются: экспоненциальный, нормальный, логнормальный, Вейбула-Гнеденко и др [28].

Для увеличения показателей надежности для отдельных СЧ НС АТ на различных ее уровнях могут применяться определенные виды резервирования: нагруженный (горячий), полунангруженный, ненагруженный (холодный), скользящий и др. Вследствие этого отказ определенной СЧ НС АТ не обязательно приводит к отказу СЧ более высокого уровня.

Резерв называется нагруженным, когда резервная часть работает одновременно с основной. При ненагруженном резерве, резервная часть отключена, и требуется время для включения резервной части. В течение данного времени часть более высокого уровня считается отказавшей и по его истечению восстанавливает свою работоспособность.

Если отказ элемента не приводит к отказу включающей непосредственно его части НС, то состояние этой части определяется как неисправное (ГОСТ 27.002-89[16]): т.е. она полностью выполняет все свои функциональные задачи (возможно, с меньшей эффективностью), но при этом содержит отказавшие элементы.

В процессе эксплуатации на ВБР каждого элемента влияют нагрузки, воздействующие на АТ. Нагрузки зависят от режима функционирования: боевой вылет, патрулирование, тренировочный вылет, хранение АТ на открытой площадке, хранение АТ под навесом, хранение АТ в отапливаемом ангаре и т.д. Режим эксплуатации есть перечень условий, в которых эксплуатируется АТ. Смена режимов эксплуатации АТ, как правило, осуществляется в плановом порядке (боевая готовность, боевой вылет, ТО и т.п.), но может быть и случайной (например, ремонт АТ вследствие выхода из строя СЧ АТ). Для каждого режима в общем случае может определяться свой состав тех СЧ НС АТ, который обеспечивает его реализацию, а для элементов НС АТ этих частей могут задаваться свои ЗР времени или вероятности безотказной работы, соответствующие определенному режиму.

Для каждого отдельного элемента НС могут реализовываться следующие состояния:

- Включен. Элемент выполняет все возложенные на него функции. Для перехода в данное состояние элемент должен быть работоспособным (отсутствие отказа) и установленным на АТ.

- Отключен. Элемент выключен, и никакие функции не выполняет, при этом считается, что элемент ожидает своего включения. Отключенный элемент считается работоспособным и установленным на АТ.

- Отказал. Элемент в состоянии отказ. Не выполняет никаких функций и требует срочного восстановления.

- Выведен из состава НС АТ (снят с АТ). Элемент демонтирован для проведения ТО или ремонтных работ. При этом элемент может быть как в состоянии отказа, так и в состоянии работоспособности.

Аналогичные состояния могут быть определены и для других СЧ НС АТ (не обязательно являющихся элементами).

Помимо режимов работы ЗР ВБР элемента, в общем случае, зависит от предыстории его функционирования: величин временных интервалов, в течение которых элемент работал в других режимах. Кроме того, в некоторых СЧ НС АТ могут происходить зависимые отказы: отказы одних элементов, вызванные отказами других СЧ в результате изменения условий эксплуатации.

С точки зрения анализа надежности НС АТ – это восстанавливаемая система, т.е. после события отказа определенной СЧ НС АТ, если это не приводит к катастрофическим последствиям, производятся восстановительные работы (ремонт или замена).

Процесс восстановления СЧ НС АТ состоит из двух процедур: процедуры обнаружения отказа и процедуры восстановительных работ (ремонта или замены отказавшей СЧ НС АТ).

События отказов некоторой СЧ НС АТ, в общем случае, могут проявляться не сразу, а если и устанавливаются, то, как правило, не сразу могут быть устранены. Т.е. отказы различных СЧ НС АТ могут накапливаться, и это накопление может в определенных сочетаниях приводить к более серьезным последствиям, чем каждый из отказов определенной СЧ НС АТ в отдельности.

Обнаружение отказа частей НС может произойти следующим образом:

- с помощью специальных индикаторов, в процессе эксплуатации АТ. Такие отказы назовем «явными»,

- при техническом обслуживании. Такие отказы назовем «скрытыми». Они обнаруживаются с помощью применения специальных измерительных устройств и средств наблюдения.

Обнаружение отказа некоторой СЧ НС АТ, как следствие, запускает процесс ее ремонта (если это предусмотрено техническим регламентом) или замены (при наличии ЗЧ

и необходимых ремонтных ресурсов). В общем случае процесс восстановления является случайным: случайным может быть событие обнаружения «скрытых» отказов, случайным может быть время обслуживания, операции ремонта или замены отказавших СЧ. Однако, при отсутствии надежной исходной статистической информации времени проведения восстановительных работ, можно использовать данные по нормативам из соответствующего технического описания [7,11].

1.2.3. Взаимодействие структурных компонент МТО в СППО.

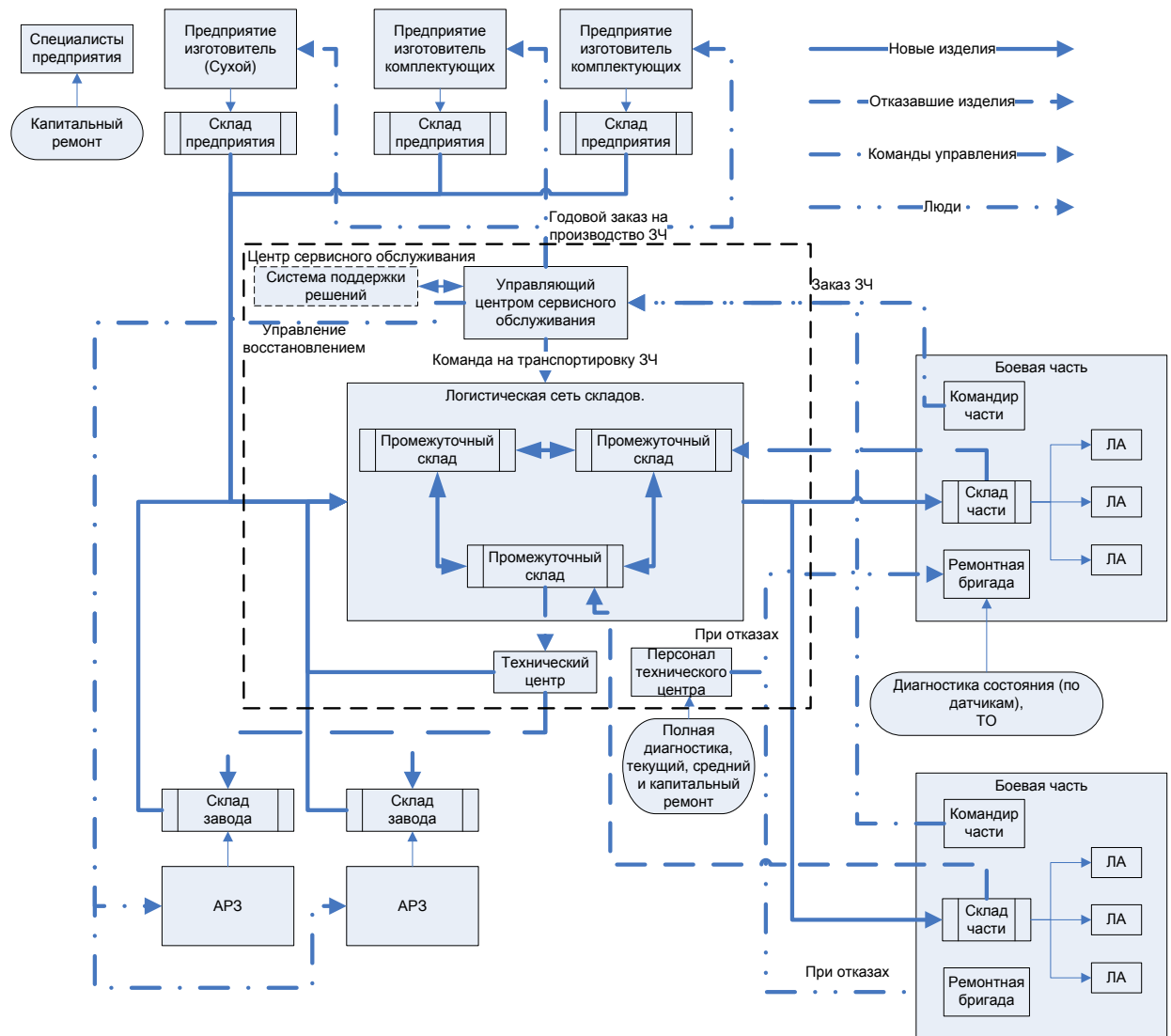


Рис 1.4. Схема взаимодействия структурных компонент МТО в СППО АТ ВН.

На рисунке 1.4. показана схема взаимодействия структурных компонент МТО в СППО АТ и место разрабатываемой системы поддержки решений. Разрабатываемая система поддержки решений является частью центра сервисного обслуживания АТ. В состав данного центра входят технические центры и логистическая сеть складов. На данной схеме сплошными линиями отмечены потоки ЗЧ, прерывистыми линиями –

потоки отказавших СЧ АТ, прерывистыми с точкой - команды управления, прерывистыми с двумя точками – перемещение персонала. Производителями ЗЧ являются предприятия изготовители, потребителями ЗЧ – авиационные части, а ремонтом занимаются АРЗ. Перемещение ЗЧ и отказавших СЧ АТ осуществляется между складами соответствующих структурных компонент ППО.

Центр по управлению МТО ППО производителя обеспечивает процесс МТО ППО АТ. Он осуществляет плановый заказ ЗЧ на ПИ и определяет расположение ЗЧ по складским центрам, то есть отдает команды на транспортировку ЗЧ к конкретным складам центра сервисного обслуживания (прерывистые линии с точкой).

Производство ЗЧ происходит в соответствии с загруженностью ПИ ЗЧ. В системе ППО имеется некоторое количество ПИ, производящих различные ЗЧ. После производства, ЗЧ объединяют в партии и транспортируют со складов ПИ на склады центра сервисного обслуживания (сплошные линии от складов предприятий-изготовителей на склады центра сервисного обслуживания).

Технический центр осуществляет обслуживание множества АЧ, в каждой из которых находится множество различных экземпляров АТ. Для обеспечения исправного функционирования АТ ремонтная бригада каждой АЧ проводит мероприятия по ТО. Время проведения и состав ТО определяется инструкцией по эксплуатации АТ. В процессе ТО возможно обнаружение отказавших СЧ АТ. Так же обнаружение отказавших СЧ АТ возможно в результате эксплуатации АТ. В случае обнаружения отказа в АЧ отправляется бригада технического центра для проведения ремонтных работ (прерывистые линии с двумя точками от персонала технического центра к авиационным частям).

Если для ремонта АТ необходима замена СЧ АТ, то ЗЧ на замену отказавшей СЧ необходимо доставить к месту обслуживания АТ со складов центра сервисного обслуживания (в случае наличия ЗЧ). В случае возможности восстановления отказавшей СЧ АТ, она отправляется на АРЗ (прерывистые линии со складов центра сервисного обслуживания на склады АРЗ). После восстановления СЧ на АРЗ, исправная СЧ отправляется на склады центра сервисного обслуживания (сплошные линии от складов АРЗ), где пополняет общий объем ЗЧ. Если ЗЧ на складах центра сервисного обслуживания не оказалось, то составляется заявка на ее производство на ПИ, устанавливая при этом максимальный приоритет на производство данной ЗЧ.

1.2.4. Описание процесса поддержки решений.

Результатом данной работы является поддержка решений управляющего центром сервисного обслуживания (далее лицо принимающее решение – ЛПР). Целью разрабатываемой системы поддержки решений (СППР) является определение оптимальной стратегии управления МТО ППО АТ ВН с целью увеличения коэффициента готовности всей АТ и уменьшения стоимости МТО ППО. В обязанности управляющего центра сервисного обслуживания входят:

- в начале каждого планового периода составляется заказ на производство новых ЗЧ. Данный заказ определяется заявкой на производство, включающей в себя тип и количество ЗЧ, необходимых к изготовлению. После поступления заявки предприятия начинается производство, а по завершению данного процесса ЗЧ партиями отправляются на склады центра сервисного обслуживания,
- управление очередностью производства новых ЗЧ на ПИ и восстановления отказавших СЧ АТ на АРЗ. Данное управление необходимо при поступлении новой заявки на производство ЗЧ или новой отказавшей СЧ АТ на АРЗ,
- определение мест хранения произведенных ЗЧ. Хранение ЗЧ осуществляется на складах ТЦ.

Операции по обслуживанию АТ проводятся в течение всего жизненного цикла АТ, но могут быть поделены на годовые интервалы. Данное деление обусловлено процессом выделения годового бюджета для процедур МТО ППО.

Для выборки множества рациональных решений создается система поддержки решений. Данная система производит управление параметрами СППО и оценку значений критериев, полученных в результате моделирования.

1.3. Методы и математические модели анализа процессов МТО.

1.3.1 Существующие модели и методы МТО на этапе ППО.

Надежностные математические модели.

Основная цель этих моделей – расчет показателей надежности для различных надежностных структур в заданных условиях эксплуатации.

Так в [2, 3] дается описание надежностным характеристиками АТ с помощью теории случайных величин. В данных работах описываются процедуры сбора и обработки статистических данных об отказах изделия.

В [23] дается описание и метод расчета различных надежностных коэффициентов таких, как коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования и др. Кроме того приводятся методы расчета надежностных

показателей при различных условиях эксплуатации, транспортировки и хранения. В работе И.Н. Животкевича и А.П. Смирнова вводится понятия нагрузки на элемент, выраженной в виде соответствующего коэффициента и определяющего изменение надежностных показателей при изменении условий эксплуатации, транспортировки и хранения. Для вычисления надежностных показателей используются различные методы теории вероятности и математической статистики.

В [28] собран опыт ученых в области надежности ТИ. В данной работе приводятся различные законы распределения времени безотказной работы для различных типов устройств.

В работах В.В. Медведева рассматривается имитационная модель надежностной структуры судового дизеля, а в [22] имитационная модель системы резервирования с реконфигурируемой структурой.

Недостатком данных моделей является оторванность этих моделей от процессов функционирования других компонент процесса МТО ППО. В результате расчетные надежностные показатели только приближены к реальным.

Математические модели управления запасами.

Задачи, решаемые данными моделями – расчет количества ЗЧ, обеспечивающих определенные показатели надежности в процессе функционирования ТИ.

Так в [5,9] рассмотрены экономические модели управления запасами, основанные на анализе имеющихся в наличии ЗИП.

Так в [29] рассмотрены вопросы логистических процессов.

Так в [22] рассмотрены основные аспекты применения методов имитационного моделирования для расчетов показателей надежности резервированных восстанавливаемых изделий при ограниченном количестве ЗЧ.

Данные модели определяют количество и номенклатуру хранимых ЗЧ и расходных ресурсов для обеспечения эксплуатации и обслуживания ТИ. Входной информацией для данных моделей является потребность в ЗЧ расходных ресурсов в течение всего периода эксплуатации. Модели управления запасами определяют требования ЗЧ и расходных ресурсов, которые необходимо хранить на складах для обеспечения потребности в ЗЧ и расходных материалах в системе ППО.

Модели МТО ППО АТ.

В настоящее время в системе МТО служб эксплуатации и ремонта АТ широкое применение нашли нормативные методы. Данные документы оперируют нормой расхода ЗЧ на 100 часов эксплуатации, под которой понимают среднее ожидаемое количество

замен составных частей АТ из-за их отказов и выработки ресурса. Нормы расхода разрабатываются на основе анализа надежности, результатов войсковых испытаний, а также с учетом опыта эксплуатации изделий-аналогов.

В процессе эксплуатации заложенные при разработке АТ показатели надежности могут претерпевать изменения, например в силу модификации или доработки АТ, что приводит к изменению потребности в ЗЧ. В результате необходимо постоянное корректирование норм расхода.

Нормы расхода используются при расчетах годовой потребности в ЗЧ, плана производства и поставок ЗЧ и запасов ЗЧ на складах. При этом учитываются остатки ЗЧ на складах, а также план ремонта отказавших СЧ АТ.

Используемые в расчетах нормы расхода ЗЧ корректируются по мере необходимости. В среднем сроки расхода составляют 3-5 лет, что не позволяет оперативно вносить изменения в расчеты. В результате заказ ЗЧ осуществляется с некоторой избыточностью, что приводит к омертвлению капитала и в то же время не гарантирует отсутствие простоев АТ в неисправном состоянии.

В работах Е.В.Судова [4,43,44] рассматривается управление МТО АТ при допущении, что поток случайных отказов образует простейший пуассоновский поток. В результате для заданного уровня риска вычисляется объем начального МТО, объем партии поставки и объем минимального запаса. Данная методика применяется в программном комплексе Logistic Support Analysis Suite (LSS) НИЦ «Прикладная логистика». Основой данной методики является задание уровня риска R , равного вероятности отсутствия ЗЧ на складе, относительно которого считается потребляемое число ЗЧ (m):

$$1 - R \leq \sum_{i=1}^m \frac{\mu^i}{i!} * e^{-\mu} \quad (1.3)$$

Где μ – среднее количество отказов за рассматриваемый период.

Основной идеей в работах является рассмотрение всех процессов ЖЦ АТ с точки зрения стоимости и взаимосвязи между отдельными компонентами ИЛП.

В книгах А.С. Шаламова [13,41,56] подробно изложена математическая модель системы ППО АТ, основанная на вероятностных переходах системы между определенными состояниями и описание динамики системы ППО с помощью теории случайных процессов (используются ординарные и неординарные пуассоновские потоки) и на основе стохастических дифференциальных уравнений. Имеется граф состояний АТ, описывающий различные возможные состояния и переходы между ними. Так для

построения графа парка изделий выделяются следующие состояния АТ: АТ в ожидании работ, подготовка АТ к использованию, ТО АТ, восстановительный ремонт, заводской ремонт, готовые к использованию АТ и находящиеся в фазе использования и безвозвратные потери АТ. На основе этого графа формируется математическая модель, описывающая все процессы ППО в единой системе стохастических дифференциальных уравнений. Основным недостатком данной модели является приближенная оценка случайных факторов, воздействующих на АТ и необходимость большого количества входной информации. Стоит отметить, что данная математическая модель была реализована в виде программного комплекса.

Следует также отметить работы С.М. Ямпольского [58,59,60,61] в которых рассматривается пересчет МТО АТ ВН при различных планах эксплуатации, подразумевающих безвозвратные потери или сильные повреждения АТ ВН. Рассматриваются различные модификации метода освоенного объема для его применения при оценке необходимого количества ЗЧ в процессе эксплуатации.

Также стоит упомянуть ежегодную международную научно-практическую конференцию «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития», на которой рассматриваются различные модели и системы поддержки ЖЦ АТ. Но к сожалению современные системы направлены на упрощение процессов проектирования и производства и почти не затрагивают этапы послепродажного обслуживания. Тем не менее, на 4ой конференции, проходившей в октябре 2014 года, было отмечено о важности рассмотрения вопросов создания моделей и систем для управления различными процессами на этапе ППО АТ.

Итоги анализа моделей МТО ППО АТ ВН.

С точки зрения современных подходов к организации МТО ППО ТИ, требующих применение автоматизированных процедур управления на основе оптимальных алгоритмов, минимизирующих эксплуатационные затраты, используемые методики управления запасами устарели по своему содержанию не соответствуют новым технологиям информационной поддержки и управления. В результате становится необходимым разработка адекватной математической модели, которая учитывала бы основные процессы, происходящие в системе ТоиР АТ, и отражала бы особенности движения ЗЧ и отказавших частей АТ внутри системы. При этом одним из основных процессов, отраженных в модели, должны стать простои АТ из-за отсутствия ЗЧ, что невозможно в отдельно взятой математической модели. В случае создания

математической модели всей системы ППО становится возможным оптимизировать средние характеристики длительности простоев за счет выбора оптимальной политики формирования начальных запасов ЗЧ и объемов их пополнения. [42]

В настоящий момент работы ведутся в различных табличных средах типа Excel. По результатам конференции [43] можно сделать вывод, что в настоящий момент работы в области интегрированной логистической поддержки ведутся по созданию единого информационного пространства между всеми участниками ППО АТ.

В данной работе предлагается применить метод имитационного моделирования, основанный на событийном подходе, для создания упрощенной модели системы МТО ППО АТ ВН, при этом учитывающей все основные процессы основных участников системы МТО ППО АТ ВН. Для удобства пользования системой в данной работе разработана система поддержки решений для помощи в принятии решений по управлению процессами МТО ППО АТ ВН. За счет событийного подхода применение метода имитационного моделирования позволит упростить модель ППО путем уменьшения количества входных данных и простоты реализации смены состояния системы ППО. К тому же имитационная модель достаточно просто масштабируется.

Выводы по главе 1.

1. Объект исследования определен как система и процессы МТО ППО АТ ВН и задача принятия решений по управлению этими процессами. Актуальность исследования этого объекта связана с недостаточной его изученностью и существенным влиянием эффективности применения АТ от рациональной организации процессов МТО ППО и управления ими.
2. Проведен системный анализ указанного объекта исследования. Определены составные части и факторы МТО ППО АТ ВН. Показан их комплексный взаимосвязанный и динамический характер. Этот анализ в дальнейшем является основой для математического моделирования процессов МТО ППО.
3. Определена актуальность математического моделирования МТО ППО АТ ВН на основе имитационного моделирования, как инструментального средства, позволяющего, с одной стороны, отобразить комплексный динамический характер процессов МТО ППО АТ ВН и, с другой стороны, обеспечить при этом важнейшее свойство адекватности модели моделируемым процессам. При этом в содержательном виде определены показатели критерия оценки результатов моделирования, отражающие как техническую эффективность эксплуатируемой АТ, так и затраты на реализацию мероприятий МТО ППО.

Глава 2. Разработка метода поддержки решений и комплекса имитационных моделей для системы МТО ППО АТ ВН.

2.1. Постановка задачи на разработку метода поддержки решений и комплекса имитационных моделей для системы МТО ППО АТ ВН.

Произведенный в разделе 1 системный анализ МТО ППО АТ ВН и взаимосвязанных процессов, происходящих в отдельных составляющих ее частях, показывает, что это сложная организационно-техническая динамическая система, функционирующая в стохастических условиях реализации процессов отказа и восстановления обслуживаемой техники. Целью этой системы, с одной стороны, является обеспечение высокой эффективности работы обслуживаемой АТ, а с другой стороны, минимизация производимых при этом обслуживании затрат.

Важнейшими составляющими компонентами процесса функционирования являются:

- процессы отказа СЧ АТ при реализации определенных режимов ее эксплуатации;
- работа авиационных частей по текущему обслуживанию АТ;
- работа сервисных центров по восстановлению отказавшей АТ, а так же текущий и средний ремонт отказавших СЧ АТ;
- работа авиаремонтных предприятий по капитальному ремонту отказавших СЧ АТ;
- работа предприятий по изготовлению новых ЗЧ взамен выбывших из оборота;
- хранение восстановленных и вновь изготовленных запасных частей на складах с целью обеспечения оперативного использования их в процессе восстановления отказавшей АТ,
- доставка ЗЧ со складов к местам ремонта и восстановления отказавшей АТ;
- принятие решений по управлению всеми перечисленными процессами с целью обеспечения наибольшей эффективности функционирования системы МТО ППО.

Все перечисленные процессы имеют сложные логические и временные связи, их реализация определяется действующими в системе ресурсными ограничениями, определяющими способность сервисных центров, АРЗ и ПИ ЗЧ проводить восстановительные работы, ремонтировать и изготавливать новые ЗЧ АТ.

В данной диссертационной работе ставится задача исследования этих процессов с помощью математического моделирования.[50,51,52]

Таким образом, ставится задача разработки комплекса взаимосвязанных имитационных моделей (КВИМ), отражающих с определенной степенью детализации все перечисленные выше процессы и позволяющего исследовать влияние на важнейшие составляющие критерия оценки результатов (эффективность функционирования обслуживаемой АТ и производимые при этом затраты) важнейших параметров системы МТО ППО: характеристик процессов отказа и восстановления отдельных частей НС обслуживаемой АТ, действующих ресурсных ограничений, характеристик территориального расположения отдельных компонент всей системы,

Важнейшей задачей исследования, решаемой с использованием КВИМ в данной диссертационной работе, является определение рациональных процедур принятия решений по управлению системой МТО ППО, разработка методов и алгоритмов принятия решений.

Приведем предлагаемые содержательные формулировки основных показателей критерия оценки результатов моделирования (КОРМ), получение которых должен обеспечить разрабатываемый КВИМ:

– оценка математического ожидания среднего коэффициента готовности на плановом периоде процесса обслуживания по всему обслуживаемому парку АТ, по отдельным АЧ и экземплярам АТ; Коэффициент готовности по ГОСТ 18322-78[15] – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается. Так как АТ ВН должна быть работоспособной в любой момент времени, то оценка данного показателя определена отношением суммарного времени работоспособности АТ в течение периода эксплуатации ко времени эксплуатации. Данный показатель является показателем эффективности мероприятий МТО ППО. [42,56]

– оценка математических ожиданий средних затрат на реализацию процессов МТО ППО в единицу времени на плановом периоде процесса обслуживания (суммарные и по отдельным составляющим: работа сервисного центра; процесс восстановления отказавших СЧ АТ, процесс производства новых ЗЧ; процесс хранения ЗЧ; процесс транспортировки ЗЧ к местам их хранения и использования);

Так как основное назначение любой математической модели определить формализованную взаимосвязь показателей КОРМ с параметрами моделируемой системы,

то, завершая описание постановки задачи на разработку КВИМ, приведем в содержательном укрупненном виде перечень наиболее важных параметров этого комплекса:

1. Параметры, характеризующие сервисный центр:
 - a. Заявка на производство для каждого ПИ на расчетный период (год),
 - b. Указание на какие склады перевезти новые ЗЧ.
2. Параметры, характеризующие парк АТ, ППО которых осуществляется:
 - a. Надежностная структура обслуживаемых объектов,
 - b. Вероятностные характеристики времен безотказной работы отдельных СЧ НС АТ для различных режимов эксплуатации,
 - c. Вероятность обнаружения скрытых отказов,
 - d. Планы эксплуатации (периодичность смены режимов),
 - e. Местоположение АЧ, в которых расположена АТ.
3. Параметры, характеризующие склады центра сервисного обслуживания:
 - a. Местоположения складов,
 - b. Объем склада,
 - c. Стоимость хранения ЗЧ на данном складе,
 - d. Ограничения на хранимые ЗЧ на данном складе.
4. Параметры, характеризующие ТС:
 - a. Транспортная сеть, описывающая возможность перемещения ТС между узлами,
 - b. Время перемещения ТС между узлами,
 - c. Стоимость часа эксплуатации ТС,
 - d. Грузоподъемность ТС,
 - e. Ограничения на перевозимый ТС груз.
5. Параметры, характеризующие предприятия-изготовителей ЗЧ:
 - a. Местоположение ПИ,
 - b. Номенклатура ЗЧ, производимых на ПИ,
 - c. Стоимость производства ЗЧ каждого типа,
 - d. Время, необходимое для производства ЗЧ каждого типа,
 - e. Ограничение на выделяемую мощность ПИ для изготовления новых ЗЧ.
6. Параметры, характеризующие АРЗ:
 - a. Местоположение АРЗ,
 - b. Номенклатура СЧ АТ, восстановление которых возможно на АРЗ,

- c. Стоимость восстановления СЧ АТ,
 - d. Время, затраченное на восстановление СЧ АТ,
 - e. Выделяемая мощность АРЗ для восстановления СЧ на АРЗ.
7. Параметры, характеризующие центр сервисного обслуживания:
 - a. Количество ремонтных бригад центра сервисного обслуживания,
 - b. Стоимость одного часа содержания бригады центра сервисного обслуживания.

2.2. Структура комплекса взаимосвязанных имитационных моделей МТО ППО АТ ВН.

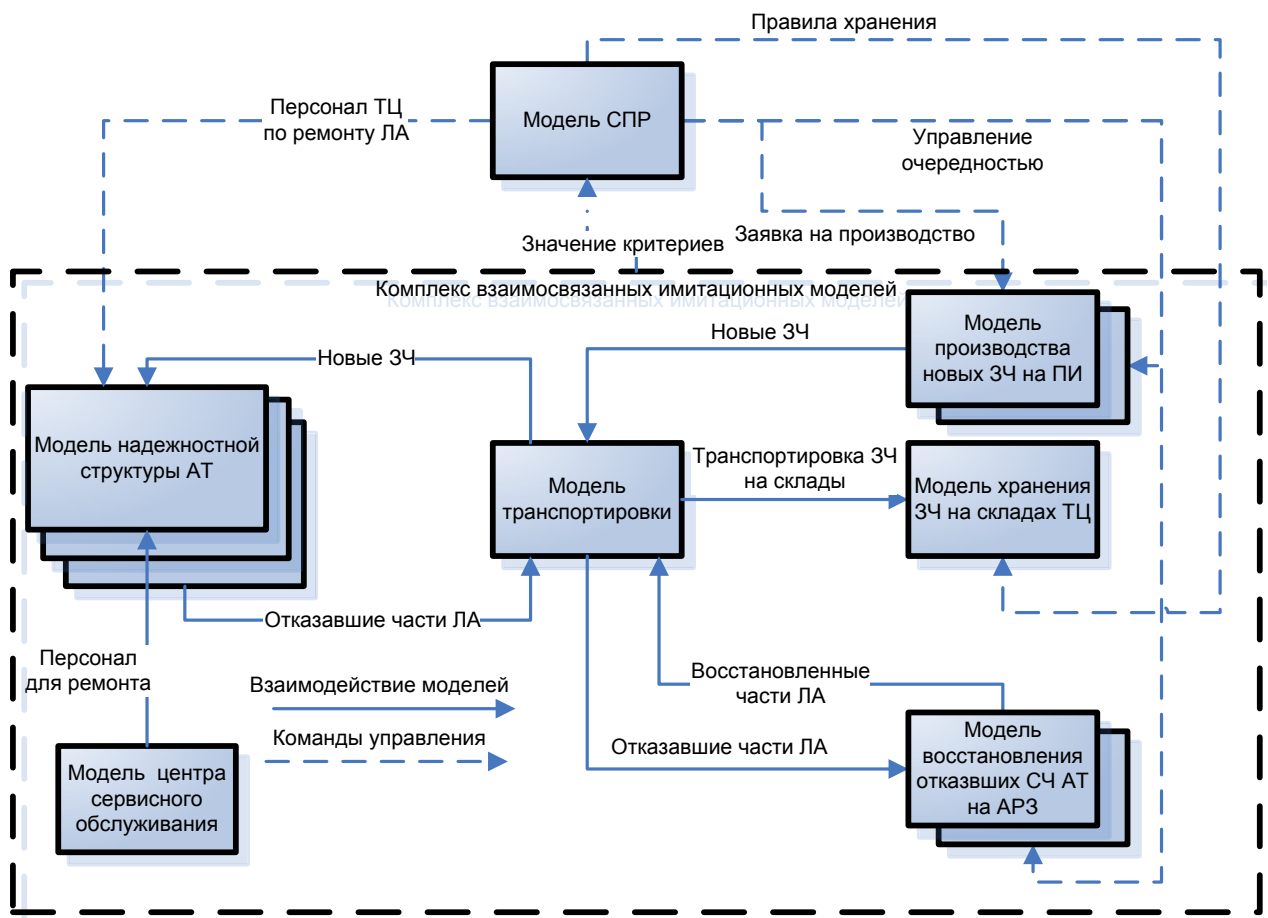


Рис 2.1. Состав КВИМ и их взаимодействие.

В составе КВИМ выделяются пять моделей, отражающих процессы функционирования соответствующих частей моделируемой системы (Рис 2.1):

- Модель надежной структуры СЧ АТ и центра сервисного обслуживания. Данная модель описывает процессы функционирования АТ с точки зрения надежности и предназначена для управления процессами отказа, восстановления и других процессов эксплуатации АТ. Так как каждый экземпляр АТ эксплуатируется уникально,

то для каждого экземпляра АТ создается своя модель надежностной структуры. Модель определяет оценку математического ожидания коэффициента готовности АТ и оценка математического ожидания стоимости процессов обслуживания АТ.

- Модель транспортировки управляет процессами перемещения ЗЧ и отказавших СЧ АТ между различными складами системы МТО ППО АТ. Модель вычисляет оценку математического ожидания стоимости процессов транспортировки в системе МТО ППО АТ.

- Модель хранения ЗЧ на складах технического центра. Данная модель управляет процессами хранения. Модель определяет оценку математического ожидания стоимости процессов хранения в системе МТО ППО АТ.

- Модель производства ЗЧ предназначена для управления процессами производства новых ЗЧ. После производства ЗЧ помещается на склад производства. Модель создается для каждого производства. Модель определяет затраты на производство новых ЗЧ.

- Модель восстановления отказавших СЧ АТ на АРЗ. Данная модель предназначена для управления процессами восстановления работоспособности отдельных СЧ, входящих в состав НС АТ. После восстановления новая ЗЧ помещается на склад АРЗ.

Назначение модели системы поддержки решений – выработка управляющих воздействий для МТО ППО АТ:

- Количество и номенклатуру новых ЗЧ, для оформления заявки на предприятия-изготовители. Заявка формируется на каждый отчетный период (1 раз в год).

- Для каждой ЗЧ определить склад технического центра для ее хранения

- Определить очередность производства ЗЧ на ПИ и ремонта СЧ АТ на АРЗ.

Все модели КВИМ предлагается строить в классе дискретных с использованием событийного подхода к формализованному описанию моделируемых процессов с ориентацией на метод модельных событий для продвижения модельного времени и синхронизации всех протекающих в моделируемой системе процессов. Взаимодействие моделей в КВИМ осуществляется посредством вызова соответствующих событий. После завершения события производства новой ЗЧ (модель производства) или события восстановления отказавшей СЧ АТ (модель АРЗ) вызывается событие транспортировки (модель транспортировки) необходимой СЧ на склад (модель хранения) выбранный моделью СППР. В случае обнаружения отказа СЧ АТ (модель надежностной структуры АТ) ищется ЗЧ, позволяющая устранить отказ и в случае наличия ЗЧ вызывается событие транспортировки (модель транспортировки) ЗЧ на АЧ для замены отказавшей СЧ АТ.

Если отказавшую СЧ АТ можно восстановить на АРЗ, то вызывается событие транспортировки (модель транспортировки) отказавшей СЧ АТ, а по завершению данного события – событие восстановления (модель АРЗ) данной СЧ АТ.

Для формирования команд управления модели СППР необходима статистическая информация о потребности производства новых ЗЧ. Для сбора статистической информации имеется возможность запустить КВИМ ППО АТ ВН в режиме с неограниченными ремонтными ресурсами и ЗЧ. В результате работы данного режима определяются статистические характеристики уровня потребления ЗЧ для каждого экземпляра АТ.

Формализация осуществляется с ориентированием на использование объектно-ориентированного подхода для разработки имитационных программ.

2.3.Имитационная модель функционирования НС СЧ АТ и центра сервисного обслуживания.

Существует множество различных математических моделей надежностных структур, в том числе и АТ, широко описанных в литературе. [1,2,3,23,28] Среди математических моделей существуют имитационные модели, описывающие некоторые процессы функционирования надежностной структуры технического изделия. В данной работе предлагается создание полной имитационной модели надежностной структуры СЧ АТ. [50,51]

Выбор и обоснование класса ИМ

Процесс функционирования НС СЧ АТ с помощью ИМ можно отобразить, описывая такие событийные явления как: отказы элементов и связанные с этим отказы других СЧ НС, начало и окончание этапов проведения различного вида ТО, обнаружение отказов, начало и окончание проведения ремонтных работ и работ по замене отказавших СЧ НС АТ и т.п. С учетом этого модель НС АТ можно представить как дискретную ИМ, функционирующую на основе метода модельных (временных) событий [48]. Перечень основных модельных событий и схема взаимосвязи между ними, отражающая процесс планирования одних событий при обработке других, показан на рис 2.2.

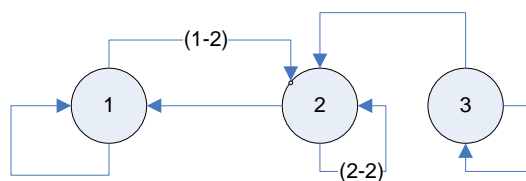


Рис 2.2. Граф-схема взаимосвязи событий ИМ НС АТ.

Название и кодирование основных временных событий:

1. Отказ элемента,
2. Выполнение действия над СЧ НС АТ:
 - а. включение, отключение в процессе применения АТ – операции выполняются над АТ в процессе эксплуатации,
 - б. окончание монтажа, демонтажа или настройка в процессе ТО – операции выполняются специалистами центра сервисного обслуживания,
3. Смена режима функционирования НС АТ

Условия планирования событий:

- (1-2) Если у отказавшей СЧ есть резервная работоспособная СЧ;
- (2-2) Если выполнены не все действия из заданной последовательности для перевода НС АТ в определенный режим эксплуатации.

Показатели критерия оценки результатов моделирования (КОРМ)

1. Реализация и статистические характеристики процессов потребления ЗЧ и ремонтных ресурсов при проведении ремонтно-восстановительных работ:
 - при обработке статистики по множеству прогонов – частоты отказов отдельных СЧ НС АТ в течение прогона ИМ;
 - при обработке по одному длинному прогону в предположении стационарности и эргодического характера процессов, происходящих в ИМ – оценки интенсивностей отказа отдельных СЧ НС АТ.
2. Коэффициент готовности экземпляра АТ (отношение времени безотказной работы экземпляра АТ к времени прогона ИМ).

Параметры ИМ

Ниже приводится описание параметров (без детального обсуждения структур данных) используемых для задания и хранения.

– параметры НС АТ, отражающие ее многоуровневую древовидную структуру, используемые в определенных ее СЧ виды резервирования, последствия отказа каждой отдельной СЧ (определена зависимость отказов различных СЧ НС АТ, возможность проведения восстановительных работ отдельных СЧ НС АТ путем замены отказавших частей или проведения ремонтных работ), виды и временные характеристики ТО, проводимых для отдельных СЧ и их периодичность, для «скрытых» отказов элементов определены виды ТО, при проведении которых они могут быть обнаружены, а для сложных скрытых отказов – вероятность обнаружения, перечень действий, выполняемых при проведении ремонтно-восстановительных работ и их временные характеристики,

- состав ремонтных работ по устранению отказов СЧ АТ,
- перечень режимов функционирования АТ,
- состав СЧ НС АТ, функционирование которых должно осуществляться в каждом режиме,
- сценарный план смены режимов функционирования НС АТ,
- виды и параметры ЗР ВБР элементов для каждого режима,

Описание объектов, в которых хранятся параметры ИМ, приведены ниже.

Для задания СЧ АТ, рассматриваемой в виде НС, создается соответствующий объект (таблицы 2.1. и 2.2.). В данном объекте содержится НС АТ, а также возможности использования ЗЧ и ремонтных ресурсов для поддержания работоспособности АТ.

Структура объекта «АТ».

Таблица 2.1.

Name	Название объекта АТ
GraphLevel0	Указатель на НС АТ
StatistiksNode	Массив элементов для статистики различных частей АТ

Набор процедур

Таблица 2.2.

LoadGraphFile (NameFile:String);	Загрузка НС АТ из текстового файла
GoGraphAllEventFailure(CurrentGraph:Tgraph);	Занесение событий отказа в СБС
GoAllEvent	
AllNodeChangeKoef(CurrentGraph:Tgraph)	Изменение параметров хранения АТ
SearchStatistikNode(Node:Tnode):Tstatistics	Сохранение статистики по системе
AddStatisticsNode(Node:Tnode):Tstatistics	

SaveStat	
----------	--

Для определения HC AT (GraphLevel0) применяется вложенная графовая структура, состоящая из структуры данных «Функциональная часть HC» и структуры данных «Граф HC».

Структура данных «Граф HC» (таблицы 2.3. и 2.4.) применяется для хранения множества элементов, блоков, подсистем или системы в целом (организуется списковая структура). Она определяет совокупность объектов, а также операции для их совместной обработки.

Структура данных «Функциональная часть HC» (таблицы 2.5. и 2.6.) содержит информацию о функциональной части. Функциональной частью являются: элемент, так и блок и даже вся система в целом. Для задания функциональной части требуется задать идентификатор данной части, список дублирующих функциональных частей, список индикаторов, которые включаются при отказе данной функциональной части, список элементов, отказ которых зависит от состояния данной функциональной части. Все возможные законы распределения времени отказа функциональной части заносятся в список (структуру отказов определим ниже). Для определения последствий отказов применяется флаг, который определяет, произойдет ли отказ блока при отказе соответствующей функциональной части. Также у функциональной части есть список действий, которые могут быть совершены над данной функциональной частью (их подробнее мы рассмотрим ниже). Если нас интересует структура данной функциональной части, то она определяется в подграфе.

Основными процедурами структуры данных «Функциональная часть HC» являются: Включение, Отключение, Отказ, Восстановление работоспособности, Установка функциональной части.

Структура объекта «Граф HC».

Таблица 2.3.

Node	Указатель на первую вершину в графе
FatherNodeGraph	Указатель на вершину (блок), подграфом которой является данный граф
Name	Имя графа, определяющее его место в общей структуре.

Набор процедур структуры данных граф:

Таблица 2.4.

SwitchOFF	Выключение всех элементов
-----------	---------------------------

SearchNodeName(Name:String)	Процедуры работы с вершинами графа
AddNode(Search:Boolean; Name:String)	
DeleteNode (Name:String)	
SaveStatGraph	Сохранение статистических характеристик вершин графа
SaveTime	Запуск процедуры сохранения времен всех вершин

Структура объекта «Функциональная часть НС».

Таблица 2.5.

Name	Название функциональной части
Graph	Указатель на граф, в котором функциональная часть находится
SubGraph	Указатель на подграф, описывающий структуру данной функциональной части
Failure	Указатель на список возможных законов распределения времени отказа функциональной части
DoubleNode	Указатель на список дублирующих элементов
SensorNode	Указатель на список индикаторов отказа функциональной части
ActionListNode	Указатель на список действий, которые возможны над данной функциональной частью
RelationNode	Указатель на список элементов, отказы которых зависят от отказа данной функциональной части
KolParallelNode	Количество одновременно работающих дублирующих элементов
ImpactLevel	Определяет, произойдет ли отказ блока при отказе данного элемента

Набор процедур структуры данных функциональной части:

Таблица 2.6.

SwitchON(KoefAction:Double)	Процедура включения функциональной части
SwitchOFF	Процедура выключения функциональной части
GoFailure(GoDouble:Byte)	Процедура отказа функциональной части
GoRecovery	Восстановление работоспособности функциональной части
GoAvailability	Установка функциональной части
SaveTime	Сохранение времён.
Процедуры добавления и удаления различных дуг	

Законы распределения времен отказов содержат информацию о состоянии функциональной части, при котором применяется данный закон распределения времени отказа, и указатель на конкретный закон распределения и его параметры.

Структура объекта «Закон распределения времени безотказной работы».

Данная структура (таблицы 2.7. и 2.8.) применяется для описания различных законов распределения времени безотказной работы, используемых в имитационной модели в частности закона распределения времени безотказной работы.

Таблица 2.7.

Node	Указатель на элемент, который отказывает
Набор параметров состояния элемента	
Parameters	Указатель на закон распределения времени отказа и набор параметров данного закона

Набор процедур структуры данных отказ:

Таблица 2.8.

GoFailure	Добавление в СБС события данного отказа
DelFailure	Удаление из СБС события данного отказа

Объект конкретного закона распределения наследуется от класса «**Абстрактный закон распределения времени безотказной работы**». У класса «Абстрактный закон распределения времени безотказной работы» существует процедура получения времени отказа: GetTime (Time:Double), где Time – Нарботка. Данная процедура описывается у каждого конкретного закона распределения в соответствии с законом. К конкретному закону распределения добавляются параметры данного закона. Например, для нормального закона распределения будет создана такая структура данных:

TnormalFailure = Class (TparametersFailure)

Mx,Dx:Double;

Constructor Create;

Destructor Destroy;

Function GetTime (Time:Double):Double; override;

end;

где TparametersFailure – **Абстрактный закон распределения времени безотказной работы**.

Для описания возможных действий по смене состояния элемента создана структура данных «Действие над СЧ АТ». Действие происходит над тем элементом, в список которого оно включено (поле ActionListNode в структуре данных «функциональная часть

НС»). У каждого действие есть название, тип действия, время, необходимое для выполнения действия над СЧ, коэффициент нагрузки на СЧ при данном действии. Коэффициент нагрузки позволяет разделить условия эксплуатации СЧ (например: патрулирование, боевой вылет и т.д.) Если выполнение данного действия требует определенных состояний других СЧ, то эти состояния заносятся в соответствующий список, образуя в результате древовидную структуру. При этом в тот же список заносятся действия над другим СЧ, чтобы перевести его в данное состояние. Для некоторых действий указываются СЧ, отказы которых могут быть обнаружены.

Структура объекта «Действие над СЧ АТ»

Объект действие создается как для различных операций, производимых над СЧАТ в течение периода эксплуатации, так и различных процедур, выполняемых бригадами сервисного центра для восстановления работоспособности АТ.

Таблица 2.10.

NameAction	Название действия
TypeAction	Тип действия: 0. Выключение 1. Включение 2. Демонтаж 3. Монтаж 4. Настройка Или введенный пользователем
TimeAction	Время, необходимое для выполнения действия
KoefAction	Коэффициент нагрузки на элемент при данном действии
ListSearchFailure	Список СЧ отказы, которых могут быть обнаружены
FirstAction	Указатель на элемент списка необходимых состояний других СЧ

Список процедур работы с действиями:

Таблица 2.11.

AddActionListArc	Добавление списка необходимых действий
AddSearchFailure	Функция поиска неисправностей

Для хранения плана смены режимов функционирования АТ на протяжении всего времени моделирования создана структура данных массив объектов «Режим функционирования АТ» (таблицы 2.12. и 2.13). У данной структуры данных необходимо

задать: тип функционирования (в виде названия) и указатель на СЧ, которая должен изменить состояние в результате перехода к данному режиму функционирования.

Структура объекта «Режим функционирования АТ»

Таблица 2.12.

Node	Указатель на СЧ
Name	Тип действия

В данной структуре данных также имеются процедуры работы с массивом действий:

Таблица 2.13.

AddAction(NewAction:Taction)	Добавляет режим функционирования в конец массива
LoadAction(NameFile:String)	Загрузка режимов функционирования из файла
AddSbsAction	Добавление следующего режима функционирования в СБС
SortAction	Сортировка массива режимов функционирования по времени.

Схема взаимосвязей структур данных параметров ИМ НС АТ приведена на рис 2.3.

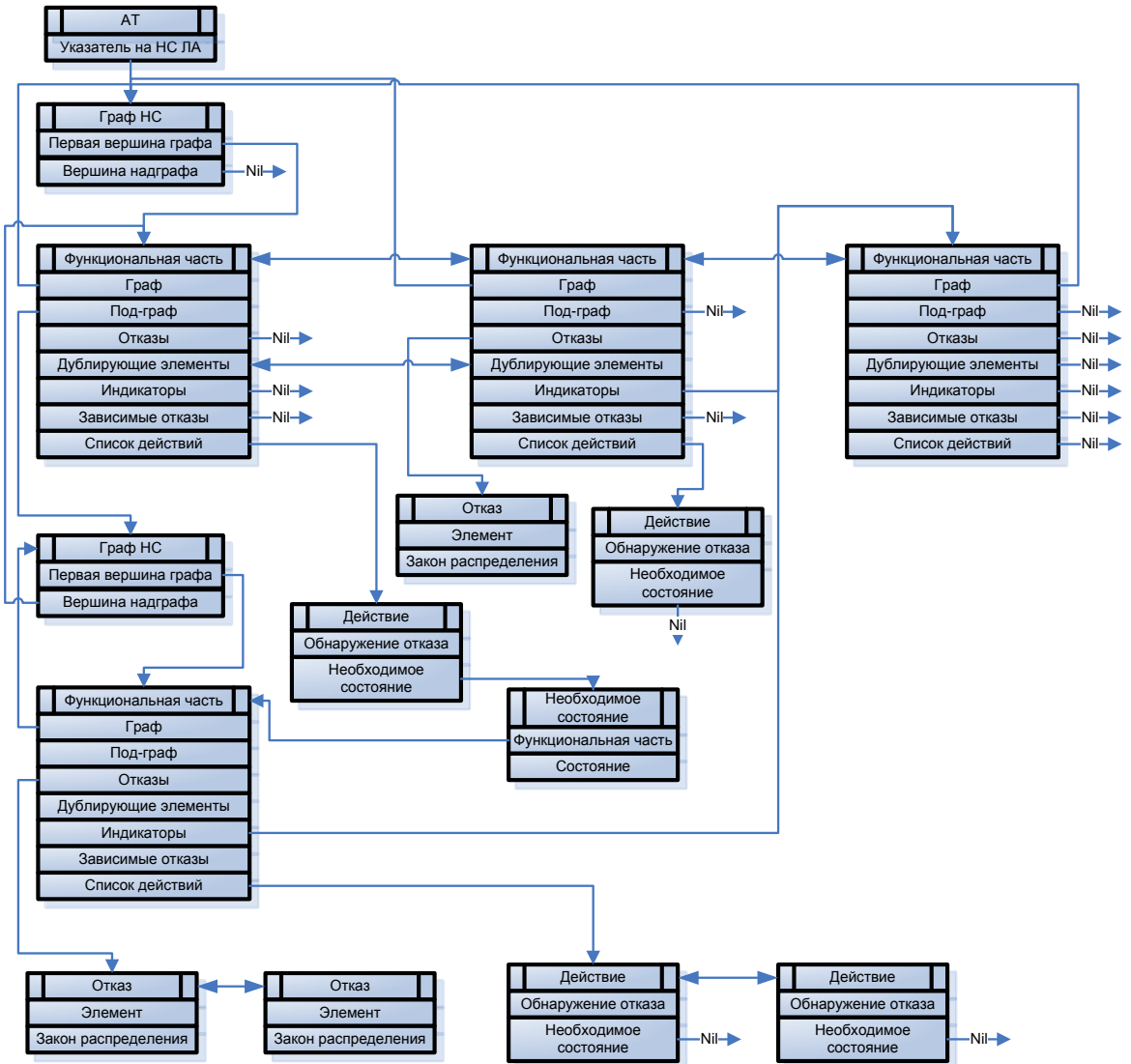


Рис 2.3. Схема взаимосвязей структур данных параметров ИМ НС АТ.

Параметром ИМ центра сервисного обслуживания является параметр стоимости одной бригады центра сервисного обслуживания, выраженной в зарплате бригаде.

Таблица 2.14.

CostPeople	Стоимость одного часа содержания бригады сервисного центра
------------	--

Состояние ИМ

Важнейшими переменными состояния ИМ НС АТ являются переменные, определяющие текущее состояние отдельных частей НС.

Эти переменные определяются в списковой структуре данных, однозначно связанной с НС АТ. В соответствии с приведенным выше описанием перечень состояний СЧ НС АТ следующий: исправна или неисправна; включена в работу или не включена; находится в составе НСАТ или выведена из ее состава (демонтирована)

Для всей НС АТ в целом, а также для отдельных СЧ, определяется вид режима, в котором они находятся в текущее модельное время. В соответствии с этим определяется включение в работу отдельных СЧ НС.

Для каждого элемента НС АТ накапливается суммарное время наработки (с учетом коэффициентов нагрузки, зависящих от текущего режима работы). А для каждой СЧ НС АТ накапливается суммарное время нахождения ее в безотказном (работоспособном) состоянии. При организации по множеству прогонов для каждой СЧ НС АТ, в том числе, и для всей НС по интервалам модельного времени накапливаются частоты отказов.

Для указанных выше основных временных событий перечень информации, указанной в дополнительных атрибутах записи для этих событий имеет следующий вид:

Событие «Отказ элемента» (1):

- указатель на отказавший элемент,
- вид отказа.

Событие «Выполнение действия над СЧ НС АТ» (2):

- указатель на СЧ НС АТ, над которой совершается действие;
- название действия;
- время, необходимое для выполнения действия;
- коэффициент нагрузки на СЧ НС АТ при данном действии;
- необходимое для выполнения данного действия состояние НС АТ

Событие «Плановая смена режима функционирования» (3):

- номер режима из множества возможных режимов функционирования НС АТ.

Текущий режим функционирования хранится в объекте «Режим функционирования НС» для определения, какой именно режим функционирования существует указатель на ячейку массива: NomAction. В общем случае план смены режимов функционирования остается неизменным, но в процессе функционирования модели в него добавляют оперативное планирование ТО АТ.

Состояние НС АТ определяется состоянием элементов, блоков и подсистем. В структуре данных «Функциональная часть НС» существует набор переменных состояний:

Таблица 2.15.

BoolRegularly	0 – выключено (Серый) 1 – включено (Зеленый)
BoolFailure	0 – работает/не отказал (Серый)

	1 – неисправность (Желтый) 2 – отказ (Красный)
BoolAvailability	0 – снято (Синий) 1 – на месте (Серый)

Отказавший или Демонтированный элемент не может быть включенным. Совокупность значений данного набора полностью определяет состояние элемента, блока или подсистемы.

Для хранения информации о наработках функционального элемента используется поле Time, которое представляет собой массив из 4-х элементов для хранения времени, которое провел функциональный элемент в каждом состоянии (хранении, работы, отказа, и отсутствия на борту АТ). Время последней смены режима функционирования заносится в переменную LastTime.

Начальное состояние ИМ

Состояние всех СЧ – исправное. Режим работы – первый из плана. Включены в работу все СЧ НС АТ в соответствии с определенным режимом. Нарботка по каждой СЧ НС загружается из соответствующего файла. В СБС занесены записи по планируемым отказам всех видов всех элементов НС АТ. Переменные для сбора статистики в нулевом состоянии.

Алгоритмы обработки модельных событий.

При обработке события «Отказ элемента» происходит последовательное выполнение следующих действий (рис 2.4.):

1. Фиксация времени, в течение которого СЧ, в которую входит отказавший элемент, находилась в предыдущем состоянии.
2. Установка СЧ НС АТ в состояние отказа.
3. Удаление всех событий отказа данной СЧ из СБС
4. Поиск дублирующей СЧ или выключенной резервной СЧ. Включение выключенной работоспособной резервной СЧ, если это возможно.
5. Изменение параметров ВБР элементов, отказы которых зависят от состояния отказавшего, моделирование реализации их ВБР и корректировка СБС.
6. Включение индикаторов отказа данной СЧ, если таковые имеются.
7. Если не работают дублирующие СЧ НС АТ и отказ данной СЧ должен приводить к отказу СЧ более высокого уровня, то выполнить процедуру

отказа новой части (Рекурсивный выполнение этого пункта по всей ветви НС АТ вверх).

8. Сохранить статистику по отказам данной СЧ.

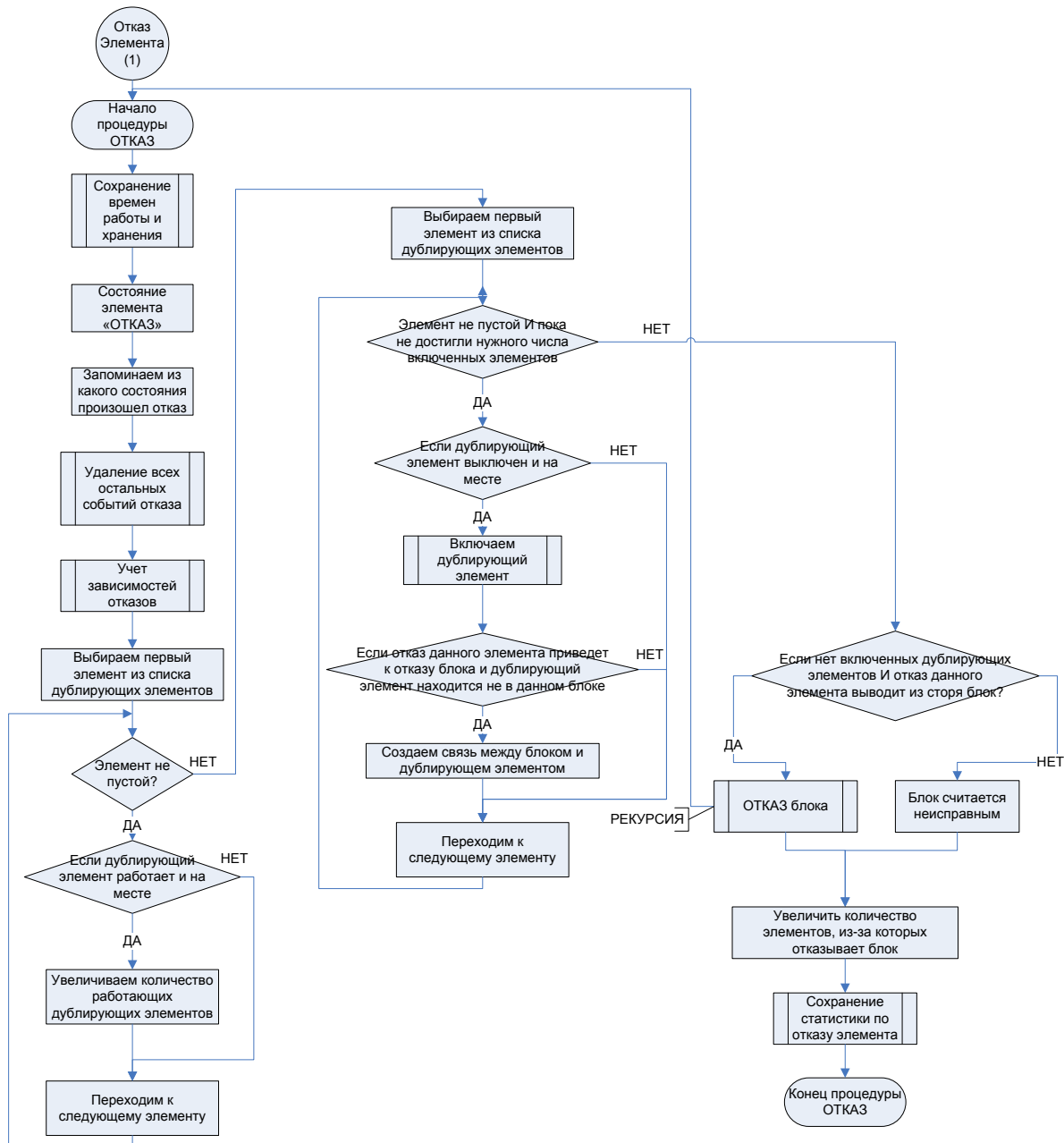


Рис 2.4. Алгоритм обработки события «Отказ элемента»

«Выполнение действия над СЧ НСАТ»

При обработке события происходит последовательное выполнение следующих действий (рис 2.5, 2.6):

1. Определение типа действия.

- a. Для действия «Включение» происходит запуск процедуры включения СЧ. Данная процедура переводит СЧ во включенное состояние, создавая необходимые события отказа и удаляя лишние.
 - b. Для действия «Выключение» происходит запуск процедуры выключения СЧ. Данная процедура переводит СЧ в выключенное состояние, создавая необходимые события отказа и удаляя лишние. А после нее происходит выключение всего подграфа данной СЧ, то есть всех ее компонентов.
 - c. Для действия «Демонтаж» происходит перевод СЧ в состояние отсутствия в составе НСЛА
 - d. Для действия «Монтаж» реализуется процедура, которая определяет СЧ в составе НСЛА. Обнуление параметров наработки для данной СЧ и переводит СЧ в выключенное состояние.
 - e. Для действия «Настройка» осуществляется перевод СЧ в состояние работоспособности и восстановление всех СЧ, которые отказали из-за отказа данной СЧ.
2. Вызов процедуры поиска «скрытых» отказов.
 3. Расчет времени выполнения следующего действия из рассматриваемой последовательности действий.
 4. Планирование события ($K=2$).

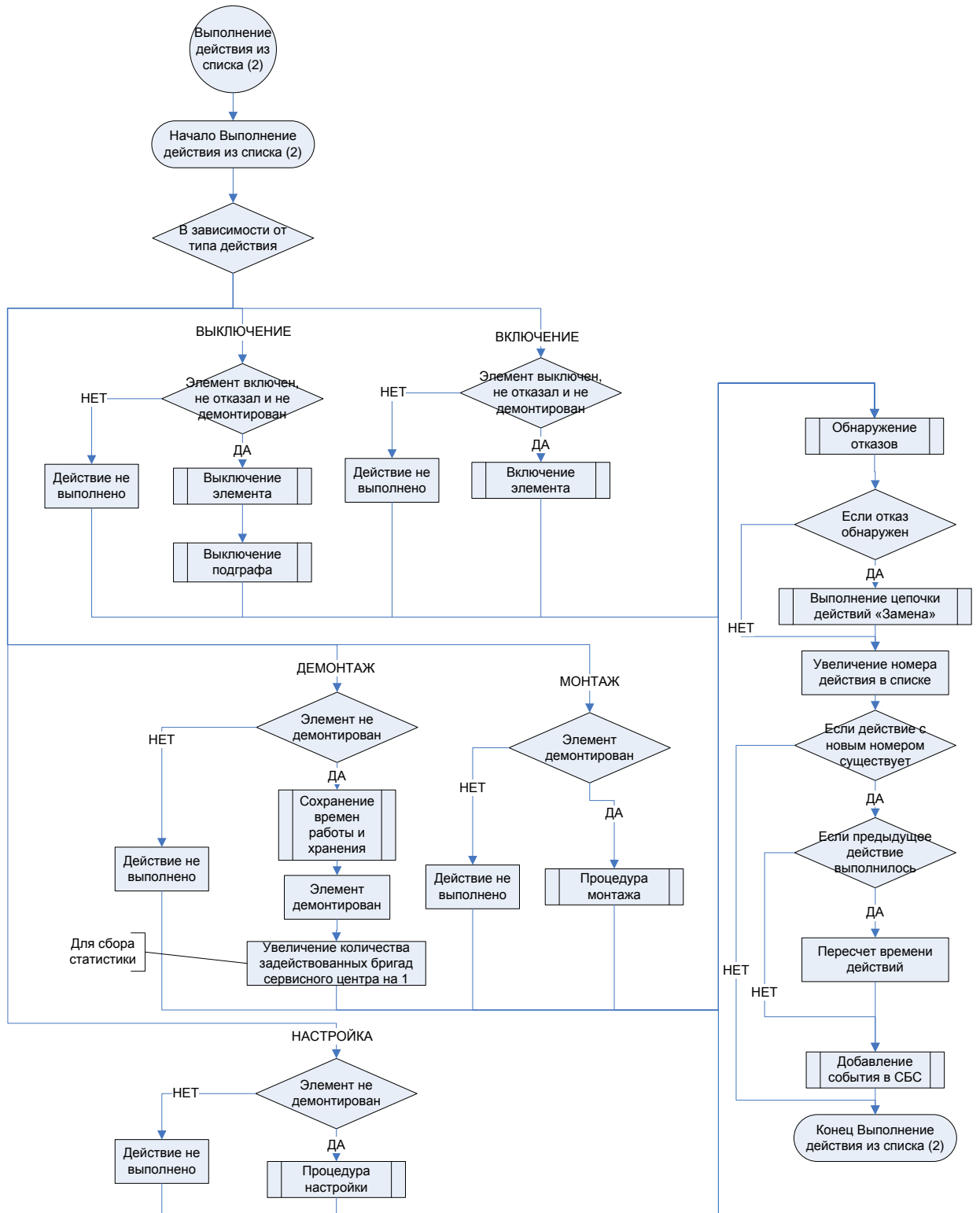


Рис 2.5. Алгоритм обработки события: «Выполнение действия».

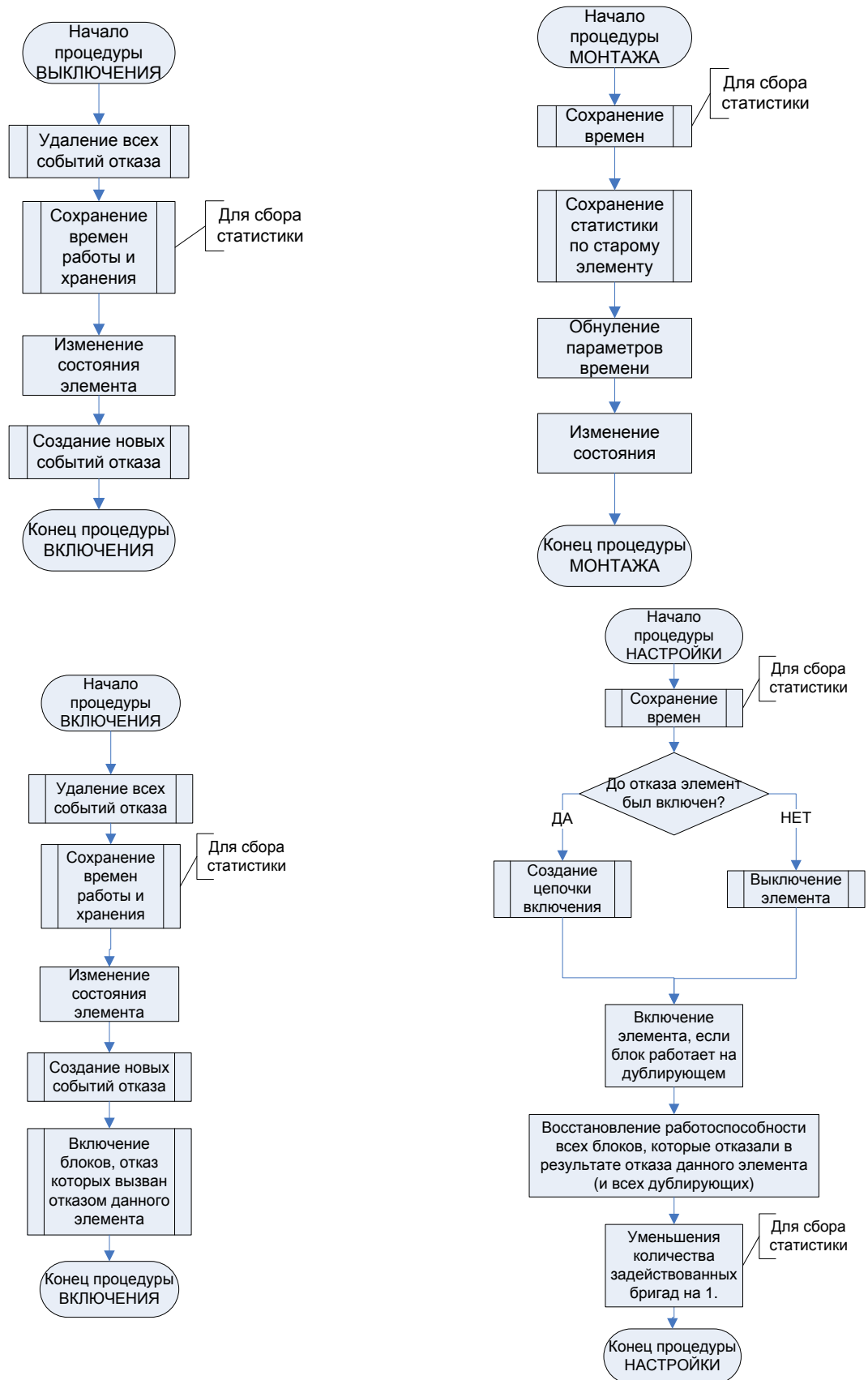


Рис 2.6. Процедуры включения, выключения, монтажа и настройки СЧ АТ для выполнения алгоритма обработки события «Выполнение действия»

Событие «Смена режима функционирования АТ»

При обработке события происходит последовательное выполнение следующих действий (рис 2.7):

- накапливается статистика по наработке включенных СЧ НС АТ с учетом завершившегося режима;
- корректируются законы распределения ВБР износных отказов элементов, производится корректировка СБС по этим отказам;
- моделируются реализации ВБР внезапных отказов элементов и корректируются СБС с учетом плановой длительности нового режима.

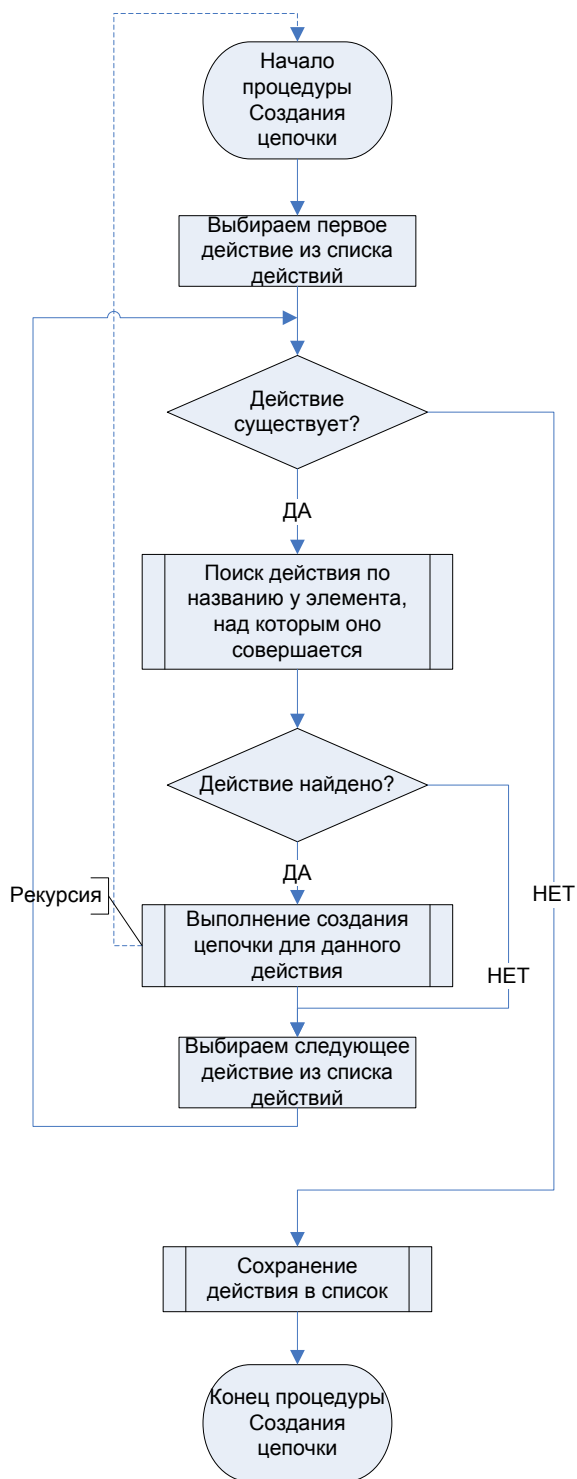


Рис 2.7. Процедура создания цепочки действий для обработчика события «смена режима функционирования АТ»

Для оценки работы ИМ НС АТ имеются переменные и процедуры для сбора статистической информации во время реализации. Структура объекта «Статистика НС»

(таблицы 2.16. и 2.17), необходимого для сохранения статистики по функциональной СЧ АТ приведена ниже (рис 2.8):

Таблица 2.16.

NameNode	Название СЧ и полный путь до нее (для поиска СЧ)
Node	Указатель на СЧ в НС (удаляется при удалении НС)
KolProgon	Количество реализаций
TimeOsn	Массив времен простоя [0], работы [1], отказа [2] и отсутствия [3] СЧ. В сумме дают время моделирования – ModelTime
TimeOsnBufer	Буфер для накопления значений времен в течение реализации
TimeFailure	Массив, состоящий из времен возникновения отказа и восстановления работоспособности СЧ.
KolRecovery	Количество восстановлений СЧ
MaxKolRecovery	Максимальное количество восстановлений СЧ за все реализации
NomRecovery	Номер текущего СЧ, после восстановления
ArrayHistKolRecovery	Ряд распределения количества восстановлений СЧ
Time	Массив времен для каждого СЧ (до восстановления)
KolFailure	Количество отказов СЧ
NomFailure	Текущий номер отказа СЧ
ArrayFailure	Массив параметров отказа СЧ
ArrayHistKolFailure	Ряд распределения количества отказов СЧ

Процедуры для сбора статистики ИМ НС АТ.

Таблица 2.17.

SaveStatisticRecovery	Сохранение статистики в результате восстановления СЧ, т.е. для новой СЧ
SaveStatisticFailure(SwitchDouble,ImpactLevel:Byte)	Сохранение статистики по отказам СЧ.
SaveStatisticProgon	Сохранение статистики по результатам реализации
SaveTime	Процедура сохранения времени для каждой СЧ АТ

Процедура SaveTime добавляет время в массив TimeOsn в соответствии с режимом функционирования СЧ НС. Время определяется разностью текущего модельного времени

(время, когда запущена процедура) и последнем времени смены режима LastTime (в объекте «функциональная часть НС»).

Для сохранения статистики по отказам хранится динамическая структура (так как отказов может произойти несколько) следующего вида (Таблица 2.18):

Таблица 2.18.

Time	Время отказа
DoubleElement	Включение дублирующего элемента (ДА/НЕТ)
LevelOtkaz	Выключение СЧ на уровень выше (ДА/НЕТ)
TimeSearch	Время обнаружения отказа
TimeRecovery	Время окончания восстановления СЧ после отказа

В конце каждой реализации ИМ, после сохранения статистики, НС удаляется и в начале следующей реализации загружается из файла. При загрузке СЧ она привязывается к объекту «Статистика НС» с помощью указателя Stat. Поиск СЧ осуществляется по ее имени.

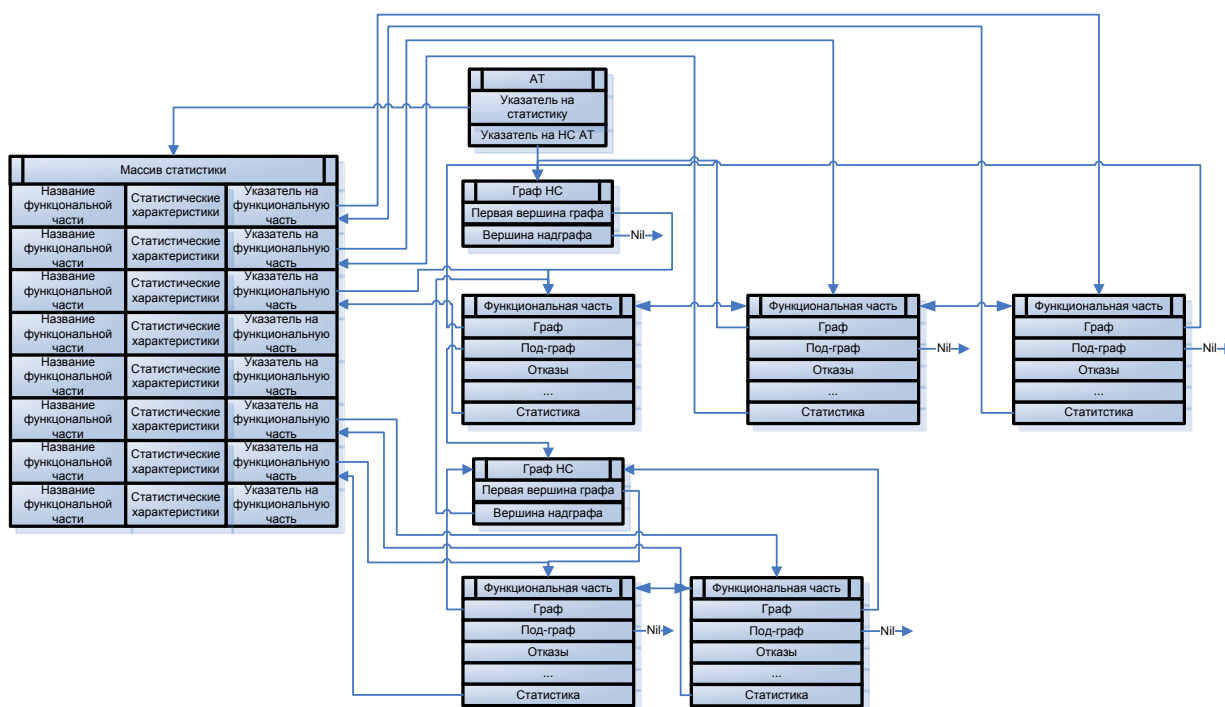


Рис. 2.8. Структура данных для хранения статистической информации ИМ НС АТ ВН

В течение реализации модели вычисляется максимально необходимое количество бригад центра сервисного обслуживания. Информация о значении данного показателя хранится в специальной переменной ИМ сервисного центра (Таблица 2.19).

Таблица 2.19.

MaxPeople	Максимально необходимое количество бригад центра сервисного
-----------	---

	обслуживания
CurrentPeople	Текущее значение требуемого количества бригад центра сервисного обслуживания

Изменение текущего значения требуемого количества бригад центра сервисного обслуживания происходит в процедурах «Демонтажа» (увеличение) и «Настройки» (уменьшение) (рис 2.5 и 2.6). Если значение CurrentPeople больше MaxPeople, то запоминаем новое максимальное количество бригад центра сервисного обслуживания.

2.4. Комплекс взаимосвязанных имитационных моделей процессов ППО АТ ВН.

Входной информацией для КВИМ является заявка на производство ЗЧ и склады ТЦ, на которые данных ЗЧ необходимо доставить. Данная заявка содержится в структуре данных «Заявка на производство» (таблица 2.20):

Таблица 2.20.

NameFactory	Название ПИ
Element	Требуемая ЗЧ: элемент, блок или агрегат
NameTransportNode	Название склада ТЦ, в котором будет храниться данная ЗЧ
TimeCreate	Время запуска производства новой ЗЧ
Value	Необходимое количество ЗЧ

На момент запуска КВИМ в очереди к соответствующим ПИ добавляются необходимые для производства ЗЧ.

2.4.1. ИМ транспортировки.

Параметры ИМ.

Основным параметром транспортной ИМ является транспортная сеть. Задается в виде графовой модели. Вершины соответствуют транспортным узлам, а дуги определяют параметры перемещения между узлами. В вершинах транспортной сети задаются: склады, предприятия производители, АРЗ и АЧ с множеством АТ, базирующейся на аэродроме АЧ. Дуги определяют транспортные пути, по которым может осуществляться перемещение ЗЧ и отказавших СЧ АТ с использованием транспортных средств.

Для задания узлов транспортной сети используются объекты типа «транспортный узел». Структура данного объекта приведена ниже (таблицы 2.21, 2.22 и 2.23):

Таблица 2.21.

Name	Название транспортного узла
Sklad	Указатель массив складов в данном транспортном узле

Ns	Массив HC AT.(множество экземпляров различной AT)
Manufact	Указатель на производство в данном узле
ARZ	Указатель на APЗ в данном транспортном узле
TypeNode	Определяет тип транспортного узла
NexTTTransportNode	Указатель на следующий транспортный узел
Arc	Указатель на множество дуг, определяющих параметры перемещения между транспортными узлами

Если в вершине отсутствует производство, APЗ, или АЧ, то соответствующие указатели принимают значение nil.

Набор процедур

Таблица 2.22.

AddArc(TypeArc:Byte; LengthArc:Double)	Добавление новой дуги из данной вершины
SortProduction	Сортировка и поиск требуемых ЗЧ в вершине
SearchStatProductionMax	
SearchProductionName(Name:String)	

Для описания дуг применяются следующий объект:

Таблица 2.23.

Name	Название транспортного узла
Node	Указатель на вершину, в которую входит данная дуга
NexTTTransportArc	Указатель на следующую дугу из данной вершины
TypeArc	Тип дуги, определяющий транспортные средства, которыми возможно перемещение по данной дуге
LengthArc	Длина дуги (в км)

Так как между вершинами возможно перемещение не только одного типа транспортного средства (например, по дорогам могут передвигаться легковые автомобили и грузовики, два города могут быть соединены автомобильными дорогами и железнодорожным сообщением) то возможно наличие множества дуг между двумя вершинами транспортной сети.

Для описания транспортных средств используется массив «Транспортные средства», состоящий из записей (таблица 2.24):

Таблица 2.24.

NameTC	Название транспортного средства
--------	---------------------------------

CostTC	Стоимость часа использования транспортного средства
TypeArcTC	Массив типов дуг, по которым может перемещаться данное транспортное средство
SpeedTC	Скорость ТС (в км/ч)

Состояние ИМ

Состояние ИМ определяется набором событий «окончания транспортировки ЗЧ на склад»:

Событие «Окончание транспортировки ЗЧ на склад» (4):

- Название транспортируемой ЗЧ
- Указатель на вершину, в которую транспортируется ЗЧ
- Указатель на вершину, в которую необходимо транспортировать ЗЧ после перемещения в требуемую вершину. (Дальнейшая транспортировка. Применяется при доставки новых ЗЧ на склады ТЦ со складов ПИ и АРЗ)

При обработке события «Окончание транспортировки ЗЧ на склад» происходит последовательное выполнение следующих действий: (рис 2.9)

1. Если в данной вершине есть АТ, то
 - a. Поиск экземпляра АТ, которому необходима данная ЗЧ для восстановления работоспособности.
 - b. Восстановление СЧ АТ, если такой был найден.
2. Поиск АТ в транспортной сети, которой необходима данная ЗЧ
 - a. Если такой экземпляр АТ найден, то создание события транспортировки данной ЗЧ на склад АЧ, у которой был найдена АТ.
 - b. Если АТ не найдена, склад может вместить данную ЗЧ и дальнейшая транспортировка ЗЧ не требуется, то добавляем ЗЧ на склад:
 - i. Создаем новый тип ЗЧ, если такого элемента на складе еще не было
 - ii. Уменьшаем объем склада
 - iii. Увеличиваем количество данных ЗЧ на складе на 1 и заносим время поступления на склад
 - c. Если требуется дальнейшая транспортировка, то отправляем ЗЧ на требуемый склад.
 - d. Если склад не может вместить данную ЗЧ, то отправляем ЗЧ на ближайший склад, который может вместить данную ЗЧ.

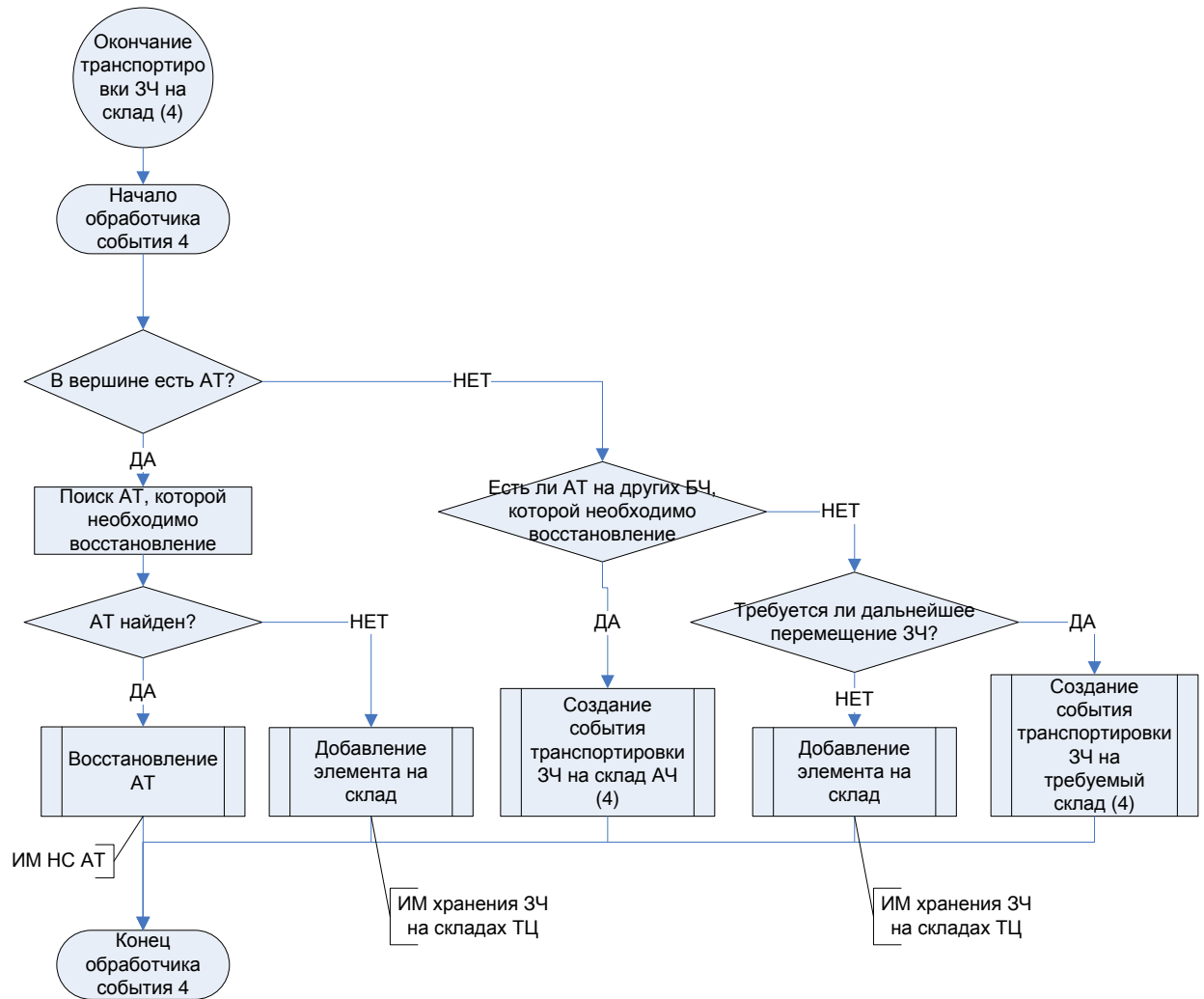


Рис 2.9. Алгоритм обработки события «Окончание транспортировки 3Ч на склад»

В течение реализации собирается статистика по суммарному времени эксплуатации каждого транспортного средства. Данная информация хранится в массиве «Транспортные средства». (таблица 2.25)

Таблица 2.25.

TimeTC	Время использования транспортного средства в течение реализации (в часах)
MtimeTC	Оценка математического ожидания времени использования транспортного средства по множеству реализаций (в часах)
TimeElement	Массив времен транспортировки, 3Ч от складов ТЦ до АЧ.

При создании события «Транспортировка 3Ч» вычисляется минимальный по времени путь между исходной и целевой вершинами транспортного графа. Для поиска минимального пути применяется волновой алгоритм, модифицированный для поиска пути по графам [35].

В массив TimeElement добавляются времена транспортировки (в часах). Добавление происходит при создании события «Окончания транспортировки ЗЧ» если транспортируется ЗЧ нужного типа и пунктом назначения (для транспортируемой ЗЧ) является АЧ.

2.4.2. ИМ процессов складского хранения ЗЧ.

Параметры ИМ.

Для хранения ЗЧ создается объект склада (таблицы 2.26 и 2.27). При этом необходимо учитывать, что перемещение ЗЧ возможно только между складами, то есть у каждого узла транспортной сети, содержащего ПИ, АЧ или АРЗ необходимо разместить склад ЗЧ.

Таблица 2.26.

FirstElement	Указатель на первую ЗЧ, хранимую на складе
CostSklad	Стоимость аренды 1 м ² склада
MaxVolumeSklad	Максимальный объем склада в м ²
PowerSklad	Параметр «нагрузки» на ЗЧ при хранении на данном складе

Набор процедур

Таблица 2.27.

ClearSklad;	Очищение склада (с удаление типа ЗЧ)
ClearElementSklad;	Очищение склада, путем обнуления количества деталей, хранящихся на нем
SearchElement (Name:string)	Поиск ЗЧ на складе
AddElement	Добавление ЗЧ на склад

Так как на одной и той же складской территории возможно хранение ЗЧ на открытой площадке, в закрытом или отапливаемом помещении, то необходимо разделить данные складские территории в различные экземпляры объекта «Склад» и поместить все территории в массив складов одного транспортного узла.

Состояние ИМ

Важнейшими переменными состояния ИМ являются переменные, определяющие текущее состояние ЗЧ во всех узлах транспортной сети. Для хранения ЗЧ на каждом складе имеется список (начало списка – FirstElement структуры «Склад») типов ЗЧ, хранимых (в течение времени моделирования) на данном складе. Для каждого типа ЗЧ, хранимой на данном складе, создается свой объект (таблица 2.28):

Таблица 2.28.

Name	Название ЗЧ, хранимой на складе (определяет тип ЗЧ)
Kolvo	Количество ЗЧ данного типа на складе
TimeEnabled	Массив времен поступлений деталей на склад
NextElement	Указатель на следующую ЗЧ
TimeWaiting	Время ожидания детали на складе (для сбора статистики)
ArrayTimeWaiting	Массив, состоящий из времен поступления и отгрузки ЗЧ определенного типа со склада ТЦ.

При поступлении ЗЧ на склад увеличивается количество ЗЧ данного типа (Kolvo) и время поступления ЗЧ добавляется в массив TimeEnabled. При транспортировке ЗЧ со склада ищется минимальное время в массиве TimeEnabled (минимальное время прибытия определяет самую «залежавшуюся» ЗЧ на складе) и вычисляется TimeWaiting по формуле: $TimeWaiting = TimeWaiting + TimeDecrease - \text{Min}(TimeEnabled) \cdot TimeDecrease$ – время удаления ЗЧ со склада ТЦ. Минимальное время удаляется из массива TimeEnabled, а общее количество ЗЧ данного типа уменьшается на 1.

Набор процедур для объекта

Таблица 2.29.

ClearElement;	Очистка ЗЧ склада
DecreaseElement(TimeDecrease:Double);	Удаление одной ЗЧ со склада (время удаления)

Основными процедурами складской модели являются процедуры добавления и удаления ЗЧ со склада. Блок-схемы данных процедур приведены ниже (рис 2.10):

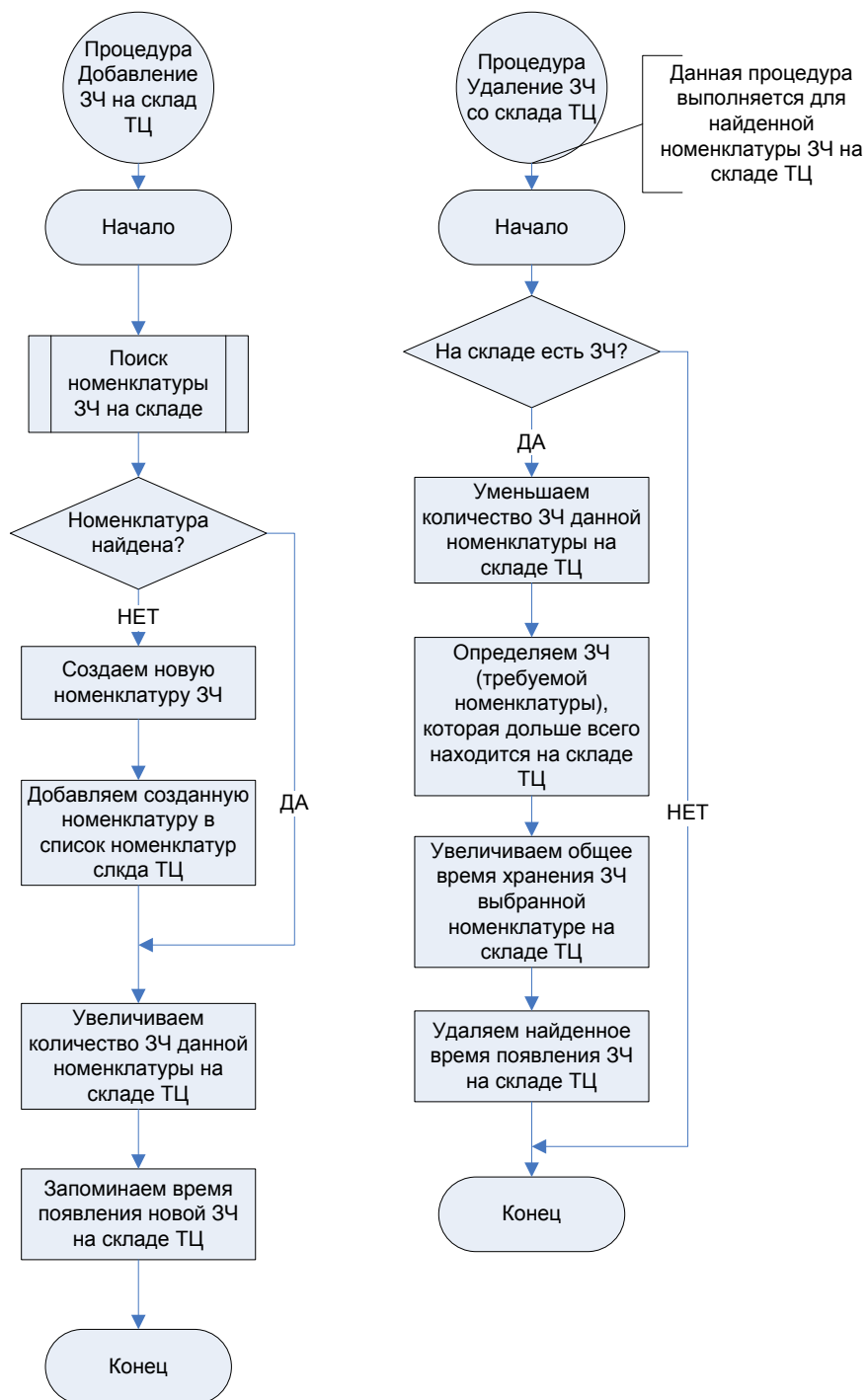


Рис 2.10. Процедуры изменения состояния ИМ хранения ЗЧ.

2.4.3. ИМ предприятия-изготовителя новых ЗЧ и ИМ восстановления отказавших СЧ АТ на АРЗ.

Модель восстановления отказавших СЧ АТ на АРЗ аналогична модели ПИ новых ЗЧ. Основными отличиями данных моделей является процесс поступления заявок на производство или восстановление. В случае производства новых ЗЧ заявка поступает из модели СППР, а для восстановления отказавших СЧ АТ заявка поступает вместе с отказавшей СЧ АТ. Дальнейший процесс обработки заявок в обоих ИМ одинаков.

Рассмотрим данный процесс в терминах многоканальной системы массового обслуживания [12,55].

Поступающие заявки заносятся в очередь на выполнение. После поступления новой заявки проверяется возможность ее выполнения на предприятии (ПИ или АРЗ). Выполнение заявки возможно, в случае если заявка первая в очереди и доступная мощность предприятия больше требуемой мощности на выполнение данной заявки. Если мощности предприятия не хватает для выполнения заявки, то она остается в очереди на выполнение и ожидает высвобождения необходимой мощности предприятия. Возможно выполнение не первой заявки из очереди в случае, когда первая заявка не может выполняться по причине нехватки мощности предприятия, а для выполнения второй заявки мощности предприятия достаточно.

Если выполнение заявки возможно, то определяется время, через которое предприятие выполнит данную заявку. Доступная мощность предприятия уменьшается на величину мощности, требуемой для выполнения заявки. По истечении времени выполнения заявки на предприятии появляется новая ЗЧ, а доступная мощность предприятия увеличивается. При этом происходит проверка возможности выполнения (в зависимости от требуемой мощности) следующей в очереди заявки.

Управление приоритетностью заявок осуществляется путем перемещения заявок в очереди.

Параметры ИМ.

Для каждого узла с производством задаются элементы, которые данное предприятие может производить. Указываются стоимостные и временные характеристики производства, а также производственная мощность предприятия.

Информация о производимой продукции хранится в объекте «производство» (таблица 2.30 и 2.31):

Таблица 2.30.

Name	Название завода производителя
MaxPower	Максимальная мощность предприятия
ManufactQuery	Указатель на очередь продукции, требуемой к производству
Production	Массив производимой продукции
NameProduction	Название производимой продукции (Тип ЗЧ)
CostProduction	Стоимость производства данной продукции
TimeProduction	Время производства одной единицы данной продукции

VolumeProduction	Объем в м ² , занимаемы на складе при хранении продукции
------------------	---

Набор процедур

Таблица 2.31.

SearchManufact(NameProduction:string):Word;	Поиск продукции в массиве
LoadManufactFile(NameFile:string);	Загрузка параметров производства из файла

Состояние ИМ.

Состояние ИМ предприятий – производителей ЗЧ определяется состоянием очереди производства и событиями окончания производства ЗЧ. Величина текущей загрузки предприятия-изготовителя хранится структуре объекта «производство» (таблицы 2.32 и 2.33):

Таблица 2.32.

Power	Текущая загрузка предприятия
AllCost	Общая стоимость производства/восстановления
MAllCost	Оценка математического ожидания общей стоимости производства/восстановления на множестве реализаций.
ArrayRecoverTime	Массив времен восстановления СЧ АТ, определенного типа. (Для сбора статистики)

Очередь продукции, требуемой к производству (указатель ManufactQuery в объекте производство) состоит из объектов «ЗЧ очереди производства»:

Таблица 2.33.

Production	Указатель на производимую продукцию из массива Production объекта производство
Node	Указатель на вершину, в которую необходимо транспортировать произведенную ЗЧ
TimeEnd	Время предположительного окончания производства ЗЧ (время предположительного запуска производства равна: TimeEnd-TimeProduction)
GoProcess	Флаг запуска производства данной ЗЧ.

Событие «Окончание производства ЗЧ на ПИ» (5):

- Тип производимой ЗЧ
- Указатель на место производства.

- Указатель на место, в которое необходимо транспортировать произведенную ЗЧ
- Флаг производства новой ЗЧ. (в случае False данное событие принадлежит восстановлению отказавшей ЗЧ на АРЗ)

Алгоритм обработки модельного события приведен на рис 2.11.

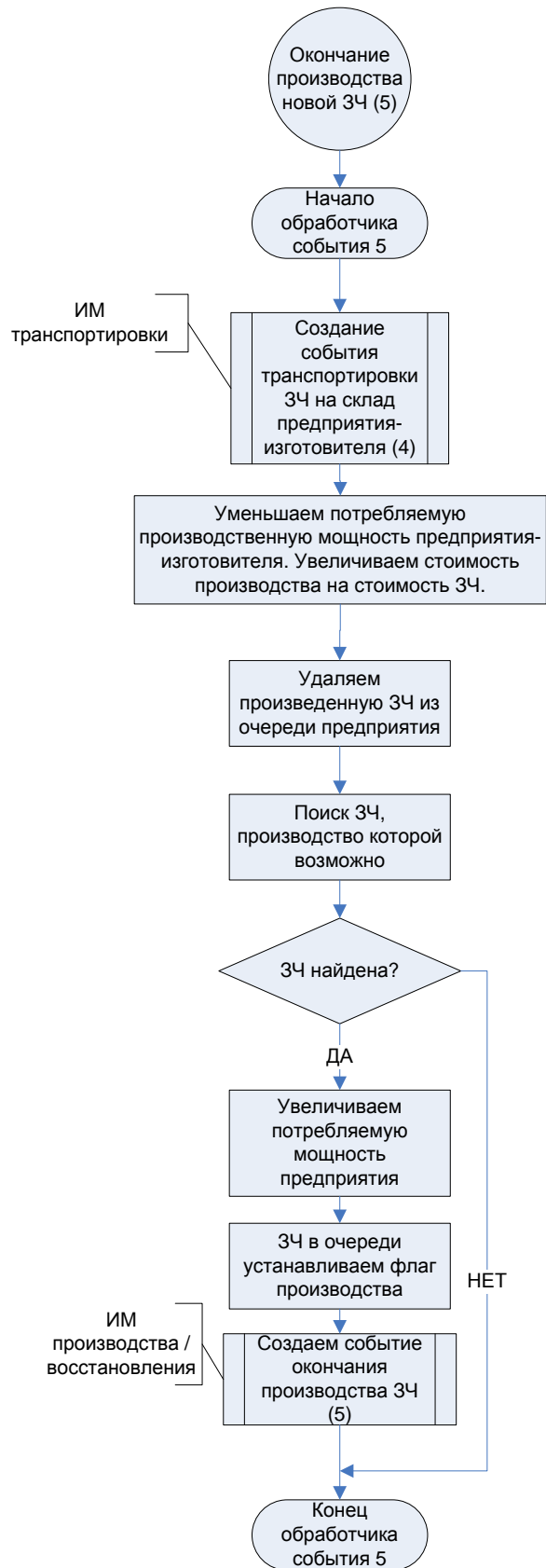


Рис 2.11. Алгоритм обработки события «Окончание производства новой ЗЧ»

2.4.4. Объединение и взаимодействие разработанных ИМ в единый комплекс.

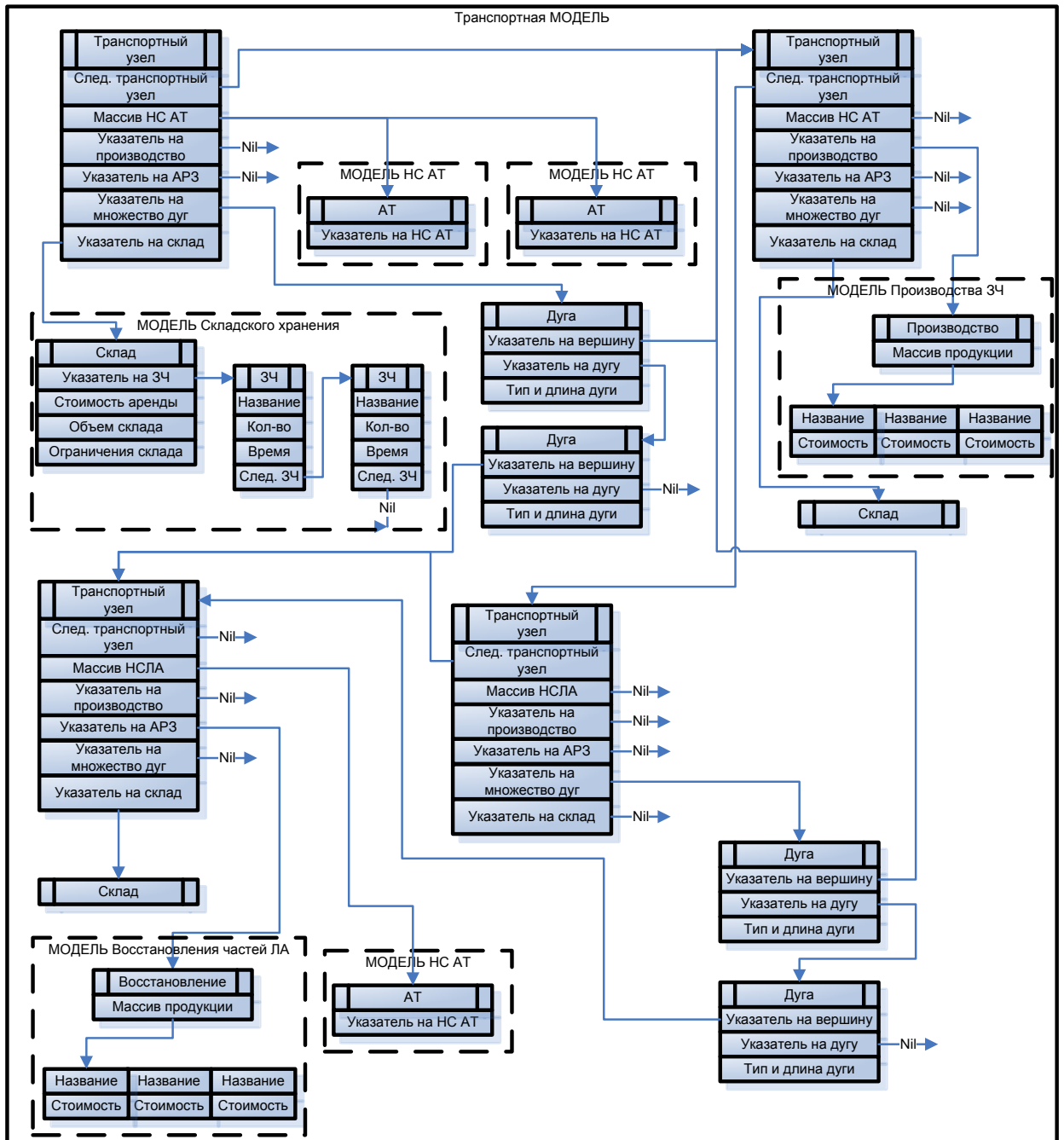


Рис 2.12. Структура параметров КВИМ

На рисунке 2.12 приведена схема хранения и взаимодействия параметров и состояний ИМ, а также различных по назначению ИМ ППО АТ ВН для организации КВИМ.

Анализируя процессы послепродажного обслуживания АТ можно выделить такие событийные явления как: начало и окончание производства ЗЧ, начало и окончание процессов ремонта СЧ АТ на АРЗ, окончание транспортировки ЗЧ на склад. Данные событийные явления возможно реализовать с помощью дискретной ИМ,

функционирующей на основе модельных событий, тем самым связав ИМ ППО АТ ВН с ИМ НС АТ. Перечень основных модельных событий обобщенной ИМ и схема взаимосвязи между ними, отражающая процесс планирования одних событий при обработке других, показан на рисунке 2.13.

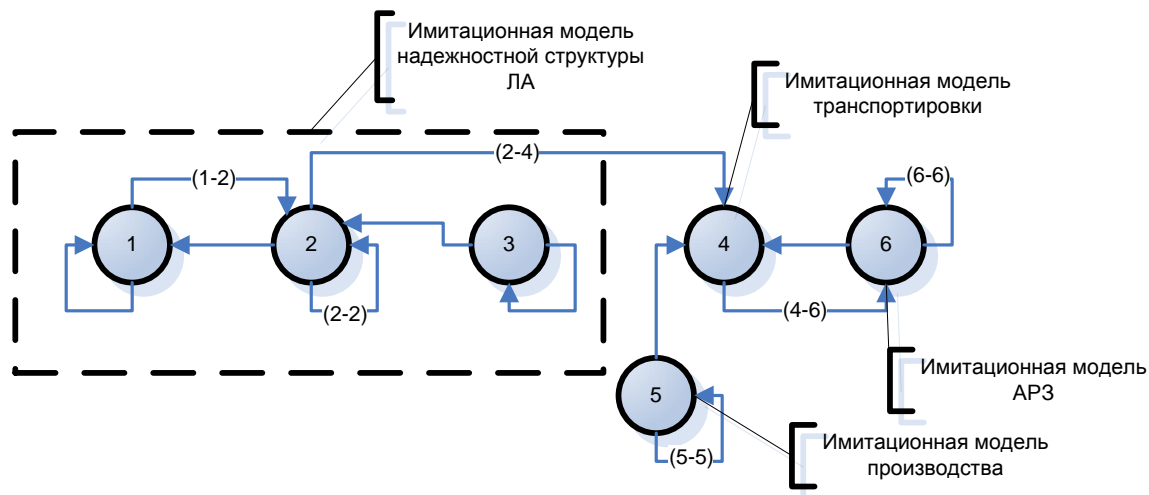


Рис 2.13. Граф-схема взаимосвязи событий КВИМ.

Название и кодирование основных временных событий:

1-3. События ИМ НС АТ (рис 2.2.)

4. Окончание транспортировки ЗЧ на склад.

5. Производство ЗЧ.

6. Окончание восстановления СЧ АТ.

Условия планирования событий ИМ ППО АТ ВН:

(2-4) Если на складе аэродрома нет требуемой ЗЧ, а на другом складе есть, то транспортировка ЗЧ на склад аэродрома для проведения замены. Или если отказавшая ЗЧ подлежит восстановлению, то транспортировка её на склад ближайшего АРЗ

(4-6) Если отказавшая СЧ доставлен на склад АРЗ, на котором возможно восстановление отказавшей СЧ.

(5-5) Если в очереди на производство имеются ЗЧ.

(6-6) Если в очереди на восстановление имеются отказавшие СЧ АТ.

Взаимодействие между различными имитационными моделями в КВИМ происходит путем вызова событий других моделей при достижения определенного состояния или получении управляющих команд. Схематичное изображение процесса

взаимодействия имитационных моделей и структурных компонент приведено на рисунке 2.14.

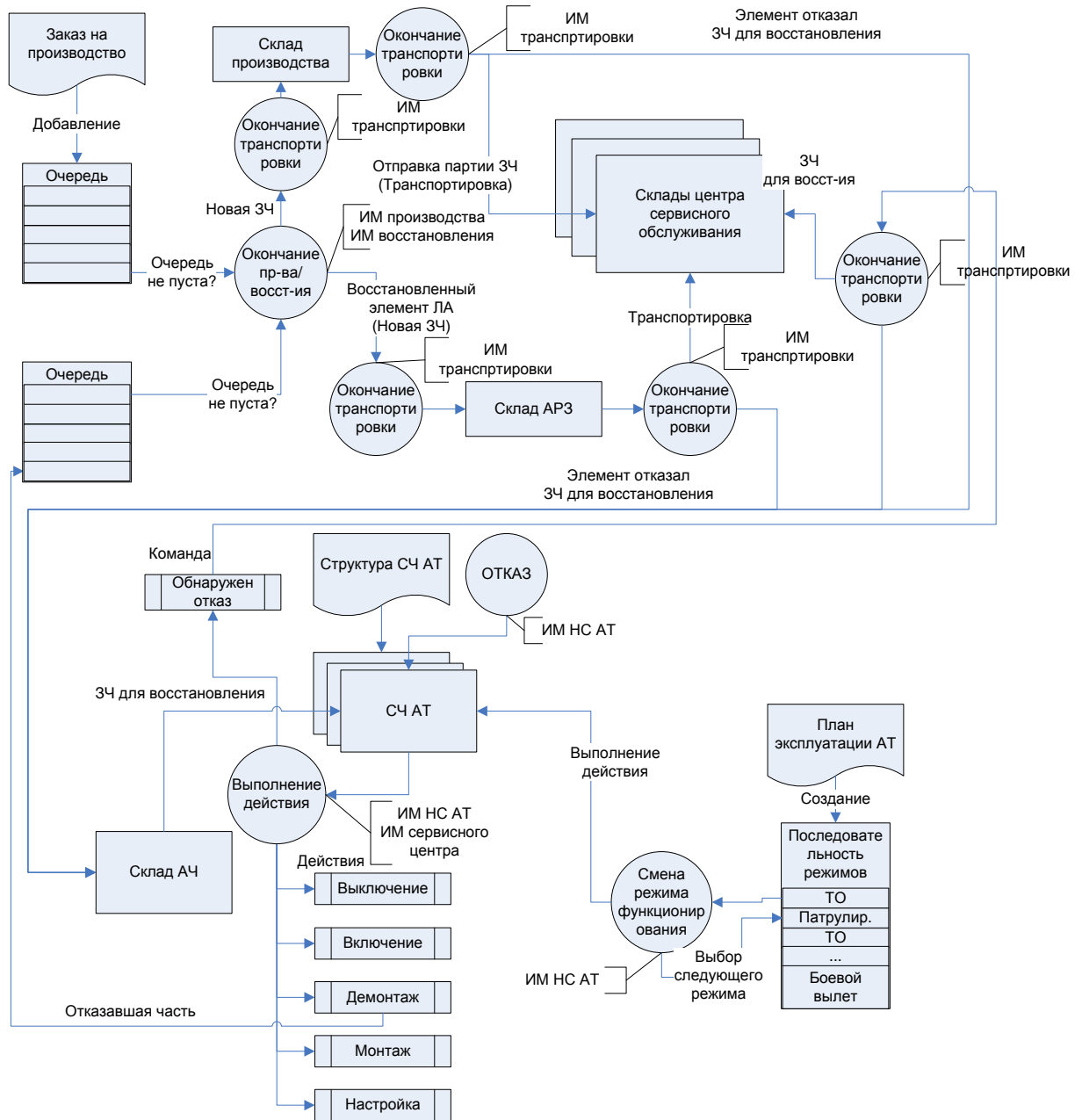


Рис 2.14. Схема взаимодействия имитационных моделей и структурных компонент в КВИМ.

Данная схема (рис 2.14) отображает процесс взаимодействия событий КВИМ ППО АТ ВН. Большинство модельных событий, такие как: Окончание производства новой ЗЧ (ИМ производства) или восстановления отказавшей СЧ АТ (ИМ восстановления) и обнаружение отказа в ходе выполнения различных действий над СЧ АТ (ИМ НС АТ) создают событие транспортировки ЗЧ (ИМ транспортировки). Данное событие

обеспечивает перемещение ЗЧ между различными складами: Складом АРЗ и складами ТЦ, складом ПИ и складами ТЦ, складами ТЦ и складами АЧ.

2.5. Моделирование случайных явлений и организация зависимых имитационных экспериментов

Наиболее важным случайным явлением в ИМ НС АТ является случайная величина – ВБР элементов НС СЧ АТ. Сложность моделирования этого случайного явления определяется следующими обстоятельствами:

- элементы НС АТ в процессе ее функционирования работают в разных режимах, которые меняются в соответствии с заданным планом;
- для каждого элемента в разных режимах определены свои параметры ЗР ВБР;
- отказы элементов могут быть двух типов [23]: внезапные отказы (ВО) и износные отказы (ИО). Предполагается, что время свершения ВО зависит только от условий работы НС АТ (вида режима), а время свершения ИО зависит еще и от длительности времени функционирования в определенных режимах (так называемого времени наработки);
- существуют зависимые отказы, когда отказ некоторого элемента вызывает, как следствие, отказы других элементов, или ускоряет их отказ, влияя соответствующим образом на параметры закона распределения их ВБР.

Предполагается использовать различное вероятностное описание ВБР для указанных типов отказов и, соответственно, разные алгоритмы определения моментов их свершения:

- для ВО предполагается экспоненциальный закон распределения (ЭЗР) ВБР, параметры которого будут определяться элементом и видом режима работы НС АТ. Теоретически известно, что ЭЗР «не имеет памяти», т.е. при каждой смене режима работы НС АТ параметры закона распределения ВБР для очередного режима не зависят от времени наработки в предыдущих режимах. Используя это свойство ЭЗР, моделирование момента ВО предлагается осуществлять следующим образом: при каждой смене режима получается очередная реализация ВБР, которая сравнивается с длительностью работы НСЛА в этом режиме на очередном этапе; момент отказа фиксируется, если реализация ВБР меньше длительности работы в рассматриваемом режиме;
- для ИО предполагается нормальный закон распределения (НЗР). При этом для каждого режима используется понятие «коэффициент нагрузки» [23], который характеризуется соотношением интенсивностей износа элемента в том или ином режиме, по отношению к интенсивности его износа в некоторых условиях, для которых

определены параметры НЗР. При идеальных условиях функционирования АТ коэффициент нагрузки равен 1. На основании этого моделирование момента ИО предлагается осуществлять следующим образом: в соответствии с НЗР получается реализация времени наработки до отказа; затем в процессе моделирования суммируются фактические наработки по реализовавшимся длительностям режимов, взвешенные (умноженные) на соответствующие коэффициенты нагрузки. Момент ИО определяется по равенству указанных величин.

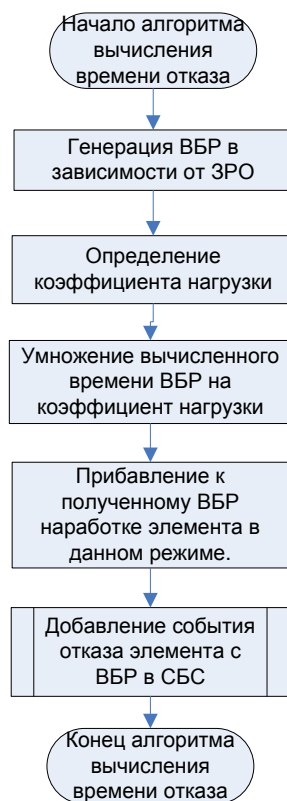


Рис 2.14. Алгоритм вычисления времени отказа элемента в ИМ НС АТ.

Моделирование реализаций ВБР элементов помимо моментов смены режимов работы НС АТ осуществляется также при замене отказавших СЧ НС АТ при моделировании проведения ремонтно-восстановительных работ, как следствие зависимых отказов.

Для моделирования зависимых отказов в соответствии со структурой взаимосвязи зависимых отказов, определенной в параметрах ИМ, при отказе какой-либо СЧ определяется множество других СЧ, отказы которых зависят от него.

Если это ВО, то в соответствии с заданной вероятностью моделируются отказы этих зависимых СЧ, либо переопределяются параметры ЗР ВБР.

Моделирование зависимых ИО осуществляется через увеличение коэффициента нагрузки у зависимой СЧ.

Информация о законах распределения времени до отказа хранится в объекте «Закон распределения» и создается для каждого объекта «Отказ» (их может быть несколько) у каждого элемента СЧ АТ. Для каждого закона распределения хранится необходимый набор параметров: для ЭЗР – λ , для НЗР – математическое ожидание (M) и дисперсия (D) и т.д. Кроме параметров для каждого закона распределения указывается соответствующий алгоритм вычисления величины, генерируемой с помощью данного закона.

Зависимые отказы увеличивают коэффициент нагрузки на СЧ АТ на величину, указанную в соответствующем поле (Power) объекта «Зависимый отказ» (таблица 2.34).

Таблица 2.34.

Node	Указатель на элемент, на который влияет отказ
TypeRegularly, TypeFailure	Указать на состояние элемента, в котором изменяется нагрузка из-за отказа.
Power	Величина изменения нагрузки на элемент
NextRelation	Указатель на следующую зависимость

Еще одно случайное явление, реализацию которого необходимо моделировать – это событие обнаружения скрытых отказов. Моделирование этих событий осуществляется при обработке модельных событий, связанных с проведением действий по техническому обслуживанию НС СЧ АТ в соответствии с заданными в параметрах ИМ вероятностями свершения событий обнаружения скрытых отказов.

Моделирование вероятности осуществляется путем генерирования случайного числа, равномерно распределенного на интервале (0; 1). Если сгенерированное число меньше заданной вероятности, отказ обнаружен.

По результатам моделирования вычисляются лишь оценки критериев, которые сами являются случайными величинами. Стохастический разброс оценок определяет одну из составляющих погрешности имитационного моделирования, называемую статистической погрешностью. Уменьшение этой погрешности возможно за счет увеличения объема имитационных экспериментов, но из-за этого растет и вычислительная сложность имитационных исследований. Для снижения времени моделирования возможно проведения зависимых испытаний. [48] Для этого в датчике случайных чисел имеется возможность ручного задания начального числа, что в результате дает одинаковую последовательность псевдослучайных чисел. Данный метод позволяет проводить одинаковые исследования на различных вариантах модели, например, при различных заявках на производство ЗЧ.

2.6. Сбор статистики и расчет показателей КОРМ.

В данной работе сбор статистики осуществляется по множеству реализаций. По окончании каждой реализации модели (модельное время достигло времени планового периода) вычисляются значения критериев оценки результатов моделирования КВИМ ППО АТ ВН:

1. Оценка математического ожидания коэффициент готовности парка АТ. Данный критерий вычисляется как математическое ожидание по множеству реализаций среднего коэффициента готовности по парку АТ (таблица 2.35).

$$\widetilde{Kz} = \sum_{i=1}^n \frac{\widetilde{Kz_{AT_i}}}{n} \quad (2.1)$$

Таблица 2.35.

$K_{Г_{AT_i}}$	коэффициент готовности i-й АТ	$\widetilde{Kz_{AT_i}} = \sum_{j=1}^K \frac{Kz_{AT_{i,j}}}{K}; K_{Г_{AT_i}} = \frac{TimeOsn[0] + TimeOsn[1]}{ModelTime}$ <p>Где $TimeOsn[0]$ (Объект «Статистика НС» ИМ НС) – время (в часах), которое АТ находилась в режиме ожидания; $TimeOsn[1]$ (Объект «Статистика НС» ИМ НС) – время (в часах), которое функциональная часть или АТ в целом эксплуатировалась; $ModelTime$ – модельное время (в часах) имитационного эксперимента (Основная программа). K – количество прогонов КВИМ.</p>
N	количество АТ в парке. (Основная программа)	

2. Общая стоимость мероприятий МТО ППО парка АТ ($C_{ППО}$) (таблица 2.36.):

$$\widetilde{C_{ППО}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{xp}} \widetilde{T_{xp\ 3Ч_{i,j}}} * V_{3Ч_i} * C_{xp\ 3Ч_j} + \sum_{j=1}^{N_{mu}} C_{mu\ 3Ч_j} + \sum_{j=1}^{N_{ap3}} C_{AP3\ части\ 3Ч_j} + \sum_{i=1}^{N_{mc}} \widetilde{T_{mc_i}} * C_{mc_i} + N_{bp} * C_{bp} * T_M \quad (2.2)$$

Таблица 2.36.

N	Количество различных типов ЗЧ. (Основная программа)	
N_{xp}	Количество складов ТЦ. (Основная программа)	
$N_{пи}$	Количество предприятий-изготовителей ЗЧ. (Основная программа)	
N_{ap3}	Количество АРЗ. (Основная программа)	
$N_{тс}$	Количество различных типов транспортных средств. (Основная 77программа)	
$\widetilde{T_{xp\ 3Ч_{i,j}}}$	Оценка, по множеству прогонов, времени хранения ЗЧ i-ого типа	Переменная состояния ИМ хранения ЗЧ на складах ТЦ – TimeWaiting (Объект

	на j -ом складе. (в часах)	Тип ЗЧ, хранимая на складе ТЦ)
$C_{\text{хрЗЧ}_j}$	Стоимость одного часа хранения одного м^2 на j -ом складе ТЦ (в руб.)	Переменная параметра ИМ хранения ЗЧ на складах ТЦ – CostSklad (Объект «Склад»)
$V_{\text{зч}_i}$	Объем в м^2 , занимаемый ЗЧ i -ого типа на складах ТЦ.	Переменная параметра ИМ производства ЗЧ – VolumeProduction (Объект «Производство»)
$C_{\text{пизч}_j}$	Стоимость производства всех ЗЧ j -ом ПИ (в руб.)	Переменная состояния ИМ производства новых ЗЧ – AllCost (Объект «Производство»)
$C_{\text{АРЗ части ЗЧ}_j}$	Оценка, по множеству прогонов, стоимости восстановления всех СЧ АТ j -ом АРЗ. (в руб.)	Переменная состояния ИМ восстановления СЧ АТ – AllCost (Объект «Производство»)
$C_{\text{ТС}_i}$	Стоимость одного часа использования i -го ТС (в руб.)	Переменная параметра ИМ транспортировки – CostТС (массив «Транспортные средства»)
$\widetilde{T}_{\text{ТС}_i}$	Оценка, по множеству прогонов, общего времени использования i -го ТС. (в часах)	Переменная состояния ИМ транспортировки – TimeТС (массив «Транспортные средства»)
$N_{\text{бр}}$	Максимальное количество требуемых бригад сервисного центра	Переменная состояния ИМ центра сервисного обслуживания – MaxPeople
$C_{\text{бр}}$	Стоимость одного часа содержания бригады сервисного центра (в руб.)	Переменная параметра ИМ центра сервисного обслуживания – CostPeople
T_M	модельное время имитационного эксперимента (Основная программа).	

Алгоритм вычисления значений критериев после реализации КВИМ ППО АТ ВН представлен на рис 2.15.

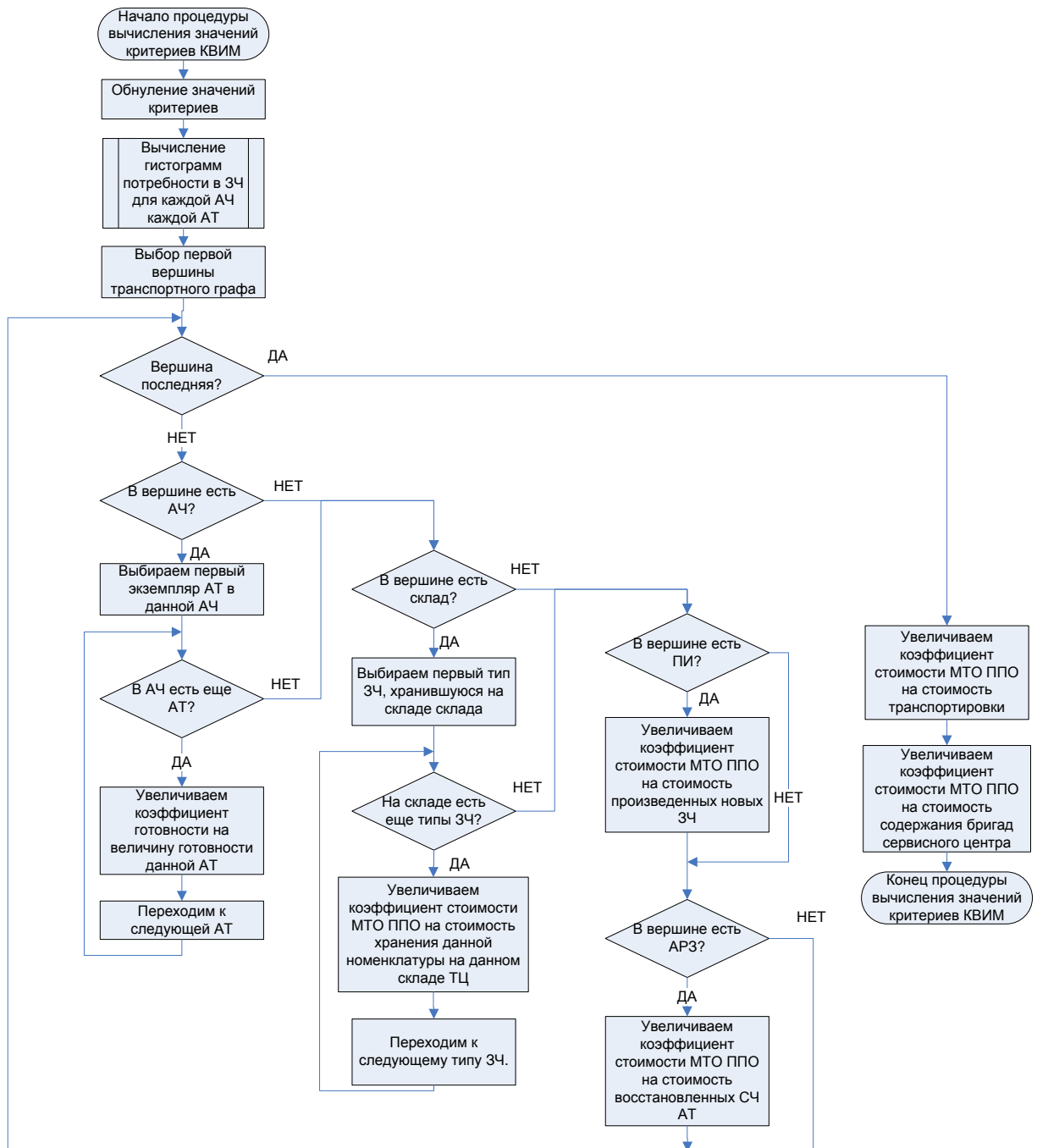


Рис 2.15. Алгоритм вычисления значений критериев после реализации КВИМ ППО АТ ВН.

Так как оценки значений отдельных составляющих критериев вычисляются по множеству (больше 30) реализаций, то по закону больших чисел данные оценки можно рассматривать как случайные величины, распределенные по нормальному закону распределения. В связи с этим для каждой оценки вычисляется ее математическое ожидание и дисперсия по формулам:

$$\widetilde{M}_x = \frac{\sum_{i=1}^N M_{i,x}}{N} \quad (2.3)$$

$$\overline{S_x} = \widetilde{D_x} = \alpha \widetilde{Z_x} - (\widetilde{M_x})^2 \quad (2.4)$$

$$\alpha \widetilde{Z_x} = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,x})^2}{N} \quad (2.5)$$

$$\widetilde{S_x} = \frac{N}{N-1} * \overline{S_x} \quad (2.6)$$

Где, $\widetilde{M_x}$ – оценка математического ожидания вычисляемого критерия; $M_{i,x}$ – математическое ожидание критерия на i -ой реализации; N – количество реализаций КВИМ, $\overline{S_x}$, $\widetilde{D_x}$ – смещенная оценка дисперсии вычисляемого критерия; $\alpha \widetilde{Z_x}$ – оценка второго начального момента вычисляемого критерия; $\widetilde{S_x}$ – несмещенная оценка дисперсии вычисляемого критерия

Для оценки математического ожидания вычисляется доверительный интервал $(Ib: (\widetilde{M_x} - \varepsilon; \widetilde{M_x} + \varepsilon))$ при уровне значимости $\alpha = 0.9$. Вычисление доверительного интервала производится по формулам:

$$\varepsilon = Z \left(\frac{\alpha}{2} \right) * \frac{\sqrt{\widetilde{S_x}}}{\sqrt{N}} \quad (2.7)$$

Где, $Z \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ – значение функции распределения нормального ЗР, для уровня значимости $\alpha = 0.9$: $Z \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 1.65$;

По результатам множества реализаций дополнительно собираются статистические оценки:

1. Ряд распределения количества отказов по каждой СЧ каждого экземпляра АТ. Поле ArrayHistKolFailure объекта «Статистика НС» ИМ НС АТ
2. Ряд распределения количества восстановлений по каждой СЧ каждого экземпляра АТ. Поле ArrayHistKolRecovery объекта «Статистика НС» ИМ НС АТ

Для оценки процессов, протекающих в системе ППО, определяются следующие величины по множеству реализаций:

1. Оценка процесса потребности в ЗЧ определенного типа каждого экземпляра АТ и всех АТ в совокупности. Основана на обработке массива TimeFailure объекта «Статистика НС» ИМ НС АТ.
2. Оценка процесса хранения ЗЧ определенного типа на определенном складе и на всех складах в совокупности. Основана на обработке массива ArrayTimeWaiting объекта «Склад» ИМ хранения ЗЧ.
3. Оценка процесса транспортировки ЗЧ определенного типа на определенном складе и на всех складах в совокупности. Основана на статистической

обработке массива TimeElement объекта «Транспортные средства» ИМ транспортировки.

- Оценка процесса восстановления отказавшей СЧ АТ определенного типа на определенном АРЗ и на всех АРЗ в совокупности. Основана на статистической обработке массива ArrayRecoverTime объекта «Производство» ИМ восстановления отказавших СЧ АТ.

Общий вид структур данных для сбора статистики по реализации КВИМ представлен на рис 2.16.

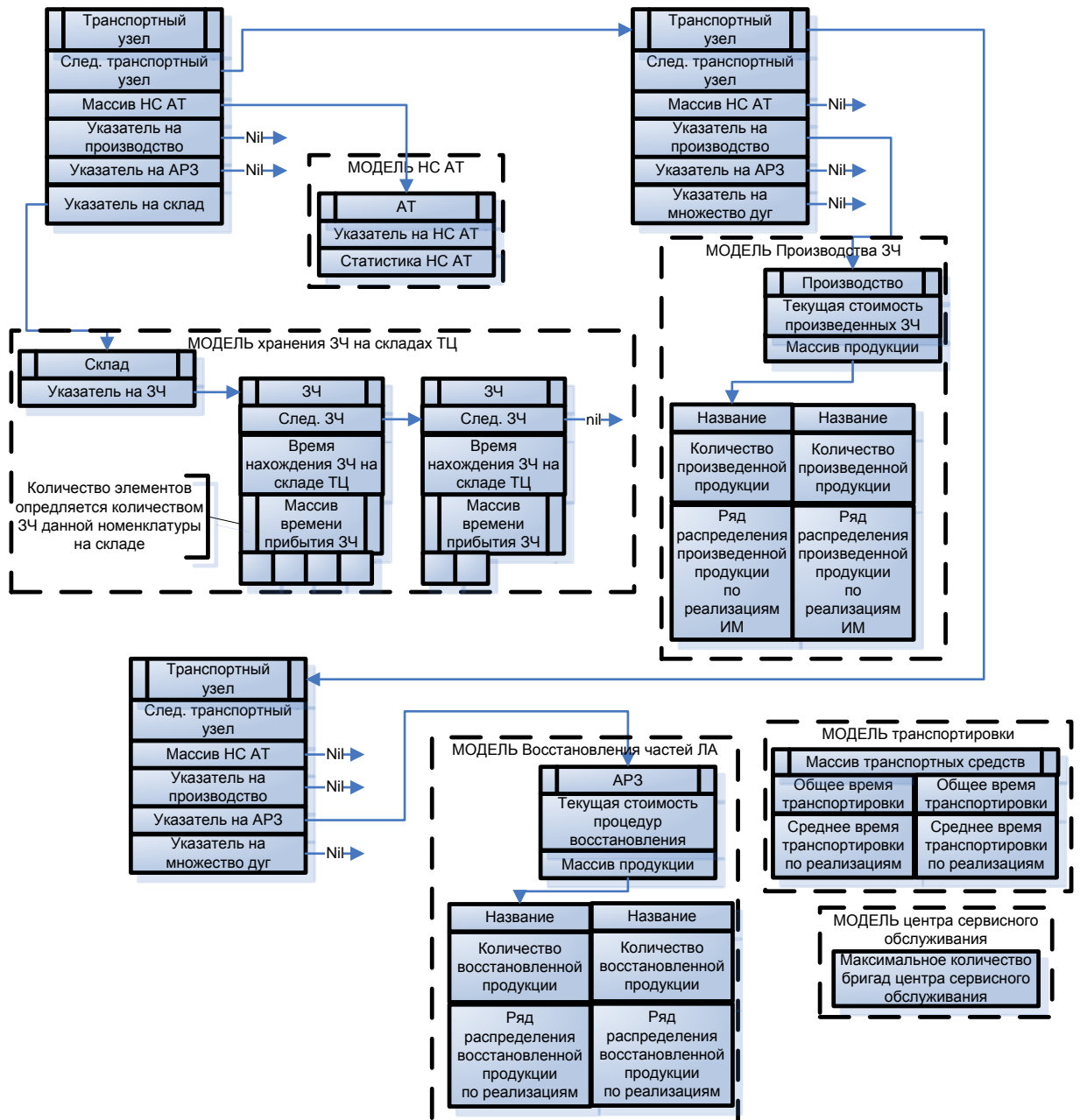


Рис 2.16. Структуры данных для сбора статистики по реализации КВИМ

2.7. Метод принятия решений в системе ППО АТ ВН

Задача принятия решений в рассматриваемой системе ППО АТ ВН является задачей с векторным критерием, состоящим из двух компонент, определяемых на плановом периоде реализации мероприятий ППО:

1. Критерий максимизируемый, характеризующий боеготовность обслуживаемой АТ:
 - среднее по парку обслуживаемой АТ математическое ожидание коэффициента готовности;
 - минимальный по парку обслуживаемой АТ коэффициент готовности;
2. Критерий минимизируемый: - среднее значение суммарных затрат на реализацию мероприятий ППО.

Это определяет необходимость применения методов векторной оптимизации решений, некоторые из них предполагают участие в принятии решений лица, принимающего решение (ЛПР). Невозможность применения данных методов на этапе имитационных исследований определяет необходимость разработки модели системы принятия решений (СППР).

Первая проблема, возникающая при работе с векторным критерием, это проблема его скаляризации. Ее решение может быть осуществлено разными подходами, среди которых наиболее известны следующие:

- Формирование некоторой свертки компонент векторного критерия (при этом наиболее часто применяется линейная свертка [30]),
- Построение функции предпочтения пользователя [8,21].

У каждого метода есть свои преимущества и недостатки. С точки зрения данной диссертационной работы этот вопрос не является основным.

Как показал системный анализ ППО, в системе ППО АТ ВН наиболее важными являются следующие решения:

1. Определение плана производства новых ЗЧ, взамен отказавших СЧ АТ, т.е. определение количества вновь изготовленных ЗЧ ПИ на плановом периоде по каждому типу ЗЧ и составление соответствующей заявки для ПИ;
2. Определение мест хранения вновь произведенных ЗЧ из множества территориально рассредоточенных складских центров;
3. Определение очередности восстановления на авиаремонтных предприятиях, отказавших СЧ АТ, допускающих реализацию процесса восстановления.

От этих решений зависят задержки в процессе ремонта отказавшей АТ, и, следовательно, эффективность функционирования обслуживаемой АТ, а также затраты на реализацию мероприятий МТО ППО (на изготовление, восстановление, хранение и транспортировку ЗЧ и отказавших СЧ АТ).

Для оптимизации решений по определению очередности восстановления ЗЧ предлагается использовать систему динамически переопределяемых в процессе функционирования системы МТО ППО приоритетов. Приоритет указывает на первоочередность восстановления, и устанавливается равным количеству хранимых ЗЧ данного типа на складах ТЦ (по правилу – меньшая величина – вперед).

Для остальных пунктов принимаемого решения необходимо определить количество новых ЗЧ каждого типа и склад ТЦ для размещения данных ЗЧ. Данная задача относится к классу динамических стохастических многокритериальных дискретных задач.

Вопросы динамичности процессов полностью описывает разработанный в данной работе КВИМ, а проблемы стохастичности решаются за счет уменьшения дисперсий оценок показателей КОРМ КВИМ путем реализации большого числа прогонов и возможности применения метода зависимых испытаний.

Проблемы многокритериальности решаются за счет применения соответствующих методов теории принятия решений: формирования из рассмотренных вариантов множества Паретто и скаляризации векторного критерия для вариантов указанного множества.

Проблемы дискретности решаются путем применения различных подходов перебора решений с целью поиска оптимального. Объем полного перебора при поиске рационального решения очень большой и определяется произведением количества видов рассматриваемых СЧ НС АТ, для которых производятся ЗЧ, на количество возможных величин объемов их производства и количества складов хранения произведенных ЗЧ. Поэтому разработка процедуры неявного перебора, значительно сокращающего объем перебора при поиске решения, является актуальной задачей разработанного метода принятия решений.

Совокупность типа ЗЧ и конкретного склада ТЦ определяет дискретное измерение, в котором изменяется необходимое к производству количество (определенного типа, которое необходимо перевезти на определенный склад ТЦ). В результате множество возможных решений лежит в n -мерном дискретном пространстве. Количество измерений пространства определяется произведением количества производимых ЗЧ на количество складов ТЦ. Каждая точка, имеющая n -мерный вектор координат, определяет конкретное

количество новых ЗЧ каждого типа, которое необходимо перевезти после производства на конкретный склад ТЦ. В данном пространстве имеется две целевые функции, отвечающие за каждый компонент векторного критерия. Для СППО АТ ВН количество АТ одного типа около 100 экземпляров, 30 АЧ. Также на размерность задачи влияет размерность рассматриваемой НС. В современной АТ ВН имеется более десятков миллионов различных элементов, блоков и агрегатов, но при этом ИМ НС имеет возможность масштабироваться и тем самым уменьшать количество элементов в ИМ НС. В большинстве случаев в качестве НС рассматривается не вся АТ, а только одна система или подсистема АТ, в таком случае размерность НС АТ может составлять сотни или тысячи элементов. При этом в СППО рассматривается только те ПИ и АРЗ, которые обеспечивают работоспособность рассматриваемой в НС СЧ АТ. Обычно для обеспечения работоспособности одной системы АТ имеется десятки АРЗ и ПИ, производящих различные компоненты рассматриваемой системы.

В общем случае задача оптимизации является безусловной, но имеется возможность установкой ЛПР ограничений на максимальное количество средств, потраченных на ППО и на минимальный коэффициент готовности парка АТ, который необходимо обеспечить.

2.7.1. Анализ возможных методов поиска рациональных решений.

В данном разделе рассматриваются переборные методы поиска рационального решения в многомерном дискретном пространстве, при условии его стохастичности и, как следствие, необходимости взаимодействия с КВИМ. Самым простым является алгоритм полного перебора, но его реализация невозможна из-за высокой размерности задачи.

Метод неявного перебора, основанный на стратегии локального поиска. [49]

Суть метода заключается в следующем, в пространстве оптимизационных переменных выбирается начальная точка. Далее формируется окрестность данной точки, в которой осуществляется перебор точек с целью поиска точки с лучшими значениями целевой функции. алгоритм повторяется для новой найденной точки. Недостатком данного алгоритма является необходимость рассмотрения всех точек из окрестности.

Метод имитации отжига. [38]

Алгоритм основывается на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества, в том числе при отжиге металлов. Данный алгоритм ищет глобальный максимум многомерной функции. Решение ищется последовательным перебором точек. На каждом шаге алгоритм вычисляет новую точку и понижает значение величины (изначально положительной), понимаемой как «температура». Алгоритм

останавливается при достижении точки, которая оказывается при температуре ноль. Так как на каждой итерации алгоритм находит новую точку, то имеется возможность получить значение критериев для данной точки из КВИМ.

В результате случайной модификации текущей точки получается множество точек, претендующих на то, что бы быть следующими точками в алгоритме. Вероятность того что каждая точка из множества станет следующей вычисляется в соответствии с распределением Гиббса:

$$P(x_{i+1}^*) = e^{-\frac{(F(x_{i+1}^*) - F(x_i))}{Q_i}}, F(x_{i+1}^*) - F(x_i) \geq 0$$

$$P(x_{i+1}^*) = 1, F(x_{i+1}^*) - F(x_i) < 0 \quad (2.8)$$

Где: x_{i+1}^* – точка «претендент»; x_i – текущая точка; $P(x_{i+1}^*)$ – вероятность того, что точка x_{i+1}^* станет следующей точкой; $F(x_{i+1}^*)$ – значение функции в точке «претенденте»; $F(x_i)$ – значение функции в текущей точке; $Q_i > 0$ – элементы произвольной убывающей, сходящейся к нулю положительной последовательности, которая задает аналог падающей температуры в кристалле.

Достоинством данного алгоритма является возможность присвоения вероятности точкам, что уменьшает общее количество перебираемых вариантов.

Алгоритм имитации отжига не гарантирует нахождения минимума функции, однако может существенно улучшить начальное значение функции, что дает возможность решения задач большой размерности.

Основным недостатком данного алгоритма является зависимость сходимости от выбранной убывающей последовательности. Данный алгоритм решает задачу условной оптимизации, так как необходимо определить последовательность Q .

Генетический алгоритм условной оптимизации с вещественным кодированием [38]

Целевая функция в данном алгоритме эквивалентна природному понятию приспособленности живого организма, а вектор параметров целевой функции называется «хромосомой» (отдельные его координаты – «гены»). Генетический алгоритм имитирует эволюцию начальной популяции как циклический итерационный процесс, во время которого к популяции применяются основные биологические операторы: Селекция, скрещивание и мутация. Алгоритм работает до тех пор, пока не выполнится условия окончания.

Генетический алгоритм состоит из последовательного выполнения следующих шагов:

1. Создание начальной популяции.
2. Вычисление функции приспособленности для каждой особи и для всей популяции в целом. Данные вычисления возможно проводить с помощью КВИМ. Функция приспособленности $\mu(x)$ особи (μ – функция приспособленности всей популяции) может быть любая функция, удовлетворяющая условиям:

$$\forall x_1 x_2 \text{ если } f(x_1) > f(x_2), \text{ то } \mu(x_1) > \mu(x_2)$$

Если функция приспособленности популяции удовлетворяет всем ограничениям, то переходим к шагу 6.

3. Селекция – это операция, которая осуществляет отбор хромосом в соответствии со значением функции приспособленности для их последующего скрещивания. Вероятность участия в скрещивании обычно пропорциональна относительной приспособленности особи – $\frac{\mu(x_1)}{\mu}$. различают следующие виды селекции: Случайный равновероятный отбор, Рулетка, Турнирный отбор и др.
4. Скрещивание – это операция, при которой из нескольких хромосом, называемых родителями, порождается одна или более новых. Виды скрещиваний: Плоский кроссовер, Простейший кроссовер, Арифметический кроссовер и др.
5. В результате выполнения процедур селекции и скрещивания получается новая популяция хромосом. После этого осуществляется переход к шагу 2.
6. Определение особи, имеющую наилучшее значение функции приспособленности.

Достоинством данного алгоритма является возможность рассмотрения не всего решения целиком, а выделения его отдельных компонент. Также к достоинствам алгоритма можно отнести возможность задания начальной популяции близкой к оптимальному решению. Недостатком же является необходимость задания функции приспособленности, что в случае наличия векторного критерия сильно затруднено.

Многоагентные алгоритмы.

Многоагентные (или мультиагентные) системы [31,32] – это системы, состоящие из автономных интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом и пассивной среды, в которой агенты находятся и на которую могут воздействовать. В настоящее время в области планирования и управления ресурсами широко применяется данный

подход, так как он позволяет децентрализовать функцию управления, разделив задачи управления между сущностями системы.

Достоинствами данных методов является простота разработки и верификации отдельных сущностей. Недостатком многоагентных систем является трудоемкость формализации разрабатываемой системы из-за множества различных моделей для каждой сущности, а так же, в большинстве случаев, отсутствие математических моделей многоагентных систем. Для устранения недостатков прибегают к созданию однотипных простейших агентов.

Среди многоагентных алгоритмов выделим метаэвристические алгоритмы. Метаэвристические (от англ. metaheuristic, meta — «за пределами» и heuristic — «найти») алгоритмы представляют собой алгоритмы, не имеющие в большинстве случаев строгого доказательства сходимости, но опирающиеся на естественные правила выбора, существующие в объектах живой и неживой природы. Среди метаэвристических алгоритмов следует отметить метод муравьиных колоний, метод пчелиного роя и д.р [38].

Метод пчелиного роя

Метод пчелиного роя [31] основан на поведении пчел при выборе области с наибольшей концентрацией пищи. В математическом описании данного алгоритма концентрация пищи задается значением целевой функции. Позиция агента (пчелы) является координатами в исследуемом пространстве. Одновременно в пространстве перемещается множество агентов (пчел).

При перемещении каждого агента определяется значение целевой функции (имеется возможность получить значения критериев из КВИМ) в каждой позиции агента, из которых выбирается персональная наилучшая позиция. Среди персональных наилучших позиций определяется глобальная наилучшая позиция, информация о которой имеется у всех агентов.

В начале работы алгоритма определяется область поиска (условная оптимизация), на данной области равномерно располагаются агенты. Далее для каждого агента выполняется процедура перемещения в новое положение в соответствии с ее скоростью (по каждой координате) и определяется значение целевой функции в новой позиции агента. Происходит переоценка персональной и глобальной наилучших позиций.

После перемещения всех агентов вычисляется новая скорость перемещения в соответствии с формулой:

$$v_n^{i+1} = w * v_n^i + c_1 * \Psi_1 * (p_n - x_n) + c_2 * \Psi_2 * (g_n - x_n) \quad (2.9)$$

Где v_n^{i+1} и v_n^i – скорость агента в измерении n на $i+1$ -ой и i -ой итерации соответственно; w – инерционный вес $(0, 1)$ отражает, в какой мере частица сохраняет свою первоначальную скорость; x_n – координата агента в измерении n ; p_n и g_n – координата в измерении n для персональной и глобальной наилучших позиций соответственно; Ψ_1 и Ψ_2 – случайная величина $[-1, 1]$; c_1 и c_2 – весовые коэффициенты $(0, 1)$, определяющие притяжение к персональной и глобальной наилучшей позиции соответственно.

После определения скорости проверяется критерий остановки алгоритма, заключающийся в концентрации всех агентов в одной области. Алгоритм продолжает работу с перемещения агентов в соответствии с их скоростями.

Основные модификации алгоритма пчелиного роя заключаются в определении поведения агентов при достижении границ допустимой области и поведении агентов при попадании на один и тот же участок.

К достоинствам данного алгоритма можно отнести необходимость задания только весовых коэффициентов, а не целой функции. Недостатком же является невозможность установки распределения агентов в области рационального решения, что в результате приводит к ненужным прогонам КВИМ.

Метод муравьиных колоний

Метод муравьиных колоний [31,32,63,64] основан на поведении муравьев при поиске пути от муравейника к источнику пищи. Все муравьи действуют по одному алгоритму поиска пути, который основан на оставляемом пахучем следе. В силу случайного перемещения и большого количества, муравьи постепенно уменьшают длину искомого пути, приближая его к оптимальному.

Оригинальный метод муравьиных колоний (antcolonyoptimization, ACO), предложенный итальянским исследователем Марко Дориго (MarcoDorigo) в 1992 разработан для определения гамильтонова пути на графе. Идея метода состоит в осуществлении процедуры перебора путем реализации стохастически направленного движения агентов (муравьев) по дугам рассматриваемого графа с постоянной переоценкой приоритетов дуг для выбора направления движения муравьев.

Выбор следующей вершины маршрута агентом («муравьем» (ant) – в оригинальном алгоритме) определяется значением «веса» («феромона»(pheromone trails) – в оригинальном алгоритме) на дугах, выходящих из данной вершины. Определение происходит путем вероятностного выбора дуги (вероятность зависит от «веса» дуги). Так

же на выбор агентом дуги влияет и ее длина. Формула (оригинального алгоритма), по которой вычисляется вероятность прохождения дуги муравьем:

$$P_{ij,k}(t) = \frac{\tau_{ij}^{\alpha}(t) * \mu_{ij}^{\beta}(t)}{\sum_{l \in J_{i,k}} (\tau_{il}^{\alpha}(t) * \mu_{il}^{\beta}(t))}, j \in J_{i,k}$$

$$P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k}, \quad (2.10)$$

где i – вершина, в которой находится агент; t – момент времени, в который агент пришел в вершину i ; j – следующая на пути агента вершина; k – номер агента; $J_{i,k}$ – множество вершин, в которые агент номер k может попасть из вершины i ; $\tau_{ij}(t)$ – «вес» дуги $i-j$ в момент времени t ; μ_{ij} – длина дуги $i-j$; α – коэффициент «веса»; β – коэффициент длины; $0 \leq P_{ij,k}(t) \leq 1$.

После нахождения пути всеми агентами происходит увеличение «веса» дуг графа в зависимости от найденных путей: Для каждой дуги, пройденной агентом происходит изменение количества «веса» по формуле:

$$\Delta \tau_{ij,k}(t) = \frac{Q}{L_k(t)}, (i, j) \in T_k(t),$$

$$\Delta \tau_{ij,k}(t) = 0, (i, j) \notin T_k(t), \quad (2.11)$$

где $\Delta \tau_{ij,k}(t)$ – изменение феромона на дуге $i-j$; Q – максимальный «вес» у агента («вес», который добавляется на все дуги в случае маршрута единичной длины); $L_k(t)$ – длина пройденного k -м агентом пути; $T_k(t)$ – набор дуг, пройденных k -м агентом.

После увеличения веса всеми агентами происходит уменьшение «веса» каждой дуги («испарение феромонов» (pheromone evaporation)):

$$\tau_{ij}(t+1) = p * (\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij,k}(t)), \quad (2.12)$$

где $\tau_{ij}(t)$ – текущий «вес» на дуге $i-j$; p – коэффициент уменьшения «веса» ($0 \leq p \leq 1$); $\sum \Delta \tau_{ij,k}(t)$ – общий «вес», который добавили агенты на дугу $i-j$ на текущей итерации.

В результате последовательного выполнения данных процедур изменяется состояние графа. Одновременно по графу перемещается группа из заранее заданного числа агентов. Изменение состояния графа происходит только после окончания перемещения всех агентов из группы.

Занесение феромонов на граф осуществляется всеми агентами из группы в равной степени. Но существуют алгоритмы, когда среди группы агентов приоритет отдается лучшим агентам, например, элитный ММК и ранжированный ММК. [26,33,34,36,37,57] В элитном ММК агент, прошедший оптимальный, т.е. с минимальной длиной пути

маршрут увеличивает «вес» всех дуг в 2 (или более) раза больше положенного, тем самым оптимальные маршруты выделяются более эффективно. Параметр, определяющий во сколько раз увеличить количество «веса», заносимое агентом, определяется в виде параметра алгоритма. В ранжированном ММК агенты сортируются в порядке увеличения длины пройденного пути и увеличивают «веса» дуг в соответствии со своим местом. Агент, который занял первое место (прошел самый рациональный путь) заносит «вес» в 2 (или более) раз больше чем должен. Для агента, нашедшего менее рациональный маршрут (занявший второе место) параметр уменьшается на 1. Уменьшение параметра осуществляется до тех пор, пока он не станет равным одному.

Остановка работы ММК осуществляется по выполнению заданного количества итераций.

Достоинствами данного алгоритма являются: малое количество параметров данного алгоритма и возможность установки агентов в область, близкой к оптимальному решению.

2.7.2.Метод муравьиных колоний с ограниченным числом итераций в СППР ППО АТ ВН.

Приведенные выше алгоритмы осуществляют поиск рациональных (оптимальных) решений в n-мерном пространстве на графе или перебора вариантов путем их представления в виде массива значений. Дискретное пространство можно представить в виде графа, где каждому измерению соответствует слой вершин, а каждой вершине графа – конкретное значение количества ЗЧ. Тогда точка в n-мерном пространстве будет представлена определенным путем в данном графе. Такой граф назовем графом «решений» (ГР).

В данной работе предлагается использовать метод муравьиных колоний. Данный алгоритм осуществляет дискретный перебор вариантов. Алгоритм легко работает с задачами большой размерности в силу разделения общего решения на отдельные составные компоненты. При этом в алгоритме муравьиных колоний имеется возможность занесения начальной информации о распределении потребностях в ЗЧ на ГР. Данная информация позволяет агентам начинать поиск из области рациональных решений. Генетический алгоритм был отброшен из-за сложности в задании функции приспособленности, которая должна зависеть от 2-х факторов.

Для принятия решений по указанным в пункте 2.7. вопросам 1 и 2 предлагается использовать метод, специально разработанный для этой цели в диссертационной работе.

Данный метод основан на совместном использовании в итеративной процедуре формирования решения следующих составных частей:

- результатов имитационных экспериментов с КВИМ системы ППО АТ ВН;
- формируемого на этой основе специального ГР;
- мультиагентного подхода в виде метода муравьиных колоний (ММК) для формирования рациональных решений;

Для поиска рациональных решений с помощью ММК в системе ППО АТ ВН формируется специальный ГР для организации движения по этому графу агентов. «Решение» - это есть выбор для каждой ЗЧ количества производства и ее размещения. Эти два показателя определяют элемент решения, а значение каждого элемента является точкой (вершиной) на ГР. Точки для определенного типа ЗЧ и склада ТЦ, на котором предполагается хранение ЗЧ, объединяются в отдельный «слой». Последовательность расположения слоев в ГР - произвольное. При этом точки соседних слоев соединяются дугами. В результате маршрут последовательного перехода по всем слоям идентифицирует одно «решение».

Как только такое решение сформировано, оно вводится в КВИМ. Реализуется множество прогонов КВИМ с этим решением, получают оценки показателей указанного выше векторного критерия для системы ППО АТ ВН. Полученные значения используются в соответствии с ММК для переоценки «весов» ГР. В отличие от оригинального ММК «веса» для движения агентов предлагается присваивать (а в дальнейшем переоценивать) для сформированных вершин ГР. В соответствии с новыми значениями «весов» реализуется движение следующей группы агентов по ГР.

Для работы ММК необходима начальная вершина, из которой будут выходить агенты. В оригинальном алгоритме начальной вершиной является любая вершина графа, так как необходимо определить гамильтонов путь, т.е. посетить все вершины графа. Для задач, когда начальная вершина однозначно не определена и может быть выбрана из множества возможных начальных вершин, алгоритм муравьиных колоний необходимо модифицировать [47].

В результате на ГР добавим «фиктивные» вершины, с которых будут стартовать агенты. «Фиктивная» вершина соединяется дугой с каждой вершиной первого слоя ГР. После нахождения решения вершина, в которую агент переместиться из «фиктивная», будет начальной вершиной для данного агента.[47]

Так как ММК является стохастическим и зависит от различных параметров: максимально «веса» у агента, коэффициента испарения, количества агентов в группе и т.д.

то необходимо определить набор параметров, обеспечивающих максимальную скорость сходимости найденного решения к оптимальному. Данные исследования подробно изложены в работах [37, 47]. Для СППР ППО АТ ВН результаты данных исследований приведены в 4-ой главе.

Алгоритм муравьиных колоний приведен на рис 2.17 и 2.18.

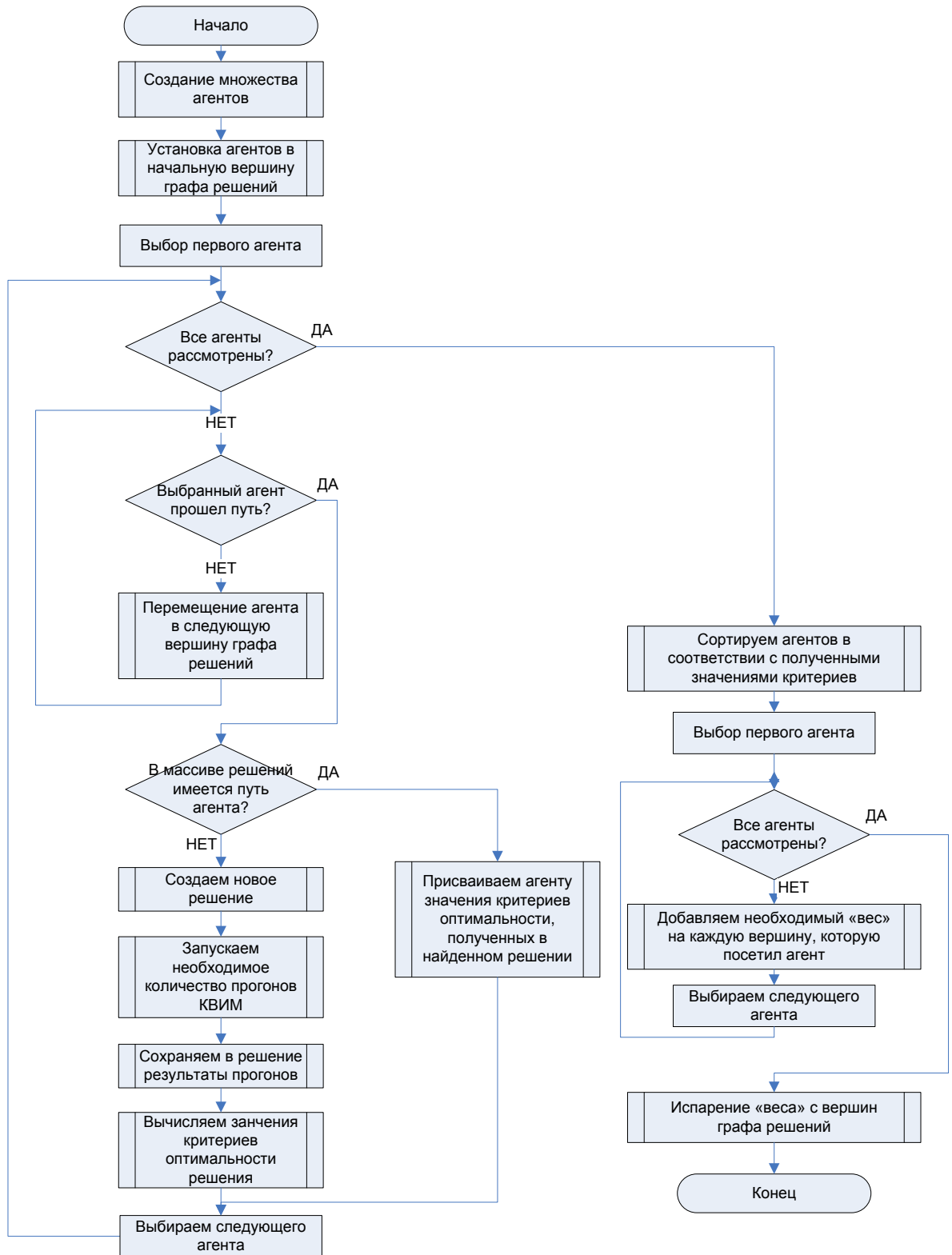


Рис 2.17. Алгоритм муравьиных колоний для СППР ППО АТ ВН

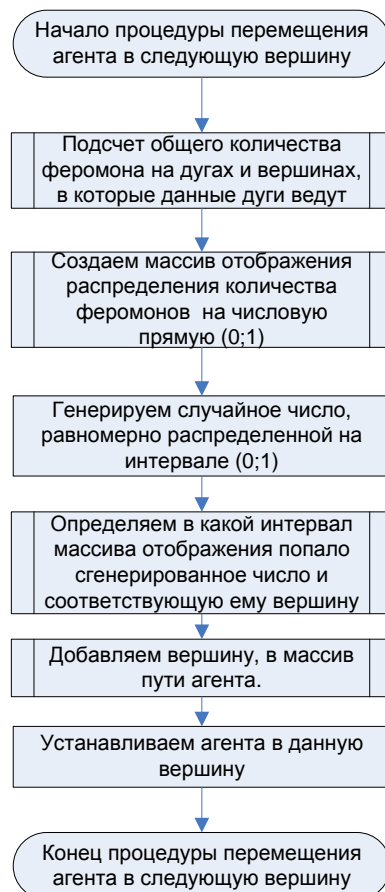


Рис 2.18. Алгоритм перемещения агента

Множество возможных вершин ГР и первоначальные «веса» этих вершин перед началом работы ММК предлагается формировать на основе прогонов КВИМ в предположении о неограниченном наличии ЗЧ в системе МТО ППО.

Для этого разработана процедура вычисления ряда распределения необходимого количества производства ЗЧ каждой типа. Данная процедура запускается для каждого экземпляра АТ в системе МТО ППО, тем самым вычисляя потребности АТ в ЗЧ. Для работы данной процедуры собираются статистика по количеству отказов (ArrayHistKolFailure) каждой СЧ АТ в виде массива. Каждый элемент массива соответствует количеству отказов данной СЧ АТ за время моделирования, а значение массива в данной ячейке показывает в каком количестве реализаций КВИМ произошло данное число отказов. На основе данного массива вычисляется потребность ТА в ЗЧ. После определения потребности в ЗЧ для каждого экземпляра АТ вычисляется потребность ЗЧ для каждой АЧ. Алгоритм вычисления потребности ЗЧ для АЧ представлен на рис 2.19.

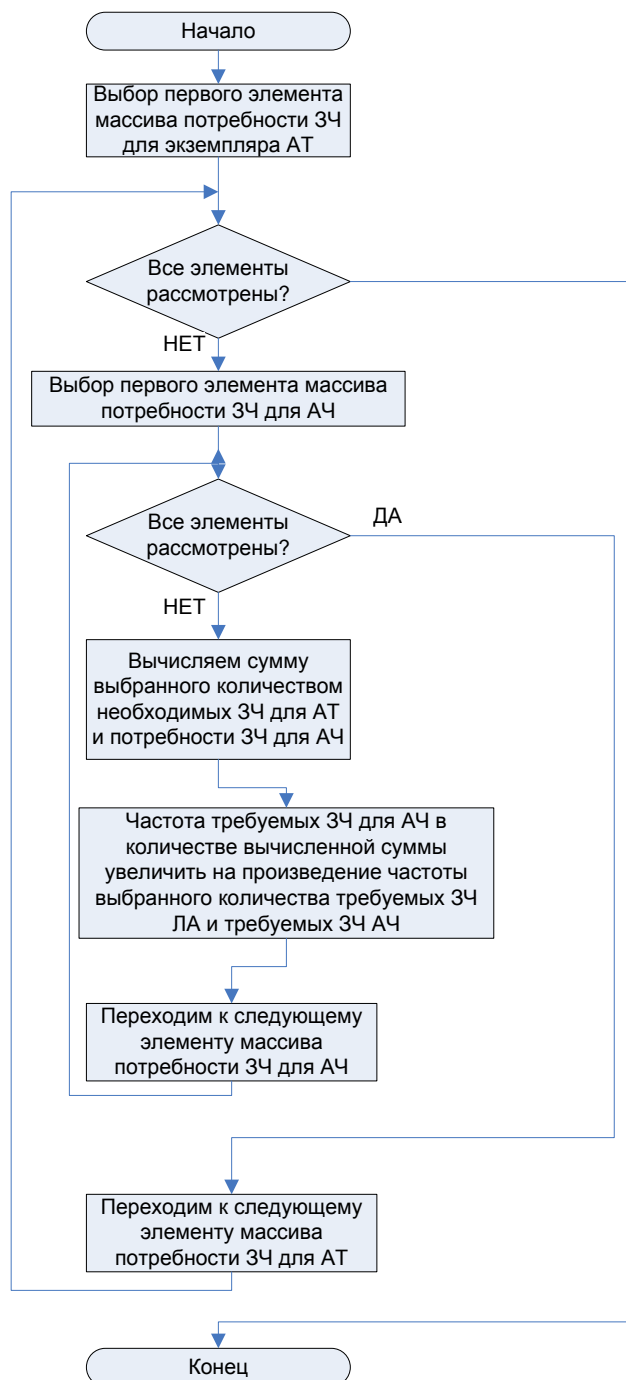


Рис 2.19. Алгоритм вычисления ряда распределения потребности ЗЧ для АЧ

Данный алгоритм (рис 2.19.) запускается для каждого экземпляра АТ, входящего в состав АЧ. В результате вычисляется ряд распределения (в виде массива) потребности в ЗЧ для АЧ.

Размещение ЗЧ по складам ТЦ осуществляется в зависимости от потребности АЧ в различном количестве ЗЧ. При размещении ЗЧ по складам ТЦ будем руководствоваться правилом: ЗЧ, которая требуется для замены СЧ АТ с наибольшим количеством отказов расположим как можно ближе к АЧ для минимизации времени доставки ЗЧ в случае

отказа.[35] Максимальное объем для складирования требуемых ЗЧ данного типа для одной АЧ примем максимальному значению количества потребности ЗЧ помноженному на объем склада, занимаемой одной ЗЧ данного типа. После вычисления объема склада, который требуется для размещения максимального количества данных ЗЧ определяется ближайший склад ТЦ, на котором имеется достаточный объем.

ГР формируется на основе вычисленных объемов потребности ЗЧ, а также их размещения (рис 2.21) и состоит из вершин хранящих следующую структуру данных (таблица 2.37):

Таблица 2.37.

Element	Указатель на слой ГР
Value	Значение количества ЗЧ
Pheromon1,Pheromon2	«Вес» вершины (параметры для работы алгоритма муравьиных колоний), отдельный для двух критериев.
Arc	Указатель на список дуг, соединяющих данную вершину с вершинами следующего слоя
NextKol	Указатель на следующее значение вершину в данном слое ГР

Слой ГР состоит из двух структур данных, определяющих склад ТЦ (таблица 2.38), на который необходимо транспортировать ЗЧ после ее производства и тип ЗЧ (таблица 2.39).

1. «Склад ТЦ». Данная структура данных отображает конкретный склад технического центра.

Таблица 2.38.

TransportNode	Указатель на вершину в транспортной сети (ИМ транспортировки), соответствующую данному складу.
FirstElementSklad	Указатель на первый элемент списка ЗЧ на данном складе
NextSklad,LastSklad	Указатели для организации двунаправленного списка складов
KolElement	Количество наименований ЗЧ на данном складе

Для работы с данной структурой данных имеются процедуры добавления и поиска ЗЧ на складе.

2. «Тип ЗЧ». Данная структура данных отображает ЗЧ, хранение которой предполагается на складе. В данной вершине не хранится конкретное количество ЗЧ (оно может равняться 0).

Таблица 2.39.

Name	Название ЗЧ
Sklad	Указатель на вершину «Склад», которой ЗЧ принадлежит
NextElement,LastElement	Указатели для организации двунаправленного списка ЗЧ на складе
Kol	Указатель на вершины графа «решений», принадлежащих данному слою.

Схематичное представление ГР приведено на рис 2.20.

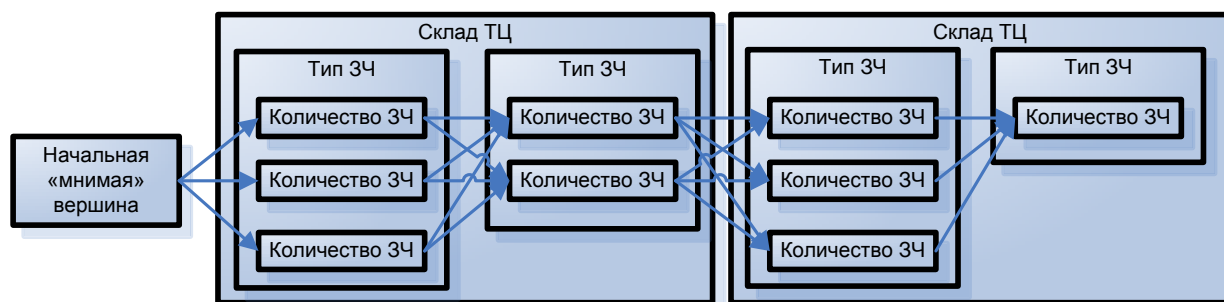


Рис 2.20. Структура графа решений для работы ММК.

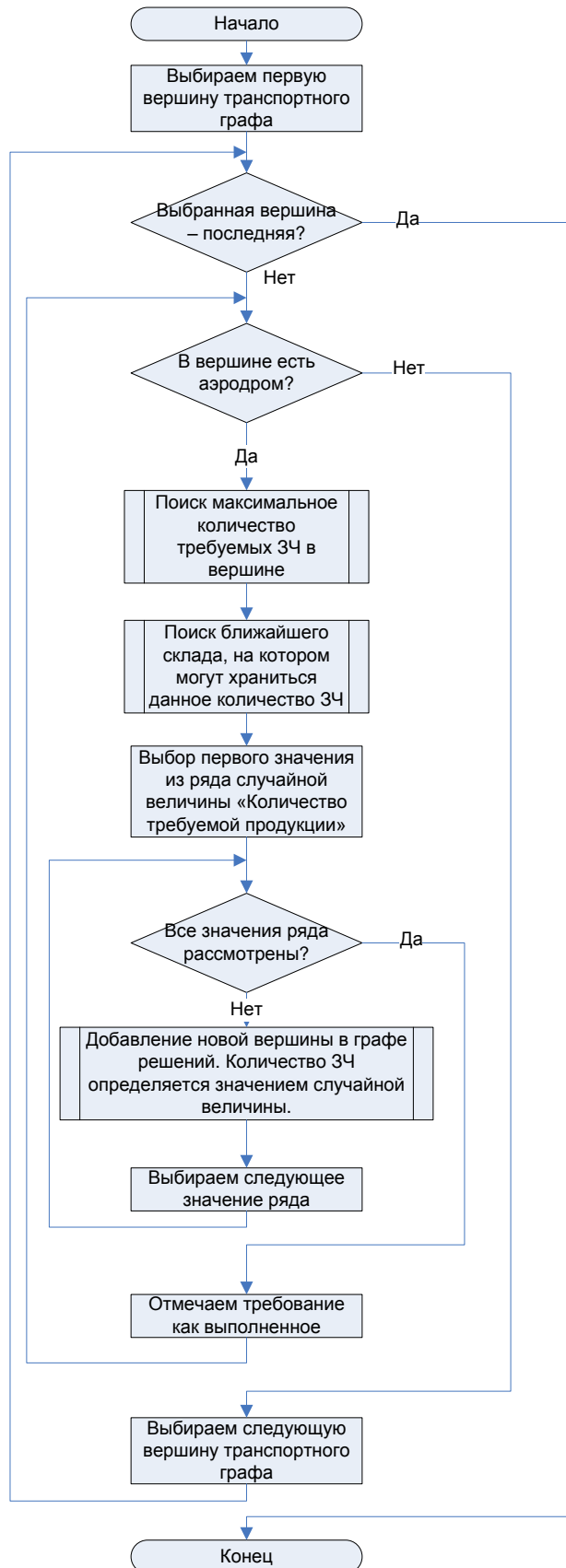


Рис 2.21. Алгоритм построения ГР.

Вероятности рядов распределения требуемых ЗЧ для каждой АЧ определяют начальные значения «весов» вершин графа «решений».

Так как в системе имеется векторный критерий, состоящий из двух скалярных величин, то имеется два различных значения «веса» для каждой вершины. В результате прохождения агентом пути происходит переоценка «весов» вершин, через которые прошел агент. Для переоценки «веса» вершин воспользуемся формулами:

1. Для «веса» вершины, отвечающего за коэффициент готовности парка АТ

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{1,i,k}(t) &= \frac{Q1}{1 - M(K2)}, i \in T_k(t), \\ \Delta\tau_{1,i,k}(t) &= 0, i \notin T_k(t),\end{aligned}\quad (2.13)$$

где $M(K2)$ – математическое ожидание коэффициента готовности парка АТ; $Q1$ – максимальный «вес»; $\Delta\tau_{1,i,k}(t)$ – изменение «веса» вершины i ; $T_k(t)$ – набор вершин ГР, посещенных агентом k .

2. Для «веса» вершины, отвечающего за стоимость МТО ППО АТ

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{2,i,k}(t) &= \frac{Q2}{Kst}, i \in T_k(t), \\ \Delta\tau_{2,i,k}(t) &= 0, i \notin T_k(t),\end{aligned}\quad (2.14)$$

где $\Delta\tau_{2,i,k}(t)$ – изменение «веса» вершины i ; $Q2$ – максимальный «вес»; Kst – стоимость мероприятий МТО ППО АТ; $T_k(t)$ – набор вершин ГР, посещенных агентом k .

Для работы алгоритма муравьиных колоний при условии 2-х различных «весов» у вершин графа решений создаются различные агенты:

1. Агенты, у которых выбор следующей вершины (а в результате и маршрута в целом) определяется одним типом «веса» (коэффициентом готовности или стоимостью ППО):

$$P_{i,k}(t) = \frac{\tau_i(t)}{\sum_{l \in J_k} (\tau_l(t))} \quad (2.15)$$

где $\tau_i(t)$ – «вес» (τ^1 или τ^2) в i -ой вершине ГР в момент времени t .

2. Агенты, у которых выбор следующей вершины определяется взвешенной суммой «весов» в вершинах графа решений:

$$P_{i,k}(t) = \frac{\tau_i(t)}{\sum_{l \in J_k} (\tau_l(t))} \quad (2.16)$$

где $\tau_i(t)$ – взвешенная сумма «весов» в i -ой вершине ГР в момент времени t :

$$\tau_i(t) = \alpha * \tau_{1_i} + (1 - \alpha) * \tau_{2_i}$$

3. Агенты, выбирающие путь одновременно по двум значениям «весов». Для данных агентов проводится раздельное (для каждого «веса») определение следующей вершины ГР по обычным правилам. Если полученные вершины не совпадают процедура повторяется пока не будет выбрана одна вершина ГР.

Так как алгоритм сразу начинает из области рациональных решений (за счет неравномерного первоначального занесения «весов» на вершины ГР), то в течение своей работы алгоритм вырабатывает множество рациональных решений, некоторые из которых могут превосходить начальное решение.

В результате для поиска рационального решения проводится определенное (заданное пользователем) множество прогонов ММК. Из множества решений, полученных в результате прогонов ММК выбираются решения, входящие в множество Паретто по векторному критерию. [27] В данном множестве окажутся решения, которые обеспечивают наиболее рациональные траты средств МТО ППО для обеспечения максимального коэффициента готовности парка АТ. Из решений области Паретто могут быть выбраны решения, имеющие максимальное значение скалярного критерия, например, критерия «Эффективность – стоимость».

Для работы ММК рекомендуется задавать следующие параметры (обоснование данного выбора имеется в главе 4):

1. Количество агентов в группе равно количеству экземпляров АТ в системе МТО ППО. Данный параметр позволит активнее изменять состояние ГР.
2. Максимальный «вес» у каждого агента выбирать равным 1.
3. Коэффициент испарения выбирать равным (0,9; 0,8). Высокое значение данного параметра позволяет работать с малочисленными группами агентов.

Если необходимо выработать стратегию МТО ППО АТ на период, включающий несколько различных поставок ЗЧ, то проводится последовательный выбор решения для каждой поставки ЗЧ.

Для работы СППР рекомендуется применение «Ранжированного ММК» с коэффициентом ранга 3. При определении агентом одной из вершин ГР происходит вероятностное отображение необходимых «весов» путем их нормализации. При процедуре нормализации абсолютная величина «веса» вершины не имеет значения.

Следовательно, параметр «максимальный вес у агента» (Q), который изменяет абсолютную величину «веса», не влияет на вероятность выбора агентом соответствующей вершины ГР. При нормализации определяется относительная разница в «весовых» параметрах вершин. Для увеличения разницы между близкими по значению критериями «коэффициент готовности» применим «Элитный ММК», так как он выделяет наилучшее решение.

Алгоритм работы СППР приведен на рис 2.22 и 2.23:

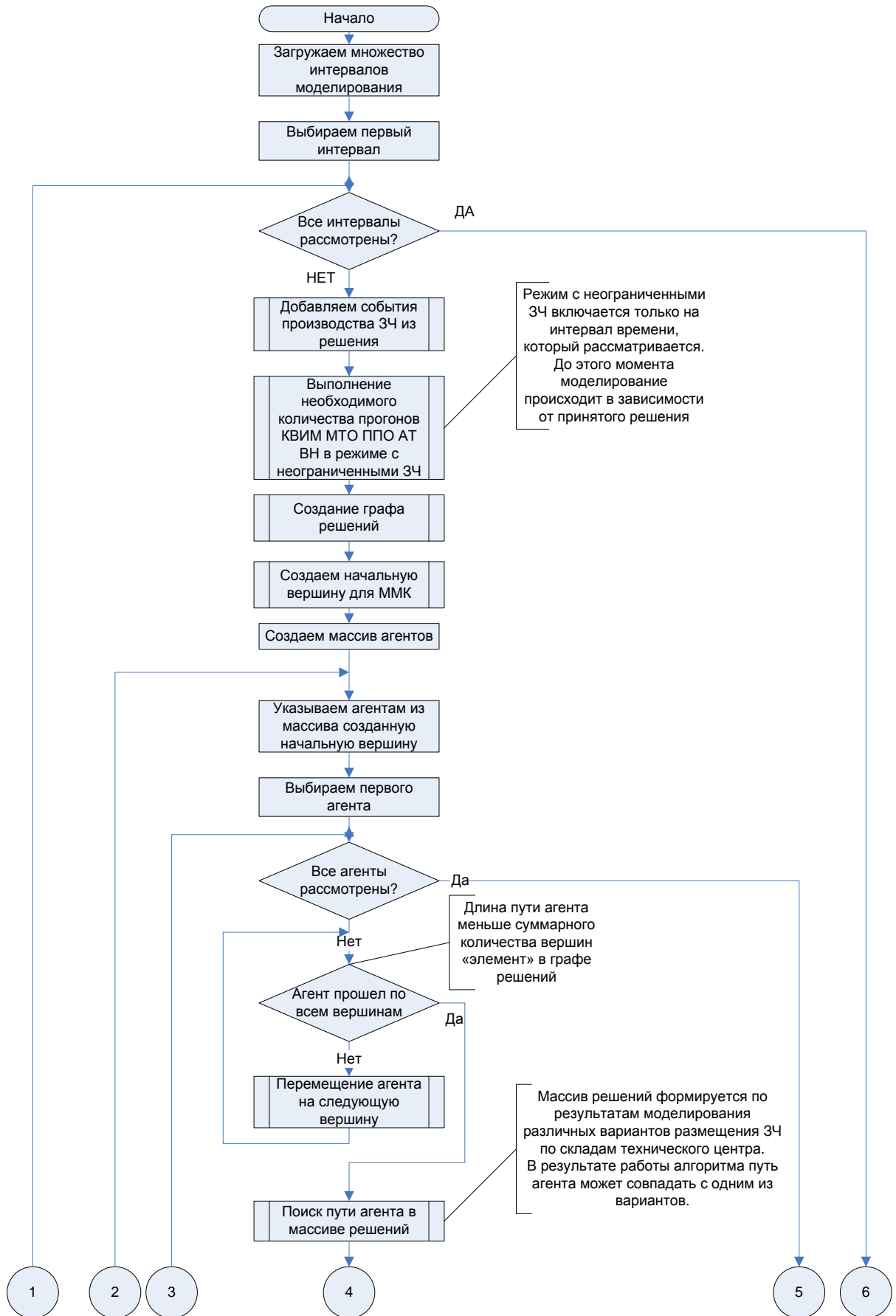


Рис 2.22 (начало). Алгоритм работы СПАР

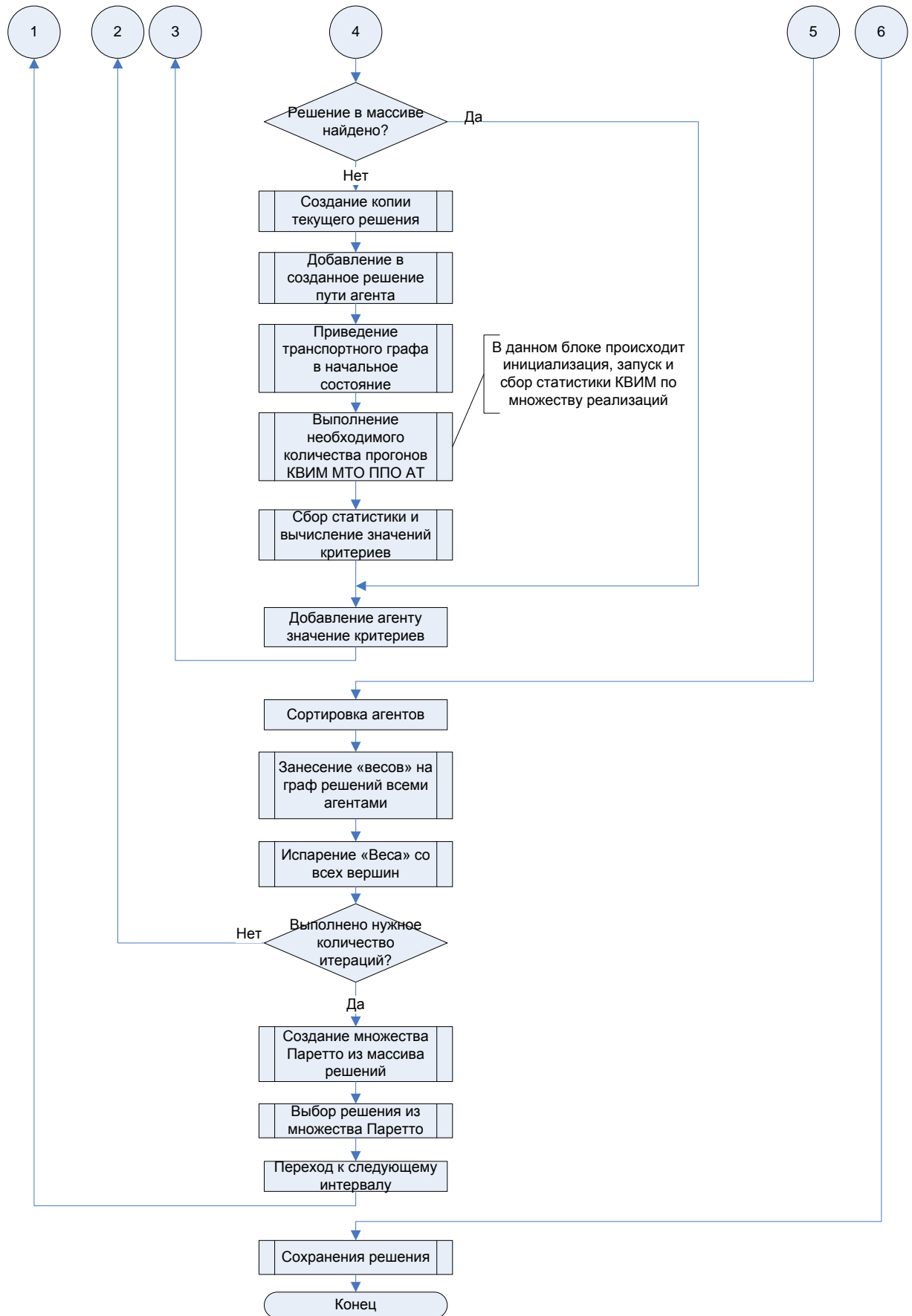


Рис 2.22 (конец). Алгоритм работы СППР

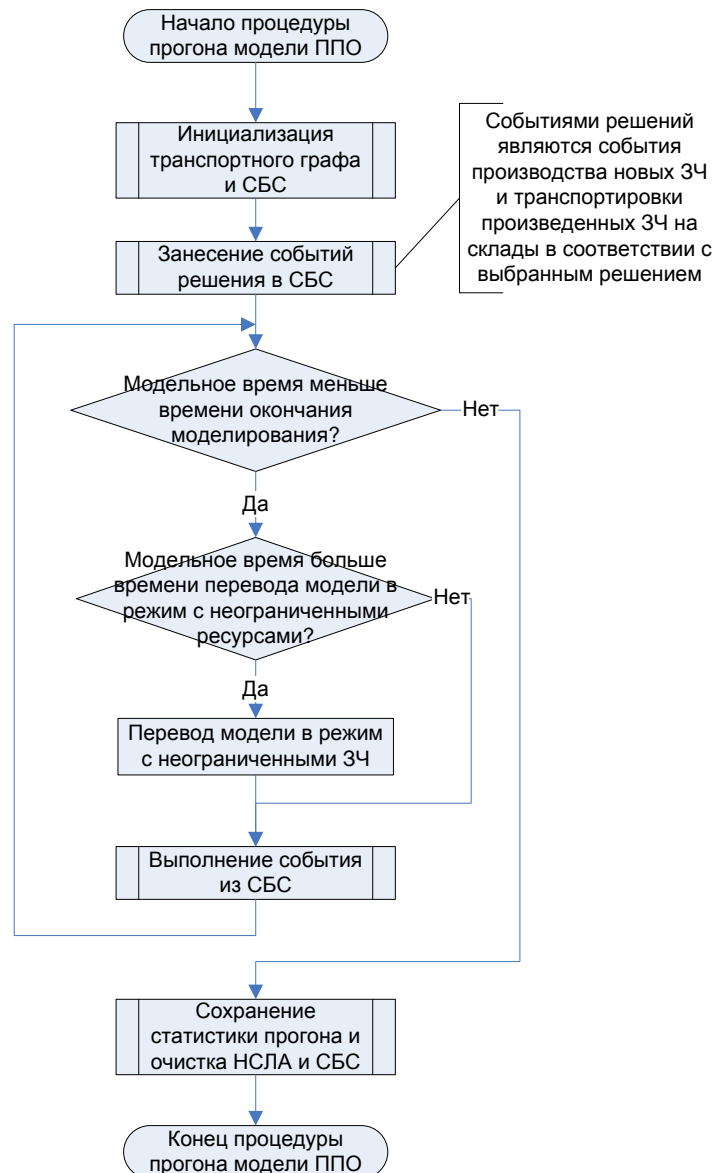


Рис 2.23. Алгоритм процедуры выполнения прогона КВИМ в СППР

2.7.3. Применение ММК с установленными завершающими условиями в СППР МТО ППО АТ ВН.

Для определения момента остановки алгоритма в данной работе предлагается использовать завершающие условия. Завершающие условия устанавливаются на критерии: стоимость мероприятий МТО ППО, математическое ожидание минимального, максимального и среднего по парку АТ коэффициента готовности.

Завершающие условия задаются при запуске ММК и определяют решение, при котором ММК прекратит работу. В результате эффективность найденного решения, в процессе работы, ММК определяется разностью между значениями критериев решениями и значениями завершающих условий. Решение считается подходящим под условия

завершения, если его оценка математического ожидания стоимости меньше завершающего условия, отвечающего за стоимость МТО ППО, а соответствующие значения оценок математических ожиданий критериев готовности больше установленных значений завершающих условий для коэффициентов готовности парка АТ. В процессе работы ММК возможно нахождение решений, удовлетворяющих только одному из завершающих условий. В результате изменятся формулы увеличения «веса» вершин:

1. Для «веса» вершины, отвечающего за коэффициент готовности парка АТ:

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{1,i,k}(t) &= \frac{Q1}{Lim_Kz - M(Kz)}, Lim_Kz > M(Kz), i \in T_k(t), \\ \Delta\tau_{1,i,k}(t) &= Q1 * C_1 * (M(Kz) - Lim_Kz), Lim_Kz \leq M(Kz), i \in T_k(t), \\ \Delta\tau_{1,i,k}(t) &= 0, i \notin T_k(t),\end{aligned}\tag{2.17}$$

Где Lim_Kz – завершающее условие, отвечающее за значение критерия «коэффициент готовности»; $M(Kz)$ – математическое ожидание коэффициента готовности парка АТ; $Q1$ – максимальный «вес»; C_1 – коэффициент увеличения «веса» в случае если значение критерия находится в области допустимых значений. $\Delta\tau_{1,i,k}(t)$ – изменение «веса» вершины i ; $T_k(t)$ – набор вершин ГР, посещенных агентом k .

2. Для «веса» вершины, отвечающего за стоимость МТО ППО АТ:

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{2,i,k}(t) &= \frac{Q2}{\sqrt{Lim_Kst - Kst}}, Lim_Kst > Kst, i \in T_k(t), \\ \Delta\tau_{2,i,k}(t) &= Q2 * \sqrt{Kst - Lim_Kst}, Lim_Kst < Kst, i \in T_k(t), \\ \Delta\tau_{2,i,k}(t) &= 0, i \notin T_k(t),\end{aligned}\tag{2.18}$$

где Lim_Kst – завершающее условие, отвечающее за значение критерия «стоимость»; $\Delta\tau_{2,i,k}(t)$ – изменение «веса» вершины i ; $Q2$ – максимальный «вес»; Kst – стоимость мероприятий МТО ППО АТ; $T_k(t)$ – набор вершин ГР, посещенных агентом k .

Алгоритм работы СППР при использовании ММК с установленными завершающими значениями отличается от приведенного на рисунке 2.22 отсутствием процедур создания множества Паретто и выбора решения из множества Паретто (в новом алгоритме первое решение, удовлетворяющее всем завершающим условиям, считается выбранным) и измененном условии остановки работы ММК (вместо счетчика необходима проверка условия удовлетворение найденных агентами решений всем завершающим условиям).

2.7.4. Реализация системы поддержки решений в системе МТО ППО АТ ВН с участием ЛПР.

Кроме представленных выше алгоритмов в СППР имеется возможность взаимодействия с ЛПР для выработки решений с учетом его предпочтений. Для работы с ЛПР реализуются различные подходы к решению проблемы многокритериальности:

1. Формирование множества Паретто. По результатам определенного количества запусков ММК определяется множество различных решений. Из данных решений выбираются решения, входящие в область Паретто. Для удобства выбора решений ЛПР из данного множества область Паретто графически визуализируется и имеется возможность выбора решений с помощью обобщенного критерия: критерия «эффективность-стоимость», взвешенная сумма критериев и др..
2. Формирование функции предпочтений. Перед началом запуска СППР ЛПР определяет весовые характеристики для каждого критерия. Данные весовые критерии используются для свертки векторного критерия в скалярный и дальнейшая оптимизации процессов МТО ППО с целью увеличения скалярного критерия.
3. Формирование завершающих условий. Перед началом запуска СППР ЛПР устанавливает значения критериев (завершающие условия), при достижении или улучшении которых ММК завершит работу.

Для оценки принятого решения имеются различные системы визуализации результатов:

1. Визуализация процесса функционирования системы МТО ППО АТ. Данная визуализация позволяет определить «узкие места» в процессе ТО, восстановления работоспособности АТ, хранения, восстановления и производства ЗЧ.
2. Визуализация процессов потребности в ЗЧ для каждого экземпляра АТ, АЧ и для всей системы МТО ППО в целом, процессов хранения ЗЧ для каждого склада ТЦ и для всей системы МТО ППО в целом, времени ожидания в очереди на производство на ПИ и восстановление на АРЗ и времени транспортировки ЗЧ со складов ТЦ к АЧ. Для визуализации проводится множество прогонов КВИМ. Визуализация строится на основе статистической информации, полученной в результате данных прогонов. Визуализация позволяет определить недостаток и избыток ЗЧ, определить

причины задержки восстановления работоспособности и принять динамические решения для оптимизации процесса МТО ППО на исследуемом временном интервале.

Выводы по главе 2.

1. Предложен новый метод поддержки принятия решений для управления процессами МТО ППО АТ ВН, заключающийся в объединении возможностей имитационного моделирования, метода многокритериальной оценки эффективности решений и метода муравьиных колоний для задачи выбора решений. Новизна метода заключается в реализации с его помощью стохастической процедуры направленного перебора вариантов решений с использованием специально формируемого графа решений, на котором реализуется мультиагентный подход.
2. Осуществлена постановка задачи на разработку комплекса взаимосвязанных имитационных моделей МТО ППО АТ ВН с целевым назначением исследования системы поддержки решений по управлению этими процессами.
3. Одной из важнейших компонент КВИМ является имитационная модель надежности структуры обслуживаемой авиационной техники, являющаяся основным источником стохастического и динамического характера моделируемых процессов. В этой модели отражена многоуровневая структура АТ, как источника отказов, процессы эксплуатации и технического обслуживания АТ, заданы характеристики процессов обнаружения отказов и восстановления. Обеспечена возможность одновременного параллельного моделирования необходимого числа таких НС, рассредоточенных по территориально разнесенным АЧ. Имитационные модели сервисного центра, авиаремонтных предприятий и предприятий по изготовлению новых запасных частей, центров складского хранения, процессов транспортировки ЗЧ к местам их использования вместе с ИМ НС АТ АЧ обеспечивают замкнутый характер всей КВИМ с выходом на основные показатели критерия оценки результатов моделирования:

Глава 3. Программная реализация СППР МТО ППО АТ ВН и КВИМ и ее возможности для исследования процессов МТО ППО АТ ВН.

Для работы СППР ППО АТ ВН и КВИМ создан программный комплекс на языке программирования ObjectPascal в среде программирования BorlandDelphi 7.0.

Назначение программного комплекса, реализующего КВИМ – при заданных параметрах процессов МТО ППО АТ ВН и решениях по управлению получать оценки показателей КОРМ: математического ожидания коэффициента готовности АТ по парку АТ и математическое ожидание затрат на мероприятия МТО ППО.

Назначение программного комплекса, реализующего СППР – сформировать на основе результатов, полученных от КВИМ, вариантов управления процессами МТО ППО АТ ВН.

Задачей совместного использования обеих частей программного комплекса является реализация выбора оптимальных управлений процессами МТО ППО АТ ВН.

Схема структуры программного комплекса приведена на рис 3.1.

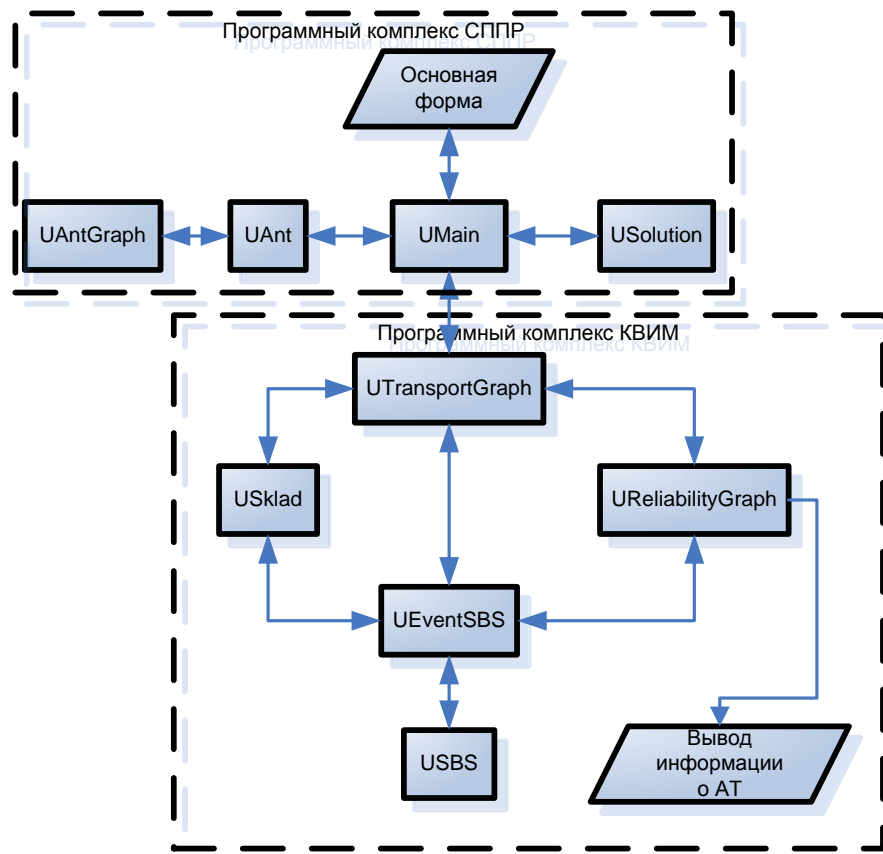


Рис 3.1. Схема структуры программного комплекса

Программный комплекс состоит из 16 модулей общим объемом в 8000 строк кода:

1. Umain – модуль, содержащий форму визуализации для работы ЛПР и отображающей процесс работы СППР. Данный модуль осуществляет управление СППР и запуск КВИМ.
2. UtransportGraph– модуль, описывающий ИМ транспортировки и обеспечивающий функционирования транспортного графа. В данном модуле содержатся процедуры создания и инициализации транспортного графа, а так же всех параметров КВИМ. Кроме ИМ транспортировки в данном модуле содержится описание ИМ производства/восстановления ЗЧ.
3. UreliabilityGraph – модуль, содержащий структуры данных и процедуры функционирования ИМ НС СЧ АТ.
4. Usklad – модуль, описывающий ИМ хранения ЗЧ на складах ТЦ
5. Uant – модуль, содержащий структуры данных и процедуры для работы ММК
6. UantGraph– модуль, содержащий структуры данных и процедуры графа решений.
7. USBS – модуль определяющий правила реализации списка будущих событий (СБС) для продвижения модельного времени и хранения дискретных событий КВИМ
8. UEventSBS – модуль, определяющий конкретное множество используемых в КВИМ дискретных событий, а так же процедуры их обработки.
9. Usolution – модуль, обеспечивающий хранение, обработку и вывод массива решений, полученных в результате работы СППР.

Остальные модули обеспечивают различные отдельные функции СППР и КВИМ. Для организации хранения и обработки текущей информации КВИМ и СППР применяется объектно-ориентированный подход к организации структур данных. Для занесения событий, различных типов, в единый СБС применяется механизм наследования. В модуле USBS определены: класс «события», содержащий только модельное время свершения данного события и класс «СБС», организующий упорядочивание (при добавлении нового) событий в СБС и извлечение критического события из СБС. События различного вида: отказа элемента НС, выполнения действия, создания новой ЗЧ, транспортировки ЗЧ и другие наследуются от класса «события». Наследование позволяет заносить в СБС события различных классов как будто это события класса «событие», а во время обработки данного события определить к какому классу оно относится. (рис 3.2) Для задания различных законов распределения случайной величины имеется класс

абстрактного закона распределения, от которого наследуются конкретные законы распределения: закон равной плотности вероятности, нормальный, экспоненциальный, Вейбула-Гнеденко и др.

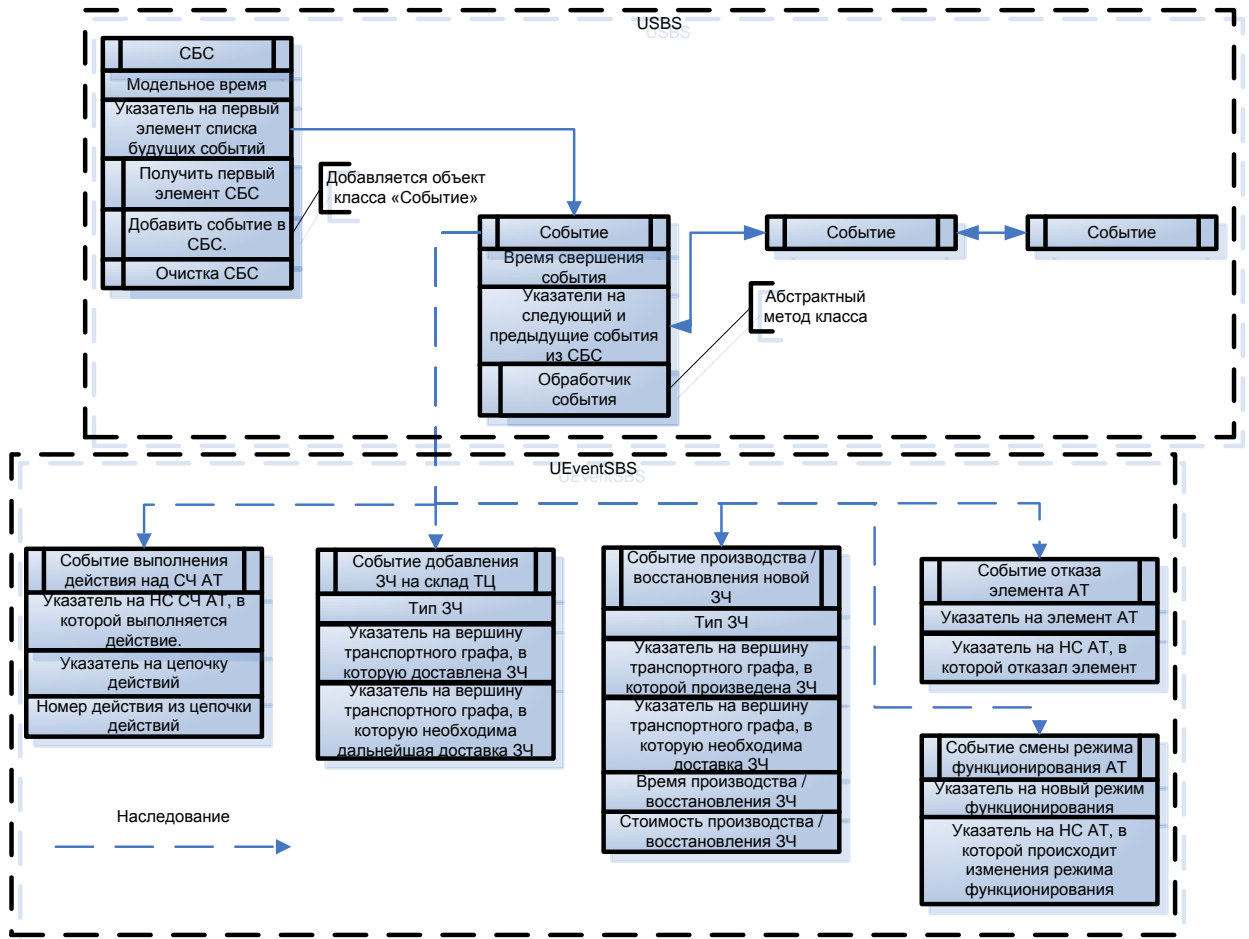


Рис 3.2. Описание и взаимосвязь классов, обеспечивающих продвижение модельного времени

Для загрузки входных данных в программу применяются текстовые файлы, но так как процесс загрузки вынесен в отдельную процедуру имеется возможность получения входной информации из других мест: баз данных, ввода вручную и т.д.

Основным файлом для загрузки СППО АТ ВН является файл транспортной сети (рис 3.3). В данном файле содержится информация о вершинах и дугах транспортного графа. Информация о вершинах транспортного графа содержит: название (идентификатор); координаты вершины, для визуализации; наличие склада с указанием максимального объема и стоимости хранения; наличие АЧ с указанием количества АТ в АЧ, а так же названий (совпадают с именами файлов для загрузки НС) и бортовых номеров АТ; наличие производства новых ЗЧ с указанием названия ПИ и наличие восстановления отказавших СЧ АТ с указанием названия АРЗ.

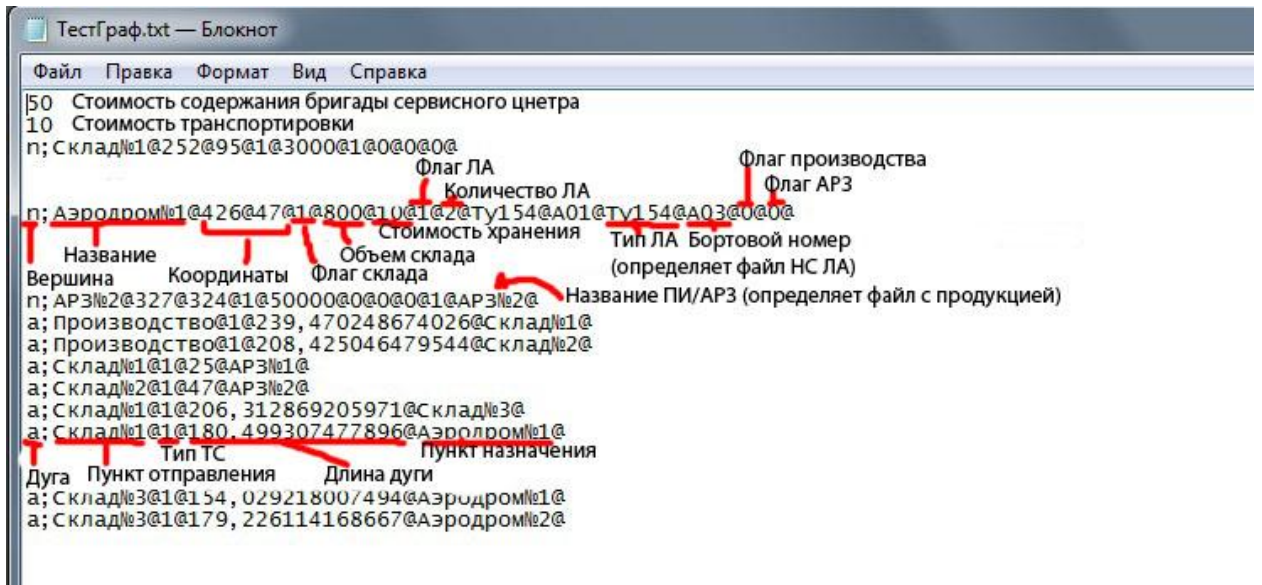


Рис 3.3. Структура файла для задания параметров транспортной сети.

Для загрузки информации о ПИ или АРЗ необходима информация о максимальной мощности данного ПИ или АРЗ, а так же перечень ЗЧ, производство которых возможно на данном ПИ или АРЗ с указанием стоимости и времени (в часах) производства данной ЗЧ (рис 3.4).

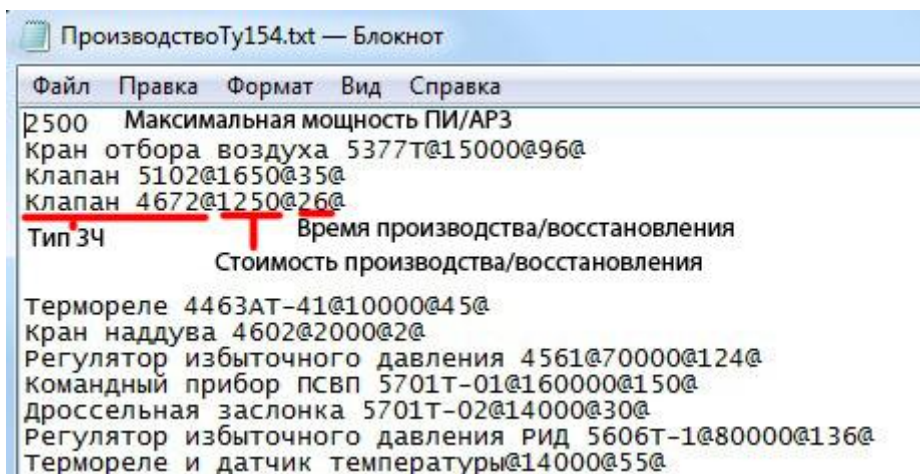


Рис 3.4. Структура файла для задания параметров АРЗ и ПИ.

НС АТ загружается из множества файлов (рис 3.5.). Основным файлом является файл, содержащий полный перечень СЧ АТ. При этом указывается не только СЧ АТ, но и блок, в который входит данная СЧ. Для каждой СЧ АТ указывается время, необходимое для включения данной СЧ, набор отказов с соответствующими параметрами отказов, а так же флаг – приводит ли отказ данной СЧ к отказу блока, в состав которого входит данная СЧ. Кроме файла СЧ АТ для загрузки необходимо создать файлы:

1. Файл датчиков, в котором указываются какие датчики будут включены при определенных отказах.

2. Файл зависимых отказов
3. Файл дублирования и резервирования. В данном файле указывается набор СЧ АТ, которые дублируют друг друга или находятся в резерве.
4. Файл возможных действий над СЧ АТ. Кроме СЧ АТ и действия указывается время выполнения данного действия, состояние других СЧ АТ, которое необходимо для выполнения данного действия и отказы, которые могут быть обнаружены в результате выполнения данного действия.

Последовательность режимов, в которых должен функционировать каждый экземпляр АТ определяется в отдельном файле, содержащем время начала и продолжительность действия, количество повторений данного действия и его название. Имеется возможность временные и количественные характеристики задавать в виде различных законов распределения, тем самым рассматривать множество различных сценариев эксплуатации АТ. Для каждого экземпляра АТ этот файл создается отдельно.

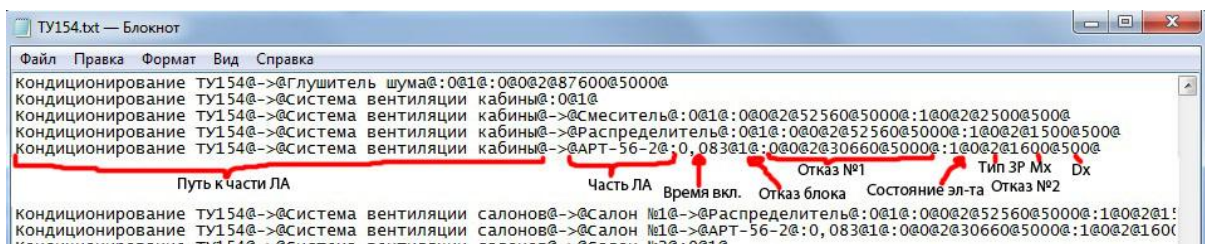


Рис 3.5. Структура файлов, определяющих параметры НС АТ

Кроме загрузки данных о СППО АТ ВН имеется возможность загрузки решений СППР (Рис 3.6.). Для этого в файле решения имеются ЗЧ, которые необходимо произвести с указанием склада, на который необходимо транспортировать произведенную ЗЧ и время поступления заявки на производство.

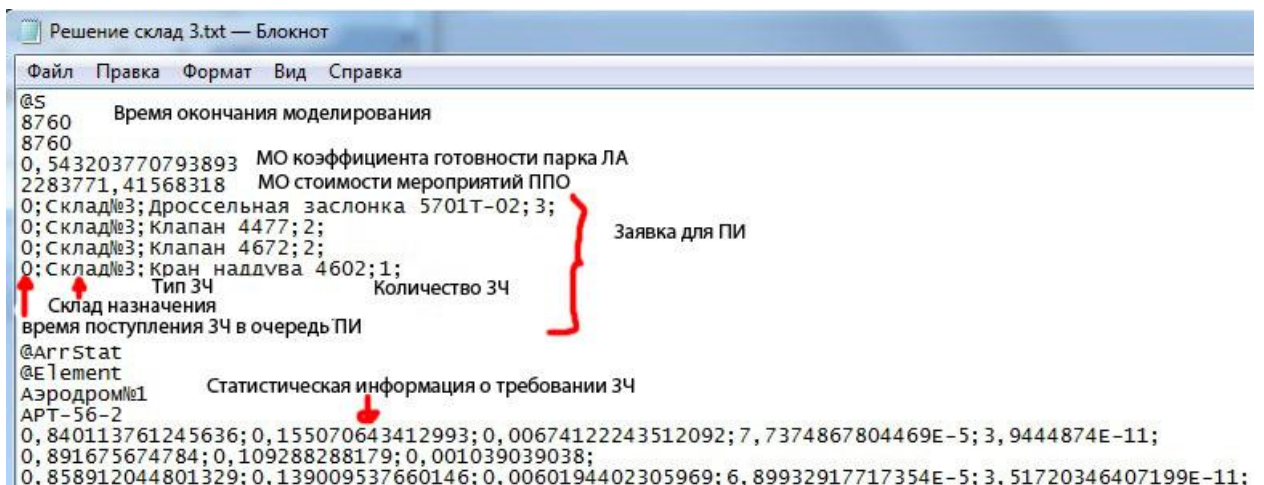


Рис 3.6 Структура файла, определяющего решение по составлению заявки на ПИ

Для работы СППР и ММК имеется ряд входных параметров (рис 3.7):

1. Количество прогонов КВИМ для сбора статистики;
2. Интервалы времени, определяемые временами отправки заявок на производство для ПИ;
3. Количество прогонов ММК;
4. Параметры ММК:
 - a. Количество агентов в группе для ММК;
 - b. Максимальный «вес» у агента
 - c. Коэффициент уменьшения «веса» вершин
 - d. Коэффициент перевода ряда распределения в «весовые» коэффициенты соответствующих вершин графа решений
 - e. Тип ММК (стандартный, элитный, ранжированный) и коэффициент.
5. Тип агентов для ММК (максимизация коэффициента готовности, минимизация стоимости ППО, критерий эффективность-стоимость, взвешенная сумма или одновременный выбор вершины).

Комплекс взаимосвязанных имитационных моделей

Времена поставок

0
8760

8760

Время КВИМ 0

Текущее модельное время 0

Рассмотреть процессы

Время ММК 0

Макс. кол. решений

Создание графа решений

С учетом восстановления

Без учета восстановления

Количество прогонов КВИМ 500

Система поддержки принятия решений, основанная на методе муравьиных колоний

Количество агентов 3

Тип занесения феромона

Стандартный

Элитный

Ранжированный

Коэффициент ранга 3

Критерий

Коэфф. готовности

Эффе./стоимость

Одновременный поиск

Стоимость ППО

Взвешенная сумма

Коэффициент готовности

Начальное значение 0,1

Количество феромона 1

Испарение в вершине 0,5

Стоимость

Начальное значение 0,1

Количество феромона 60000000

Испарение в вершине 0,5

Коэффициент отобр. частот 1200

Окончание СППР

Количество итераций

Задание ограничений

Мин. коэф. готовности

Мин. 0

МО 0,815

Макс. 0

Макс. стоимость 4500000

Анализ

Начальное значение 0,7

Шаг 0,1

конечное значение 2

Количество прогонов СППР 30

Параметр

Кол-во агентов

КГ Нач. знач.

СТ Нач. знач.

Коэфф. ранга

КГ Кол. фер.

СТ Кол. фер.

Коэфф. частот

КГ Коэф. испар.

СТ Коэф. испар.

Множество решений

№	Время кон.	Время мод2	КГ	Стоимость	Кол-во

Кол-во реш. 0

Протокол

Протокол Протокол ММК Количество итераций Протокол элемента Протокол СППР

Рис 3.7. Форма ввода параметров ММК.

В течение работы программы может производиться интерактивный вывод информации в виде (рис 3.8.):

1. Протокола работы СППО или каждого экземпляра АТ в отдельности и протокола работы ММК и СППР в целом.

2. Визуализации изменения состояния всех СЧ выбранного экземпляра АТ. Данный режим позволяет оценить адекватность разработанной модели НС АТ и процессов ее обслуживания.
3. Визуализация ГР и изменения «весов» на вершинах. Данный режим позволяет оценить правильность задания параметров ММК.
4. Визуализация множества решений и множества Паретто.

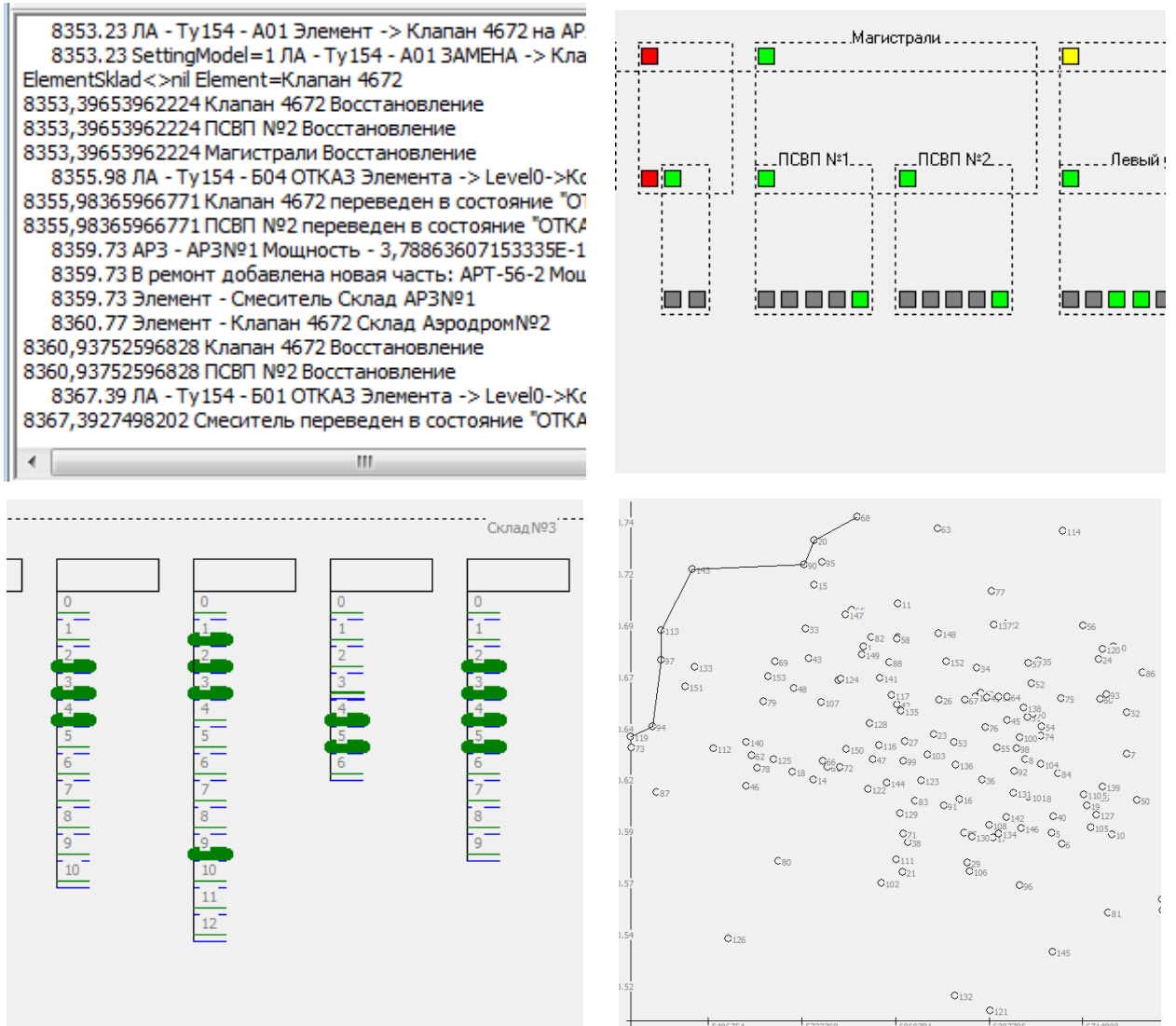


Рис 3.8. Интерактивный вывод информации в программе.

Результаты работы СППР в виде массива решений заносятся в файл (рис 3.6), в котором кроме самих решений указываются значения критериев эффективности решения: оценка математического ожидания коэффициента готовности и оценка математического ожидания стоимости мероприятий МТО ППО.

Выводы по главе 3.

- 1) Разработан программный комплекс, реализующий КВИМ и модель системы поддержки решений процессами МТО ППО АТ ВН. Объем программного обеспечения 8000 строк кода на объектном алгоритмическом языке BorlandDelpi 7.0.
- 2) Программное обеспечение позволяет реализовать имитационные эксперименты с процессами МТО ППО АТ ВН, характеризующимися следующими размерностями:
 - количество уровней НС АТ до 100;
 - количество СЧ НС до 10000;
 - количество АЧ до 100;
 - количество ПИ и АРЗ ЗЧ до 10;
 - количество складов для хранения исправных ЗЧ до 100;
- 3) Программное обеспечение снабжено интерфейсом, позволяющим в удобной наглядной форме задавать и варьировать как параметры процессов МТО ППО АТ ВН:
 - количество прогонов КВИМ для сбора статистики;
 - интервалы времени, определяемые временами отправки заявок на производство для ПИ;
 так и параметры модели СППР:
 - количество прогонов ММК;
 - параметры ММК:
 - количество агентов в группе для ММК;
 - максимальный «вес» у агента
 - коэффициент уменьшения «веса» вершин
 - коэффициент перевода ряда распределения в «весовые» коэффициенты соответствующих вершин графа решений
 - тип ММК (стандартный, элитный, ранжированный) и коэффициент.
 - тип агентов для ММК (максимизация коэффициента готовности, минимизация стоимости ППО, критерий эффективность-стоимость, взвешенная сумма или одновременный выбор вершины).
 А также в удобной наглядной форме получать результаты ИМ экспериментов.
- 4) Программный комплекс обеспечивает достаточно высокое быстродействие, позволяющее проводить имитационные исследования и оптимизацию процессов МТО ППО АТ ВН высокой размерности. Так реализация 30 000 прогонов КВИМ занимает 1,5 часа.

Глава 4. Результаты имитационных исследований системы и процессов МТО ППО АТ ВН.

4.1. Система кондиционирования и регулирования давления как объект послепродажного обслуживания для проверки работоспособности СППР и КВИМ.

4.1.1. Состав, структура и процесс функционирования СКирД.

Для тестовой проверки работоспособности данной ИМ НС АТ используются НС системы кондиционирования и регулирования давления самолета (СКирД) (рис. 4,1) [45,11]. Данная система состоит из источника воздуха в виде двигателей и вспомогательной силовой установки (ВСУ), первичного узла охлаждения, двух магистралей, двух вторичных узлов охлаждения, системы вентиляции кабины, системы вентиляции двух салонов, а так же различных датчиков и регуляторов на панели бортинженера и щитков для проведения технического обслуживания.

Воздух из источников воздуха, двигателей или ВСУ на земле, поступает в предварительный узел охлаждения, состоящего из первичного ВВР и эжектора. Далее по двум магистралям ПСВП №1 и ПСВП №2 (состоят из Крана наддува 4602, регулятора избыточного давления 4561, командного прибора ПСВП 5701Т-01, дроссельной заслонки 5701Т-02 и клапана 4672) поступает во вторичные узлы охлаждения, расположенные в крыльях АТ (состоят из регулятора избыточного давления 5303Т-1, термореле и датчика температуры, клапана 4477, двух заслонок 5670, вторичного ВВР 4458, воздухозаборника, турбохолодильника, влагоотделителя и управляющего устройства АРТ-56-1) После вторичных узлов охлаждения воздух через систему смесителей и распределителей поступает в два салона самолета и кабину.

В системе используется холодное резервирование крана отбора воздуха, клапанов в трубопроводе, горячее резервирование воздушных магистралей ПСВП, вторичных узлов охлаждения (левый и правый узлы охлаждения).

Имеется два различных режима функционирования СКирД: Работа от ВСУ и работа от двигателей. В первом случае воздух имеет низкую температуру и нормальное давление, поэтому охлаждение во вторичных узлах охлаждения не требуется, а в случае работы от двигателей в работу включаются все узлы СКирД.

При проведении технического обслуживания (ТО) осуществляется следующая последовательность действий: снятие люков гондол двигателей, осмотр трубопроводов, кранов отбора воздуха и клапанов; снимаются люки левого и правого полукрыла для осмотра воздухозаборников, турбохолодильников и заслонок левого и правого узлов

вторичного охлаждения. Так же из салона снимаются три люка в багажных отделениях для осмотра остальных частей системы. [7,10]

Для анализа состояния СКирД в полете на панели бортинженера установлены датчики отказа подсистемы отбора воздуха по каждому из двигателей (включаются в случае отказа клапанов или кранов отбора воздуха), датчик повышения температуры хвостового отсека (включается в случае отказа предварительного узла охлаждения), датчики температуры по каждой магистрали, датчики температуры для каждого вторичного узла охлаждения, датчик перегрева воздуха в салонах и кабине и указатель расхода воздуха, по которому судят о неисправности воздухозаборника.

Параметры ИМ НС СКирД.

На основе представленной выше информации создается вложенная графовая структура для отображения компонент НС АТ. Данная графовая структура имеет 6 уровней вложенности и содержит 116 экземпляров класса «Функциональная часть НС», 87 из которых располагаются на нижнем уровне и являются элементами НС. Общий вид полученной структуры приведен на рис 4.1. Каждый квадрат на данном рисунке обозначает «Функциональную часть НС», а пунктирной линией выделены экземпляры объекта «Граф НС».

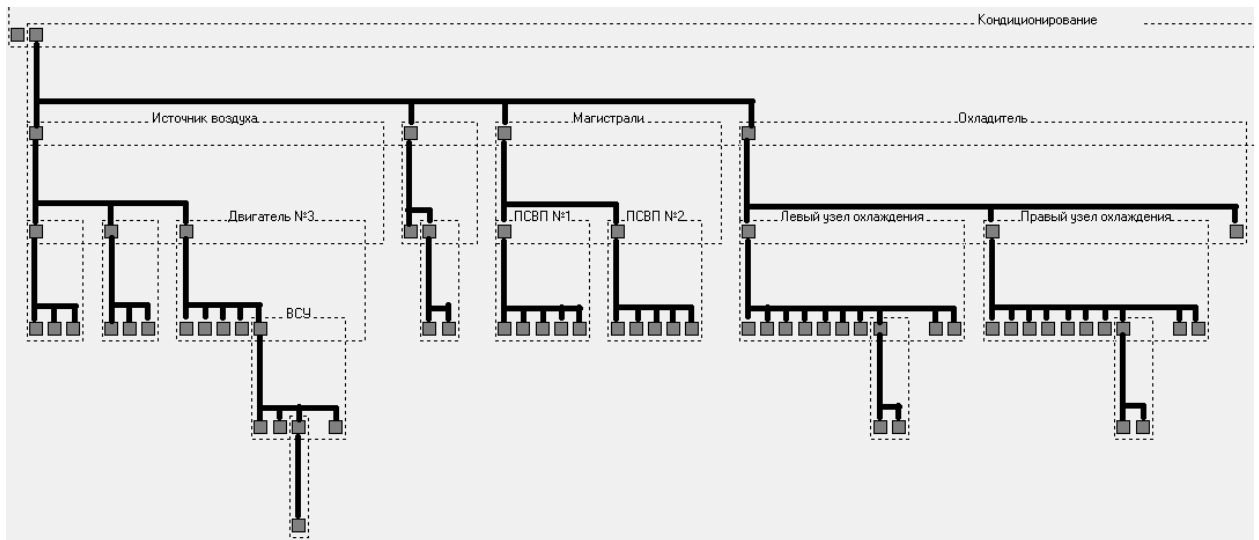


Рис 4.1. Вложенная графовая структура для отображения компонент СКирД

Для каждого элемента НС задаются законы распределения ВБР для различных состояний, приведенные в таблице 4.1:

Таблица 4.1.

Название элемента	Состояние элемента	Закон распределения ВБР
-------------------	--------------------	-------------------------

Кран отбора воздуха 5377Т	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=61320 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=8760 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,997
Клапан 5102	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=8760 D=500
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=4000 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Клапан 4672	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=26280 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=2500 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,997
Система охлаждения ВСУ	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=52560 D=5000
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Первичный ВВР 4487Т	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=39420 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=4000 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Заслонка для управления эжектором 5670	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=21900 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=2500 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный

		отказ) P=0,997
Термореле 4463АТ-41	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=17520 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1500 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,99
Кран наддува 4602	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=35040 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=4000 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Регулятор избыточного давления 4561	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=43800 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1500 D=50
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,997
Командный прибор ПСВП 5701Т- 01	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=35040 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1500 D=50
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,997
Дроссельная заслонка 5701Т-02	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=35040 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1500 D=50
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,997
Клапан 4672	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=26280 D=5000

	Включен	Нормальный (износостойкий отказ) M=3000 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Регулятор избыточного давления РИД 5606Т-1	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=43800 D=5000
	Включен	Нормальный (износостойкий отказ) M=500 D=50
Термореле и датчик температуры	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=27520 D=5000
	Включен	Нормальный (износостойкий отказ) M=2500 D=500
Клапан 4477	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=30660 D=5000
	Включен	Нормальный (износостойкий отказ) M=3700 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Заслонка 5670	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=26280 D=5000
	Включен	Нормальный (износостойкий отказ) M=2500 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9997
Вторичный ВВР 4458	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=39420 D=5000
	Включен	Нормальный (износостойкий отказ) M=2000 D=500
Воздухозаборник	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=87600 D=5000
Компрессор турбохолодильника	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=8760 D=5000
	Включен	Нормальный (износостойкий отказ)

		M=1500 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9999
Масляная система турбохолодильника	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=8760 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=4000 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,9999
АРТ-56-1	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=30660 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1600 D=500
	Включен	Экспоненциальный (внезапный отказ) P=0,997
Масло	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=14400 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=6000 D=50
Глушитель шума	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=87600 D=5000
Смеситель	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=52560 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1500 D=50
Распределитель	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=52560 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1500 D=50
АРТ-56-2	Выключен	Нормальный (износосовый отказ) M=30660 D=5000
	Включен	Нормальный (износосовый отказ) M=1600 D=50

Система управления	Выключен	Нормальный (износостойкий отказ) M=30660 D=5000
--------------------	----------	--

При отказе любого элемента, если не происходит включение дублирующего, происходит отказ блока. Для повышения надежности СКИРД применяются различные виды дублирования:

- в системе двигателя дублируется Клапан 5102, так как через данные клапаны поступает воздух от ВСУ.
- дублируются правая и левая магистрали.
- дублируются правый и левый вторичные узлы охлаждения
- у вторичного узла охлаждения дублируется Заслонка 5670.
- имеется две дублирующие магистрали в системе вентиляции салона №2

Для обнаружения отказа существуют датчики на панели бортиженера:

- при отказе первичного узла охлаждения загорается датчик «Превышение t хвостового отсека»
- при отказе левой магистрали загорается датчик «Превышение давления в левой магистрали»
- при отказе правой магистрали загорается датчик «Превышение давления в правой магистрали»
- при отказе крана отбора 1-го или 2-го двигателя загорается датчик «Предварительный узел охлаждения»
- при отказе левого или правого вторичного узла охлаждения загорается датчик «Перегрев воздуха за вторичным узлом охлаждения»
- об отказе воздухозаборников судим по указателю расхода воздуха
- при отказе системы вентиляции салонов или кабины загорается датчик «Перегрев воздуха»

Кроме датчиков на панели бортиженера для обнаружения отказов проводятся регулярное ТО. ТО состоит из последовательности выполняемых действий:

1. Выключение всей СКИРД.
2. Осмотр первичного узла охлаждения. Для этого демонтируется щиты багажного отделения №3 и последовательный осмотр первичного ВВР и эжектора,
3. Осмотр левого и правого вторичных узлов охлаждения. Для этого производится демонтаж люков правого и левого полукрыла. И

последовательный осмотр вторичного ВВР, воздухозаборника, турбохолодильника, влагоотделителя, клапанов и заслонок.

4. Осмотр левой и правой магистралей. Доступ к правой и левой магистралям осуществляется путем демонтажа панелей багажного отделения №3. После этого осуществляется осмотр крана наддува, регулятора избыточного давления, командного прибора и клапана 4672 для поиска неисправностей
5. Осмотр клапанов и кранов отбора воздуха двигателей №1 и 2. При этом производится демонтаж люков гандолы соответствующего двигателя.
6. Осмотр системы вентиляции кабины и салонов. При этом производится демонтаж панелей багажного отделения для доступа к трубопроводам, смесителям и неисправностей.

Включение датчика приводит к осмотру соответствующего блока для поиска неисправности.

Итого существует 6 стандартных действий над функциональной частью: Включение, Выключение, Монтаж, Демонтаж, Настройка и Осмотр. Каждое выполняемое действие требует определенных временных затрат, и при выполнении действия возможно обнаружение различных отказов. Общий список действий с временами их выполнения в часах приведен в таблице 4.2:

Таблица 4.2.

Название составной части	Включение	Монтаж	Демонтаж	Настройка	Осмотр	Вероятность обнаружить отказ части при осмотре
Двигатель №1,2	0,25					
Кран отбора воздуха 5377Т	0	0,25	0,25	0	0,083	1
Клапан 5102	0	0,167	0	0	0,083	1
Система охлаждения ВСУ	0,083	0,125	0,125	0	1	1
ВСУ	0,083					
Первичный ВВР 4487Т	0,167	1,5	1	0	0,25	1
Заслонка для управления эжектором 5670	0	0,25	0,25	0		0,9 – при осмотре Первичного ВВР
Термореле 4463АТ-41	0,083	0,5	0,5	0,5		0,5 – при осмотре Первичного ВВР
Вторичный ВВР 4458		1,25	1,25	0	0,25	1
Влагоотделитель	0	1,25	1,25	0	0,25	1
Воздухозаборник	0	2	2	0	0,167	1
Клапан 4477	0	0,125	0,25	0	0,167	1
Заслонка 5670	0	0,25	0,5	0	0,083	1
Компрессор турбохолодильника	0,083	1	0,5	0		0,7 – при осмотре Турбохолодильника
Масляная система турбохолодильника	0	0,5	0,5	1		0,9 – при осмотре Турбохолодильника

Масло	0	0,04	0,04	0		1 – при включении СкиРД на земле (предстартовая проверка)
Турбохолодильник	0,25				0,5	
Кран наддува 4602	0,083	1	0,5	0	0,083	1
Регулятор избыточного давления 4561	0,083	0,167	0	0,167	0,33	0,9
Командный прибор ПСВП 5701Т- 01	0	0,167	0	0,5	0,33	0,75
Дроссельная заслонка 5701Т-02	0	0,167	0	0	0,083	1
Клапан 4672	0	0,167	0	0	0,083	1
Смеситель	0	0,125	0,125	0	0,25	1
Распределитель	0	1,25	1,25	0,25	0,33	1
АРТ-56-2	0,083	0,125	0,125	0	0,5	0,7
Люк гондолы двигателя		1	0,5			
Люки багажного отделения		0,5	0,33			
Люки полукрыла		1	0,33			

Работа СКирД возможна в двух режимах: на земле, от работающего ВСУ и в полете от двигателей. При включении СКирД на земле происходит последовательное включение: Штуцера для подключения наземного кондиционера, Первичного узла охлаждения (Включается Эжектор (Заслонка для управления эжектором 5670 и Термореле 4463АТ-41) и Первичный ВВР 4487Т), включаются обе магистрали (открывается Кран наддува 4602, вступает в работу Регулятор избыточного давления 4561 и Командный прибор ПСВП 5701Т-01, открывается Клапан 4672), масляная система турбохолодильников, систем вентиляции кабины и салона (всех смесителей, распределителей и АРТ-56-2), включение ВСУ (Включается система охлаждения ВСУ, открываются Кран отбора воздуха 5377Т и Клапана 5102) и отключение Штуцера для подключения наземного кондиционера. После выполнения всех процедур включения СКирД на земле происходит запуск системы в режиме полета: включаются двигатели №1, №2, открываются Краны отбора воздуха 5377Т и Клапана 5102 соответствующих двигателей и вторичного узла охлаждения (запускается Регулятор избыточного давления РИД 5606Т-1, открываются Клапан 4477 и Заслонки 5670, запускаются Турбохолодильник и Вторичный ВВР 4458). По приземлению АТ происходит выключение всех систем. Если в момент включения или полета обнаружена неисправность одного из устройств (по показаниям датчиков), то по приземлению проводится ТО с целью поиска и устранения отказа. При этом датчик определяет в каком месте СКирД произошел отказ.

При старте КВИМ определяется массив смены режимов функционирования. Для этого в файл режимов вносится информация о времени проведения ТО и временах эксплуатации АТ. ТО проводится каждый месяц (720 час, 1440 час, 2160 час, 2880 час и т.д.) для обнаружения скрытых отказов.

Предполагается, что: время, количество и продолжительность полетов АТ в КВИМ задается вероятностными распределениями, сформированными на основе имеющейся статистики. В КВИМ количество полетов АТ в течение года будем определять равномерно распределенной случайной величиной на интервале (50; 300). Для каждого полета АТ зададим время вылета исходя с помощью случайной величины, равномерно распределенное на интервале 1 года службы (8760 часов). Продолжительность полета определим равномерно распределенной случайной величиной на интервале (1; 10) часов. В начале каждого прогона режимы по эксплуатации АТ генерируется случайно, тем самым обеспечивая рассмотрение множества различных планов эксплуатации АТ.

4.1.2. Параметры системы МТО ППО СКиРД тестового примера для анализа разработанной СППР.

В системе МТО ППО имеется шесть экземпляров АТ, распределенных между двумя АЧ. В первой АЧ находится 2 самолета, а во второй – 4, два АРЗ и ПИ новых ЗЧ. Центр сервисного обслуживания имеет набор бригад для выполнения ремонтных работ. Стоимость часа содержания ремонтной бригады равна 50 руб. При этом необходимое количество бригад формируется на все время моделирования. Для транспортировки ЗЧ и отказавших СЧ АТ имеется транспортное средство, перемещающееся по транспортному графу. Стоимость одного часа эксплуатации транспортного средства равна 10 руб, а средняя скорость 60 км/ч. Схема транспортного графа приведена на рис 4.2.

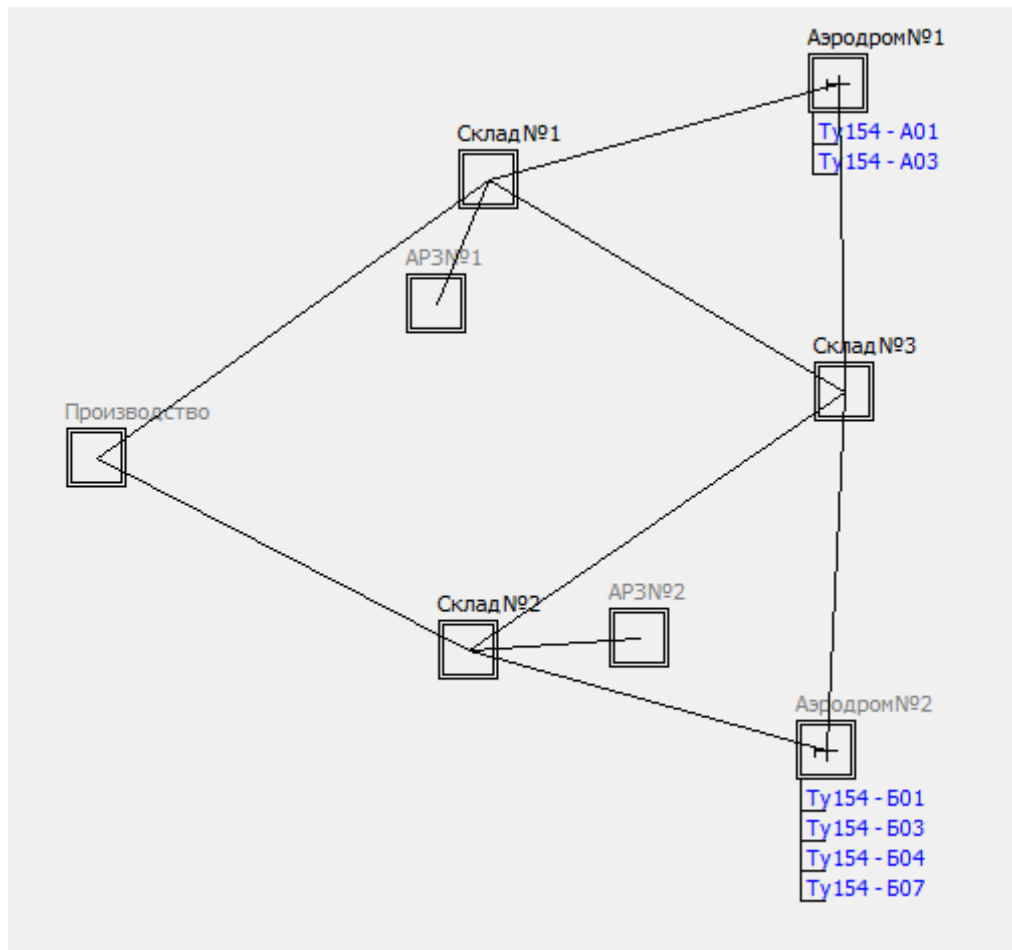


Рис 4.2. Транспортный граф тестового примера.

Расстояние между вершинами транспортного графа приведены в таблице 4.3:

Таблица 4.3.

Пункт отправления	Пункт назначения	Расстояние (в км)	Расчетное время перемещения (в часах)
Производство	Склад№1	14370	239,5

Производство	Склад№2	12510	208,5
Склад№1	АРЗ№1	1500	25
Склад№2	АРЗ№2	2820	47
Склад№1	Склад№3	12378	206,3
Склад№1	Аэродром№1	10830	180,5
Склад№2	Склад№3	13632	227,2
Склад№2	Аэродром№2	11094	184,9
Склад№3	Аэродром№1	9240	154
Склад№3	Аэродром№2	10752	179,2

Для хранения ЗЧ имеется 3 склада ТЦ разного объема и стоимости хранения, так же возможно хранение и на складах аэродромов АЧ. Список складских помещений приведен в таблице 4.4:

Таблица 4.4.

Название склада	Максимальный объем склада (в м ²)	Стоимость одного часа хранения одного м ² на складе.
Склад№1	3000	1
Склад№2	3000	1
Склад№3	5000	5
Аэродром№1	800	10
Аэродром№2	800	10

Для пополнения ЗЧ на складах ТЦ имеется ПИ максимальной производственной мощностью 2500 руб/час, производящее всю номенклатуру необходимых ЗЧ. Параметры производства ПИ для всей номенклатуры ЗЧ приведены в таблице 4.5:

Таблица 4.5.

Название ЗЧ	Объем в м ² , занимаемый на складе.	Стоимость производства (в руб.)	Время производства (в часах)	Мощность, необходимая для производства (руб. / час)
Кран отбора воздуха 5377Г	0,3	15000	96	156,25
Кран наддува 4602	0,3	2000	2	1000

Клапан 5102	0,3	1650	35	47,14286
Клапан 4672	0,3	1250	26	48,07692
Клапан 4477	0,3	1200	15	80
Система охлаждения ВСУ	2	10500	250	42
Первичный ВВР 4487Т	10	500000	186	2688,172
Вторичный ВВР 4458	10	300000	287	1045,296
Дроссельная заслонка 5701Т-02	0,3	14000	30	466,6667
Заслонка 5670	0,3	9000	12	750
Командный прибор ПСВП 5701Т-01	12	160000	150	1066,667
Термореле 4463АТ-41	0,4	10000	45	222,2222
Термореле и датчик температуры	0,5	14000	55	254,5455
Регулятор избыточного давления РИД 5606Т-1	0,7	80000	136	588,2353
Регулятор избыточного давления 4561	0,7	70000	124	564,5161
Воздухозаборник	15	385000	125	3080
Турбохолодильник	7	400000	254	1574,803
Смеситель	1,1	12000	25	480
Распределитель	1,3	18000	32	562,5
АРТ-56-2	0,3	120000	130	923,0769
Масло	0,1	12000	30	400

Восстановление отказавших СЧ АТ осуществляется на двух АРЗ мощностью 500 руб/час (АРЗ №1) и 1500 руб/час (АРЗ №2). Номенклатура СЧ АТ, восстановление которых возможно на АРЗ приведены в таблице 4.6:

Таблица 4.6.

Название СЧ АТ	Стоимость	Время	Мощность, необходимая
----------------	-----------	-------	-----------------------

	восстановления (в руб.)	восстановления (в часах)	для восстановления (руб. / час)
АРЗ №1			
Кран отбора воздуха 5377Т	3000	10	300
Клапан 5102	2750	12	229,1667
Клапан 4672	2050	6	341,6667
Заслонка 5670	1000	3	333,3333
Дроссельная заслонка 5701Т-02	2000	18	111,1111
Регулятор избыточного давления 4561	15600	48	325
Регулятор избыточного давления РИД 5606Т-1	14000	39	358,9744
Термореле и датчик температуры	3000	15	200
Смеситель	3000	9	333,3333
Распределитель	4000	12	333,3333
АРТ-56-2	36000	80	450
АРЗ №2			
Система охлаждения ВСУ	15000	90	166,6667
Первичный ВВР 4487Т	58000	76	763,1579
Вторичный ВВР 4458	50000	97	515,4639
Термореле 4463АТ-41	5000	12	416,6667
Термореле и датчик температуры	8000	20	400
Регулятор избыточного давления 4561	15000	52	288,4615
Регулятор избыточного давления РИД 5606Т-1	12000	66	181,8182
Командный прибор ПСВП 5701Т-01	12000	60	200
Дроссельная заслонка	5000	10	500

5701Т-02			
Воздухозаборник	55000	75	733,3333
Турбохолодильник	50000	154	324,6753

4.2. Результаты имитационных исследований по проверке работоспособности КВИМ.

4.2.1. Анализ процесса работы КВИМ по трассировочной печати.

Для тестовой проверки адекватности функционирования КВИМ составим заявку на производство, сформированной на основе наработки соответствующих СЧ АТ (таблица 4.7):

Таблица 4.7.

ЗЧ, производство которой необходимо на ПИ	Количество ЗЧ
Дроссельная заслонка 5701Т-02	3
Клапан 4477	2
Клапан 4672	2
Кран наддува 4602	1
Первичный ВВР 4487Т	1
Распределитель	2
Смеситель	2

Все ЗЧ, произведенные на ПИ ЗЧ отправляются на Склад №3.

Анализ трассировочной печати будем проводить по прогону КВИМ на интервале 1 год (8760 часов). Задачей анализа является оценка адекватности обработки последствий отказа, а также выработка мероприятий по его устранению. Выборка из трассировочной печати по одному экземпляру АТ (Б01) на интервале 3,5-5 месяцев приведена в таблице 4.8:

Таблица 4.8.

Время	Событие/Состояние
2827,09	Событие: АТ – Б01 ОТКАЗ Элемента ->Level0->Кондиционирование ->Магистрали->ПСВП №2->Клапан 4672
	Состояние: Клапан 4672 переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2408,99 Time[1]=418,09 Time[2]=0 Time[3]=0
	Состояние: ПСВП №2 переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2408,99 Time[1]=418,09 Time[2]=0 Time[3]=0
2880,00	Событие: АТ - Б01 Смена режима функционирования – Полное ТО
2888,64	АТ - Б01 ОБНАРУЖЕН ОТКАЗ Клапан 4672

	Событие: АТ - Б01 Транспортировка Элемент -> Клапан 4672 на АРЗ ->АРЗ№1 Время в дороге 410,54 Склад назначения – Склад№3
3299,17	Событие: АРЗ №1 В ремонт добавлена новая часть: Клапан 4672 Состояние: Потребляемая мощность предприятия – 341,67 Суммарная стоимость 65000
3305,17	Событие: АРЗ – АРЗ№1 Мощность – 0 Новая ЗЧ – Клапан 4672 Склад назначения – Склад№3 Состояние: Суммарная стоимость 67050
	Элемент – Клапан 4672 Доставлен на склад: АРЗ№1
	Событие: АРЗ№1 ТРАНСПОРТИРОВКА Эл-та Клапан 4672 на СКЛАД Склад№3 Время в дороге 231,3
3474,15	Событие: АТ – Б01 ОТКАЗ Элемента ->Level0->Кондиционирование ->Охладитель->Правый узел охлаждения->Клапан 4477
	Состояние: Клапан 4477 переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2988,84 Time[1]=485,31 Time[2]=0 Time[3]=0
	Состояние: Правый узел охлаждения переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2988,84 Time[1]=485,31 Time[2]=0 Time[3]=0
	Состояние: Включение: « Перегрев воздуха за вторичным узлом охлаждения»
3478,40	АТ - Б01 ОБНАРУЖЕН ОТКАЗ Клапан 4477
	Событие: Клапан 4477 найден на складе: Склад №3 Транспортировка к АТ-Б01 Время в дороге 179,2
3536,49	Состояние: Склад№3 ДОБАВЛЕНИЕ Эл-та Клапан 4672 на СКЛАД
3600,00	Событие: АТ - Б01 Смена режима функционирования – Полное ТО
3657,62	Состояние: Элемент – Клапан 4477 Доставлен на склад: Аэродром№2
	Состояние: АТ - Б01 Клапан 4477 Восстановление Time[0]=2988,84 Time[1]=485,31 Time[2]=183,1 Time[3]=0,375
	Состояние: АТ - Б01 Правый узел охлаждения Восстановление Time[0]=2988,84 Time[1]=485,31 Time[2]=183,47 Time[3]=0
4079,44	Событие: АТ - Б03 ОТКАЗ Элемента ->Level0->Кондиционирование ->Система вентиляции салонов->Салон №1->Смеситель
	Состояние: Смеситель переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2642,06 Time[1]=1437,37 Time[2]=0 Time[3]=0
	Состояние: Салон №1 переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2460,93

	Time[1]=1437,37 Time[2]=181,12 Time[3]=0
	Состояние: Система вентиляции салонов переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2462,87 Time[1]=1435,44 Time[2]=181,12 Time[3]=0
	Состояние: Включение: «Перегрев воздуха»
	Состояние: Кондиционирование переведен в состояние «ОТКАЗ» Время: Time[0]=2365,94 Time[1]=99,047 Time[2]=1614,44 Time[3]=0
4080,77	АТ - Б03 ОБНАРУЖЕН ОТКАЗ Смеситель
	Событие: АТ - Б03 Элемент -> Смеситель на АРЗ ->АРЗ№1 Время в дороге 410,53 Склад назначения – Склад№3
	Смеситель найден на складе: Склад №3 Время в дороге 179,2
4260,00	Состояние: Элемент – Смеситель Доставлен на склад Аэродром№2
4260,24	Состояние: Смеситель Восстановление Time[0]=2642,06 Time[1]=1437,37 Time[2]=180,55 Time[3]=0,25
	Состояние: Салон №1 Восстановление Time[0]=2460,93 Time[1]=1437,37 Time[2]=361,92 Time[3]=0
	Состояние: Система вентиляции салонов Восстановление Time[0]=2462,87 Time[1]=1435,44 Time[2]=361,92 Time[3]=0
	Состояние: Кондиционирование Восстановление Time[0]=2365,94 Time[1]=99,047 Time[2]=1795,24 Time[3]=0

На 3-ем месяце функционирования у АТ отказывает Клапан 4672 Правой магистрали. Данный отказ был вызван случайными факторами, так как до момента отказа Клапан 4672 проработал 418 часов (поле Time[1]), а износные повреждения вызовут отказ у Клапана только через 3000 часов (см таблицу 4.8). В результате Правая магистраль переводится в состояние «Отказ». СкиРД не изменяет своего состояния, так как Правая магистраль полностью дублируетсялевой магистралью.

Отказ Клапана 4672 был обнаружен в результате проведения мероприятий по ТО АТ в начале 4-го месяца эксплуатации (2880 часов). Отказавший Клапан 4672, после демонтажа, отправляется на АРЗ№1 для восстановления его работоспособности. Время в дороге составляет 410 часов.

По прибытию отказавшего Клапана 4672 на склад АРЗ№1 он помещается в очередь на восстановление. Так как в данный момент АРЗ№1 не выполняет заказы на восстановление СЧ АТ, то Клапан 4672 сразу поступает на АРЗ. При этом потребляемая АРЗ мощность увеличивается на величину мощности, требуемой для восстановления

Клапана 4672 – 341 руб/час. Через 6 часов восстановленный Клапан 4672 появляется на складе АРЗ№1. Общая стоимость восстановленный СЧ АТ для АРЗ№1 увеличивается на 2050 руб. После перемещения восстановленного Клапана 4672 на склад АРЗ№1 организуется его перевозка на Склад №3 для пополнения резерва ЗЧ. Время в дороге 231 час.

Пока Клапан 4672 доставляется на Склад №3 у АТ отказывает Клапан 4477 Правого узла вторичного охлаждения. Правый узел вторичного охлаждения переведен в состояние «Отказ», а его функции берет на себя Левый узел вторичного охлаждения. Отказ Клапана 4477 обнаружен в после включения датчика «Перегрев воздуха за вторичным узлом охлаждения» в результате проведенного осмотра. Для устранения отказа производится поиск ЗЧ на складах ТЦ. На складе №3 найден исправный Клапан 4477. Организуется транспортировка Клапана 4477 со склада №3 на склад Аэродрома №2, принадлежащего АЧ в которой базируется АТ – Б01. Время в дороге 179 часов. После доставки Клапана 4477 на склад Аэродрома №2 происходит восстановление отказавшей СЧ АТ. При этом сохраняется время, в течении которого Клапан 4477 и Правый узел вторичного охлаждения находились в состоянии «Отказ» (Time[2]). Данное время складывается из времени поиска отказа (4 часа) и времени транспортировки (179 часов), что в сумме составляет 183 часа. Также учитывается время, которое Клапан 4477 находился в демонтированном состоянии (0,375 часа = 22 минуты) (Time[3]).

В данном примере рассматривается отказ Смесителя Системы вентиляции салонов. Данный отказ вызван износными нагрузками на Смеситель, рассчитанный на 1500 часов работы и проработавший 1437 часов. По результатам отказа Смесителя в состояние отказ переведены «Салон №1», Система вентиляции салонов и, как следствие, СКИРД. В результате эксплуатация АТ становится невозможной. Включается индикатор «Перегрев воздуха».

Хотя отказ данного смесителя произошел первый раз система вентиляции салонов уже находилась в состоянии отказ (Time[2]) 181 час. Поэтому после восстановления работоспособности смесителя и всей СКИРД в целом время отказа Системы вентиляции салона стала равной 361 часу, увеличившись на 180 часов (179 часов на доставку ЗЧ и час на обнаружение неисправности).

Для анализа процессов функционирования ПИ и АРЗ рассмотрим трассировочную печать для процессов выполнения заявки на производство новых ЗЧ (таблица 4.9.):

Таблица 4.9.

Время	Событие / Состояние
	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 1000 Новая ЗЧ –«Кран наддува 4602» Время производства – 2 Склад назначения – Склад№3
	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 1080 Новая ЗЧ –«Клапан 4477» Время производства – 15 Склад назначения – Склад№3
	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 1160 Новая ЗЧ –«Клапан 4477» Время производства – 15 Склад назначения – Склад№3
	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 1640 Новая ЗЧ –«Смеситель» Время производства – 25 Склад назначения – Склад№3
	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 2120 Новая ЗЧ –«Смеситель» Время производства – 25 Склад назначения – Склад№3
0	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 2168,07692307692 Новая ЗЧ –«Клапан 4672» Время производства – 26 Склад назначения – Склад№3
	Состояние: В производство добавлена новая часть: ПИ – Производство Мощность – 2216,15384615385 Новая ЗЧ –«Клапан 4672» Время производства – 26 Склад назначения – Склад№3
	Состояние: ПИ – Производство Очередь на производство: ЗЧ –«Дроссельная заслонка 5701Т-02»
	Состояние: ПИ – Производство Очередь на производство: ЗЧ –«Дроссельная заслонка 5701Т-02»
	Состояние: ПИ – Производство Очередь на производство: ЗЧ –«Дроссельная заслонка 5701Т-02»
	Состояние: ПИ – Производство Очередь на производство: ЗЧ –«Распределитель»
	Состояние: ПИ – Производство Очередь на производство: ЗЧ –«Распределитель»
	Состояние: ПИ – Производство Очередь на производство: ЗЧ –«Первичный ВВР 4487Т»
2	Событие: ПИ – Производство Мощность – 1216,15384615385 Новая ЗЧ –«Кран

	наддува 4602» Склад назначения – Склад№3 Суммарная стоимость 2000
	Состояние: В производство добавлена новая часть: Дроссельная заслонка 5701Т-02 Мощность предприятия – 1682,82051282051
	Элемент – Кран наддува 4602 Склад Производство
	Событие: Производство ТРАНСПОРТИРОВКА Эл-та Кран наддува 4602 на СКЛАД Склад№3
15	Событие: ПИ – Производство Мощность – 1602,82051282051 Новая ЗЧ –«Клапан 4477» Склад назначения – Склад№3 Суммарная стоимость 3200
	Состояние: В производство добавлена новая часть: Дроссельная заслонка 5701Т-02 Мощность предприятия – 2069,48717948718
	Элемент – Клапан 4477 Склад Производство
	Событие: Производство ТРАНСПОРТИРОВКА Эл-та Клапан 4477 на СКЛАД Склад№3
15	Событие: ПИ – Производство Мощность – 1989,48717948718 Новая ЗЧ –«Клапан 4477» Склад назначения – Склад№3 Суммарная стоимость 4400
	Состояние: В производство добавлена новая часть: Дроссельная заслонка 5701Т-02 Мощность предприятия – 2456,15384615385
	Элемент – Клапан 4477 Склад Производство
	Событие: Производство ТРАНСПОРТИРОВКА Эл-та Клапан 4477 на СКЛАД Склад№3
25	Событие: ПИ – Производство Мощность – 1976,15384615385 Новая ЗЧ – «Смеситель» Склад назначения – Склад№3 Суммарная стоимость 16400
	Элемент – Смеситель Склад Производство
	Событие: Производство ТРАНСПОРТИРОВКА Эл-та Смеситель на СКЛАД Склад№3
25	Событие: ПИ – Производство Мощность – 1496,15384615385 Новая ЗЧ – «Смеситель» Склад назначения – Склад№3 Суммарная стоимость 28400
	Состояние: В производство добавлена новая часть: Распределитель Мощность предприятия – 2058,65384615385
	Элемент – Смеситель Склад Производство
	Событие: Производство ТРАНСПОРТИРОВКА Эл-та Смеситель на СКЛАД Склад№3

В момент поступления заявки на производство (модельное время = 0) происходит занесение всех производимых ЗЧ в очередь. Далее из очереди выбираются ЗЧ, согласно их приоритету. В данном примере все ЗЧ имеют одинаковый приоритет. В результате ПИ параллельно производит 7 различных ЗЧ. Каждая ЗЧ, добавляемая в производство увеличивает потребляемую мощность ПИ (до 2216 руб/час). В результате ограничение на мощность ПИ (2500 руб/час) не позволяет запустить в производство сразу все ЗЧ из заявки. Первой ЗЧ, произведенной ПИ, является Дроссельная заслонка 5701Т-02. Ее производство закончилось через 2 часа, увеличив суммарную стоимость произведенных ЗЧ на 2000 руб. В результате окончания производства Дроссельная заслонка 5701Т-02 помещена на склад ПИ и организуется ее перевозка на склад назначения: «Склад №3», а потребляемая мощность предприятия уменьшилась на 1000 руб/час (было 2216, стало 1216), тем самым позволило запустить в производство Дроссельную заслонку 5701Т-02 (мощность возросла до 1682 руб/час).

4.2.2. Результаты верификации КВИМ.

Для анализа результатов моделирования необходимо сформировать заявку на производство новых ЗЧ, для устранения всех отказов. Для этого запустим модель (1000 реализаций) в режиме неограниченного числа ЗЧ на каждом складе АЧ.

В результате при условии неограниченности ЗЧ оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ равным 0,926, а оценка математического ожидания стоимости восстановления ЗЧ на АРЗ 61 тыс. руб., стоимости транспортировки 257 тыс. руб. и з/п персонала одной бригады сервисного центра 2,6 млн. руб. в год. Математическое ожидание времени эксплуатации АТ 920 часов за 1 год эксплуатации (8760 часов). В результате сформируем заявку на производство ЗЧ (таблица 4.10):

Таблица 4.10.

Тип ЗЧ	Количество ЗЧ			Склад ТЦ
	АЧ №1	АЧ №2	Итого	
АРТ-56-2	0	1	1	Склад №3
Дроссельная заслонка 5701Т-02	0	1	1	Склад №3
Клапан 4477	2	3	5	Склад №3
Клапан 4672	1	3	4	Склад №3
Клапан 5102	0	2	2	Склад №3
Кран наддува 4602	2	2	4	Склад №3
Первичный ВВР 4487Т	1	2	3	Склад №3

Распределитель	1	2	3	Склад №3
Система охлаждения ВСУ	1	2	3	Склад №3
Смеситель	1	1	2	Склад №3
Турбохолодильник	1	2	3	Склад №3

Проведем 1000 прогонов КВИМ с учетом составленной заявки на производство. В результате множества реализаций оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ равно 0,6615 (дисперсия (D) 0,117 доверительный интервал оценки математического ожидания (0,644; 0,679)), а оценка математического ожидания стоимости мероприятий ППО 5,8 млн. руб (D=8,875 Ib(5,644; 5,955)). Хранение =305 тыс. руб. Производство =1,4 млн. руб. АРЗ =1,08 млн. руб. Транспорт =321 тыс. руб. Персонал =2,6 млн. руб.

Для анализа принятого решения рассмотрим временные диаграммы частот потребления, хранения ЗЧ, а также задержек при производстве и восстановлений для определения недостатка или избытка в ЗЧ.

Рассмотрим ЗЧ «АРТ-56-2». На рисунках по горизонтальной оси располагается модельное время, а по вертикальной математическое ожидание случайной величины за интервал, вычисленное по 1000 реализациям КВИМ.

По графикам (рис 4.3-4.6) видно, что отказы «АРТ-56-2» в НС СКирД возникают не раньше второго месяца (1440 часов) эксплуатации. Для восстановления первых отказов данной СЧ АТ используются ЗЧ, хранящиеся на складе №3, которые транспортируются на склады АЧ (рис 4.3,4.4). Математическое ожидание общего количества ЗЧ «АРТ-56-2» по результатам моделирования установилось в значении 0,3 что не позволяет устранить все возникающие отказы. Математическое ожидание количества отказавших частей «АРТ-56-2» после года эксплуатации достигает 3 штук. Рассмотрим влияние параметров КВИМ на процессы, происходящие с «АРТ-56-2» СКирД .

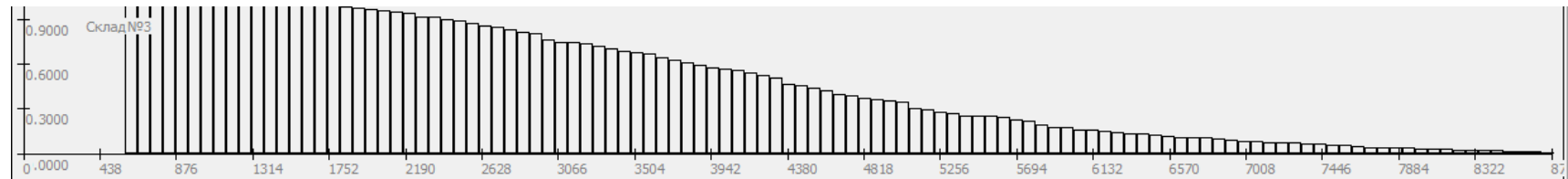


Рис 4.3. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «АРТ-56-2» на складе №3 ТЦ.

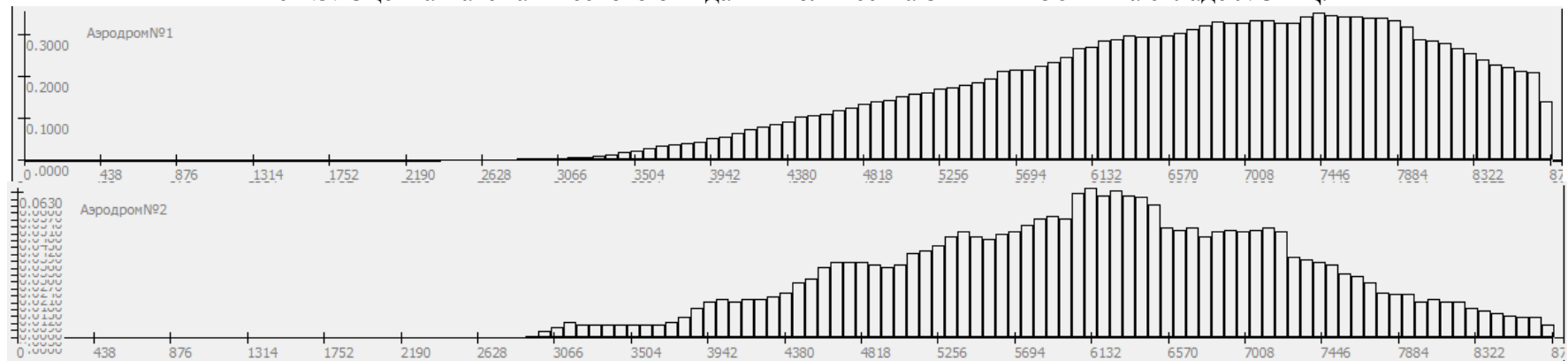


Рис 4.4. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «АРТ-56-2» на складах АЧ

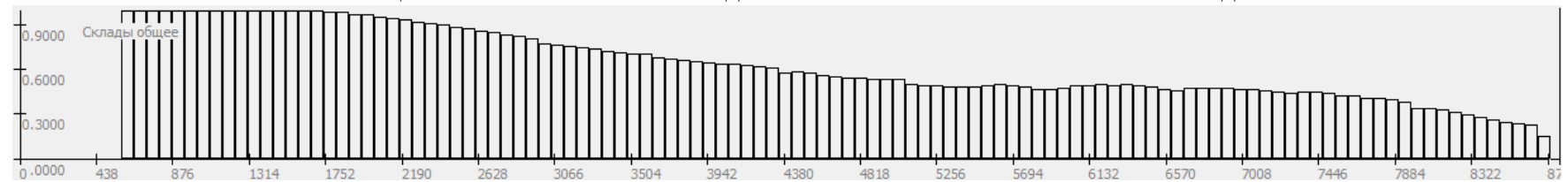


Рис 4.5. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «АРТ-56-2» на всех складах сервисного центра.

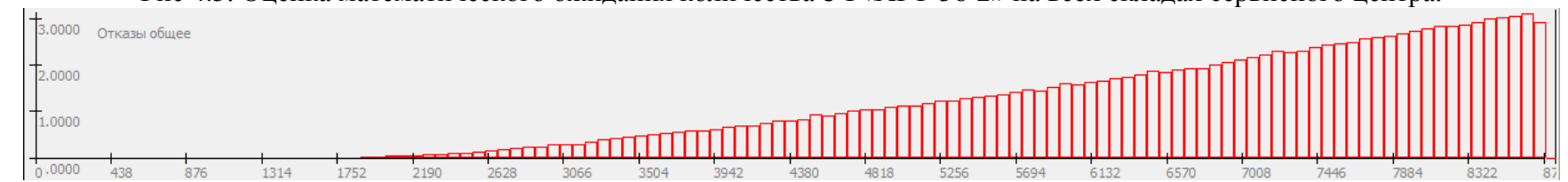


Рис 4.6. Оценка математического ожидания количества отказов «АРТ-56-2» в парке АТ

Сводная таблица параметров СППО для различных вариантов верификации. В столбцах указана оценка математического ожидания стоимости в млн. рублей и оценка математического ожидания коэффициента готовности.

Таблица 4.11.

№	Кг	Стоимость ППО	Хранение	Пр-во	АРЗ	Транспорт	Персонал
1	0,6615 (D=0,0362 Ib(0,652; 0,671))	5,8	0,305	1,4	1,08	0,321	2,6
2	0,6652 (D=0,0613 Ib(0,652; 0,678))	6,3	0,578	1,9	0,83	0,357	2,6
3	0,6679 (D=0,0968 Ib(0,652; 0,684))	5,98	0,533	1,9	0,54	0,372	2,6
4	0,620 (D=0,0793 Ib(0,605; 0,635))	6,2	0,471	1,9	0,88	0,385	2,6
5	0,3465 (D=0,0373 Ib(0,336; 0,357))	7,271	0,408	1,9	1,84	0,5	2,6

Изменение количества ЗЧ в заявке на производство.

Увеличим количество ЗЧ «АРТ-56-2» на складе №3 до 5 шт. Ожидается уменьшение количества отказов и увеличения количества ЗЧ «АРТ-56-2», хранящихся на складах ТЦ. На рисунках (рис. 4.7) видно снижение оценки математического ожидания количества отказов части «АРТ-56-2» СКирД: до одной отказавшей части (на каждом экземпляре АТ их три) к концу года эксплуатации. В результате увеличилась и оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ. «Пилообразный» график оценки математического ожидания количества отказов (рис.4.7) обусловлен проведением ежемесячных ТО АТ. При ТО происходит обнаружение отказов и восстановление работоспособности АТ. Из-за увеличения количества производимых ЗЧ время производства (рис 4.8) увеличилось до 300 часов (11 дней), но данный факт не сыграл существенную роль, так как отказы начались только после второго месяца эксплуатации АТ. При этом оценка математического ожидания стоимости произведенных ЗЧ увеличилась на 500 тыс.руб. При этом процессы ожидания в очереди АРЗ (рис 4.9) существенно сказывается на времени восстановления «АРТ-56-2», так как оно доходит до одного месяца (720 часов) и одновременно до 3-х частей «АРТ-56-2» ожидают восстановления в очереди.

Изменение мощностных параметров производства и восстановления.

Увеличим производственную мощность АРЗ №1 в 5 раз (до 2500 руб/час). В результате АРЗ №1 сможет восстанавливать одновременно до 5 отказавших частей «АРТ-56-2» (потребляемая мощность АРЗ на восстановление одного «АРТ-56-2» равна 450), а следовательно ожидается уменьшение оценки математического ожидания времени ожидания отказавших частей в очереди АРЗ. Оценка математического ожидания времени ожидания ЗЧ в очереди АРЗ (рис 4.10) уменьшилось в 2 раза, а количество элементов, ожидающих восстановления в очереди снизилось до одного. В результате немного увеличилось количество ЗЧ, участвующих в обороте, что привело к уменьшению оценки математического ожидания расходов на восстановление отказавших СЧ АТ.

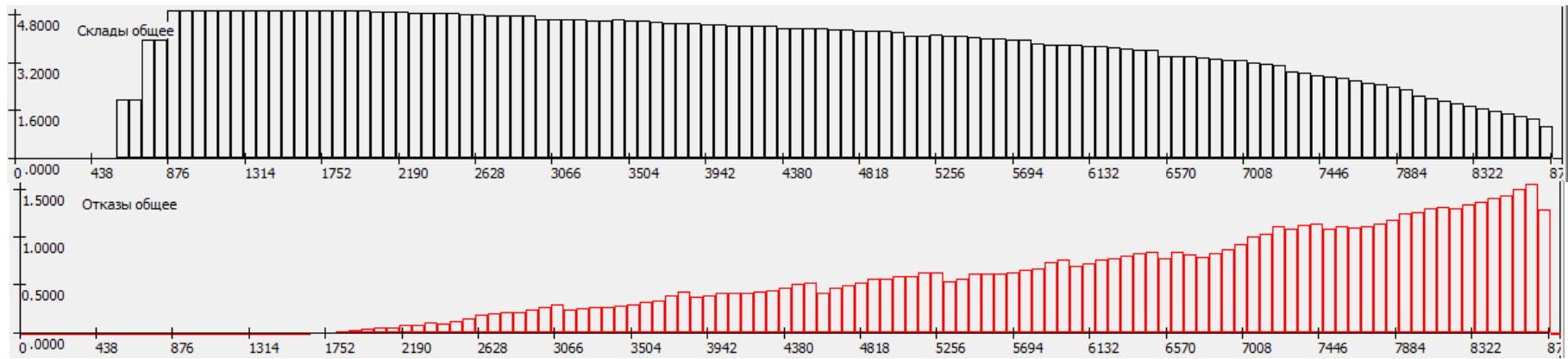


Рис 4.7. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «АРТ-56-2» на всех складах СЦ и количество отказов «АРТ-56-2» в парке АТ

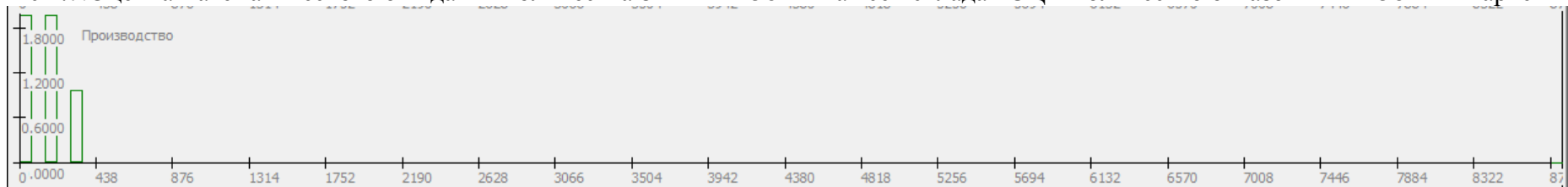


Рис 4.8. Оценка математического ожидания задержки времени производства новых ЗЧ «АРТ-56-2» на ПИ

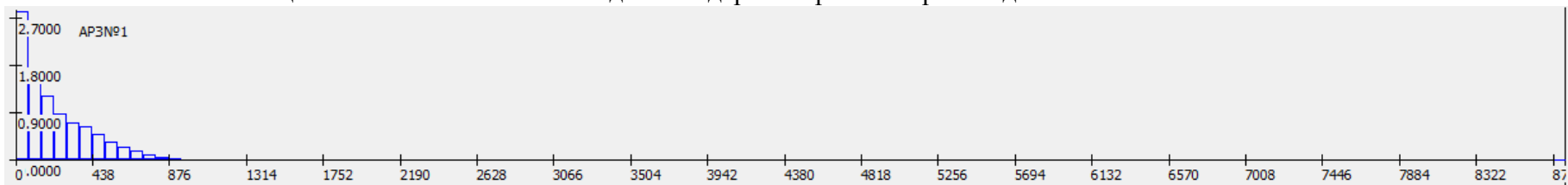


Рис 4.9. Оценка математического ожидания задержки времени восстановления отказавших «АРТ-56-2» на АРЗ №1 (мощность 500 руб/час)

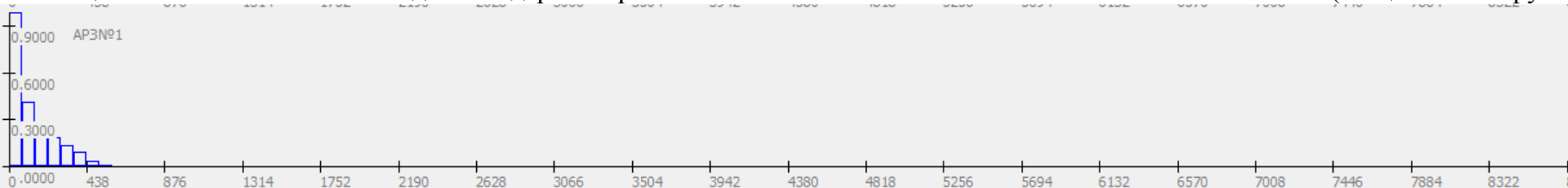


Рис 4.10. Оценка математического ожидания задержки времени восстановления отказавших «АРТ-56-2» на АРЗ №1 (мощность 2500 руб/час)

Изменение приоритетов очередности производства.

Изменим приоритет производства ЗЧ «АРТ-56-2» на ПИ с максимального на минимальный, то есть производиться ЗЧ «АРТ-56-2» будут после производства всех остальных ЗЧ, или если будет необходимая свободная мощность ПИ. Ожидается задержка в поступлении ЗЧ «АРТ-56-2» на склады ТЦ и, как следствие, отсутствие устранения отказов данной части. По графикам (рис 4.11-4.13) видно, что из-за изменения очередности производства, ЗЧ «АРТ-56-2» поступила на склады ТЦ после первых отказов, что вызвало задержку в восстановлении работоспособности АТ на 1700 часов (2,5 месяца). При поступлении на склады ТЦ ЗЧ «АРТ-56-2» сразу же транспортировалась на склад АЧ, в которой имелся отказавший экземпляр АТ (количество ЗЧ на складах ТЦ равно 4). Значение оценки математического ожидания коэффициента готовности уменьшилось, так как до поставки ЗЧ «АРТ-56-2» на склады ТЦ происходили отказы данной СЧ АТ, при этом оценка математического ожидания стоимости ППО не изменилась.

Изменение количества вылетов АТ.

Увеличим количество вылетов АТ в 2 раза, то есть в течение года количество вылетов АТ будет определяться случайной величиной, равномерно распределенной на интервале (400; 600). Как видно из графика оценка математического ожидания количества отказов возросло в 2 раза, в результате в 2 раза уменьшилась оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ. (рис 4.14). Так как отказов происходит много, то множество отказавших СЧ АТ попадают на АРЗ и в результате затраты на восстановления отказавших СЧ АТ возросли более чем в 2 раза. По причине постоянной потребности в ЗЧ уменьшились затраты на хранение ЗЧ на складах ТЦ, но увеличились затраты на транспортировку ЗЧ.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о правильности реакции КВИМ на изменение ее параметров.

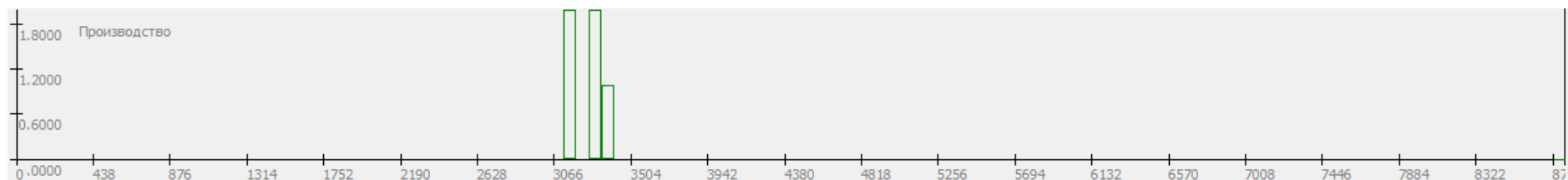


Рис 4.11. Оценка математического ожидания задержки времени производства новых ЗЧ «АРТ-56-2» на ПИ при изменении приоритетов

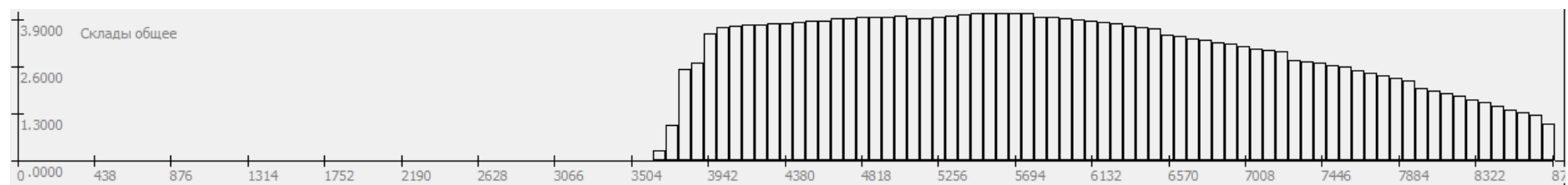


Рис 4.12. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «АРТ-56-2» на складах сервисного центра.(изменение приоритетов в очереди)

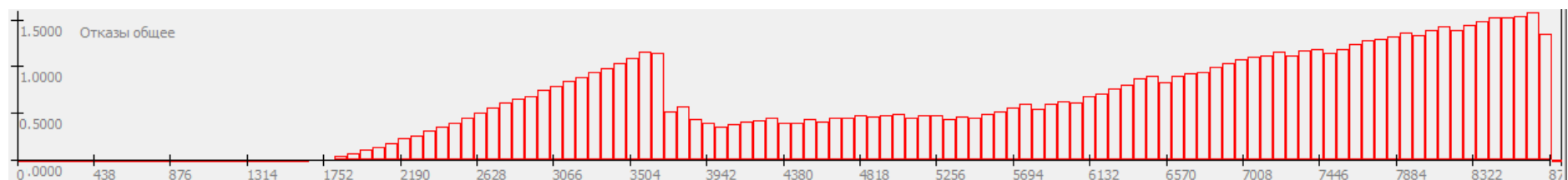


Рис 4.13. Оценка математического ожидания количества отказов «АРТ-56-2» в парке АТ. (изменение приоритетов в очереди ПИ)

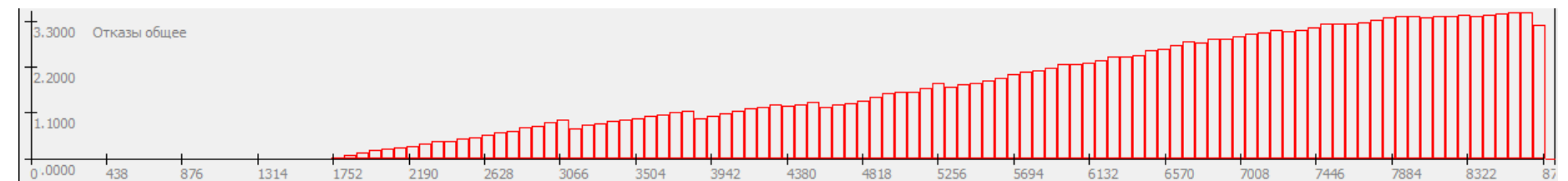


Рис 4.14. Оценка математического ожидания количества отказов «АРТ-56-2» в парке АТ. Увеличенная интенсивность эксплуатации АТ.

4.3. Результаты работы СППР на основе ММК.

4.3.1 Результаты верификации СППР с заданным числом прогонов ММК.

СППР позволяет определять Паретто-оптимальное множество рациональных решений, которые заключаются в составлении различных заявок на производство. Для поиска решений множества Паретто. ММК перемещает агентов с целью увеличения оценки математического ожидания коэффициента готовности парка АТ.

Параметры ММК для работы СППР приведены в таблице 4.12:

Таблица .4.12.

Параметр	Значение
Количество агентов в группе	3
Коэффициент «Элитного ММК»	3
Максимальный вес для критерия: Кг	1
Максимальный вес для критерия: стоимость ППО	$6 \cdot 10^7$
Коэффициент перевода частот требований ЗЧ	1200
Коэффициент испарения «Веса» для критерия: Кг	0,5
Коэффициент испарения «Веса» для критерия: стоимость ППО	0,5

Агент по результатам пройденного пути и необходимого количества прогонов КВИМ в среднем занесет 150-180 ($K_g=0,6$) единиц «веса» «коэффициент готовности» на каждую вершину пути, что соответствует частоте требований 0,15 при начальном занесении «весов» на ГР. Коэффициент испарения примем равным 0,5» для того чтобы в вершинах ГР, выбранных «элитным» (прошедшим самый лучший путь) агентом «вес» уменьшался и последующие итерации ММК позволяли искать лучшее решение, а не близкое к выбранному.

Для вычисления значений критериев для нового решения (агент по ГР может пройти путь, по которому не перемещался не один из предыдущих агентов) выполняются 1000 прогонов КВИМ и вычисляются оценки математических ожиданий необходимых величин. После выполнения прогонов определяются оценки математических ожиданий значений критериев: коэффициента готовности парка АТ и стоимости мероприятий МТО ППО. В зависимости от полученных значений (после прохождения пути и последующих запусков КВИМ другими двумя агентами (т.к. количество агентов в группе равно 3)) происходит изменение «весов» вершин ГР: увеличение «веса» путем добавления его на путь агента и уменьшения «весов» вершин во всем ГР путем его испарения.

Запустим 10 прогонов ММК для вычисления множества Паретто. Время проведения 10 прогонов ММК на тестовом примере составило 1 час 45 минут, а выделенная память равна 7Мб. Параметры ММК приведены на рис 4.15:

Рис. 4.15. Параметры ММК

По результатам 1000 прогонов КВИМ в режиме неограниченного числа ЗЧ на складах АЧ сформирован ГР, приведенный на рис 4.16. Объем полного перебора для данного ГР составляет $1,75 \cdot 10^9$ возможных решений.

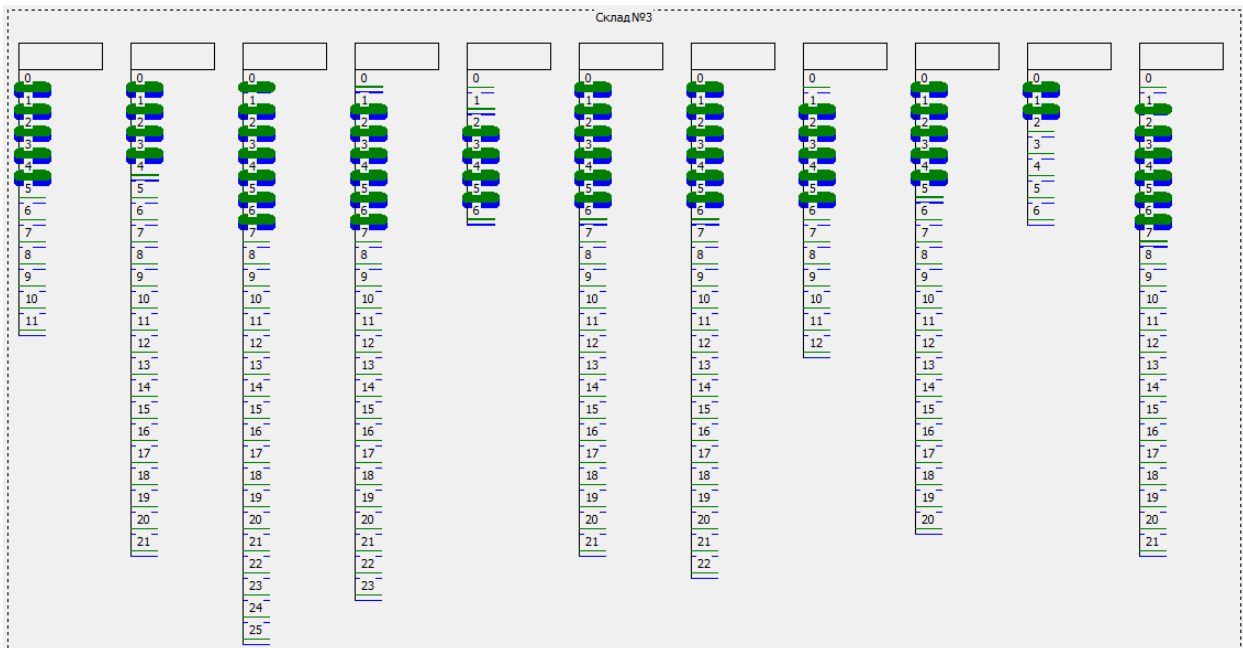


Рис 4.16. ГР, сформированный по результатам 1000 прогонов КВИМ в режиме неограниченного числа ЗЧ на складах АЧ

После проведения 10 прогонов ММК (в каждом прогоне участвовало 3 агента, общее число агентов равно 30) определено 25 различных решений (менее 0,0002%) и составлено Паретто-оптимальное множество (рис 4.17).

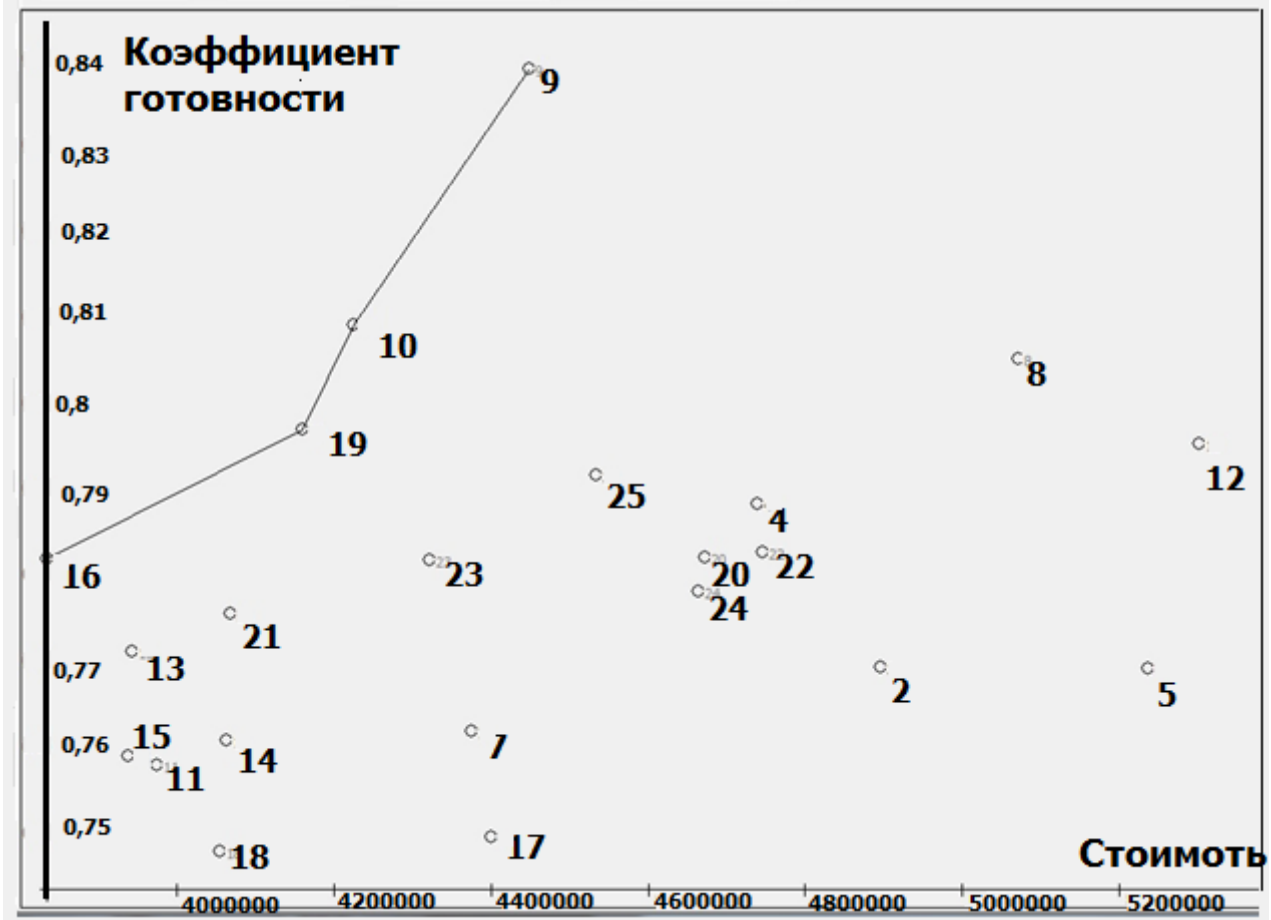


Рис 4.17. Множество решений, полученное в результате работы ММК.

Решения из множества Паретто приведены в таблице 4.13:

Таблица 4.13.

№ решения	Тип ЗЧ	Кол-во ЗЧ	Склад назначения
9	АРТ-56-2	4	Склад №3
	Дроссельная заслонка 5701Т-02	1	
	Клапан 4477	4	
	Клапан 4672	5	
	Клапан 5102	3	
	Кран наддува 4602	5	
	Первичный ВВР 4487Т	3	
	Распределитель	2	
	Система охлаждения ВСУ	8	
	Смеситель	0	
	Турбохолодильник	2	
10	АРТ-56-2	2	Склад №3

	Дроссельная заслонка 5701Т-02	1	
	Клапан 4477	2	
	Клапан 4672	5	
	Клапан 5102	3	
	Кран наддува 4602	2	
	Первичный ВВР 4487Т	3	
	Распределитель	2	
	Система охлаждения ВСУ	1	
	Смеситель	0	
	Турбохолодильник	2	
19	АРТ-56-2	2	Склад №3
	Дроссельная заслонка 5701Т-02	1	
	Клапан 4477	2	
	Клапан 4672	3	
	Клапан 5102	3	
	Кран наддува 4602	2	
	Первичный ВВР 4487Т	3	
	Распределитель	3	
	Система охлаждения ВСУ	1	
	Смеситель	0	
	Турбохолодильник	2	
16	АРТ-56-2	2	Склад №3
	Дроссельная заслонка 5701Т-02	1	
	Клапан 4477	2	
	Клапан 4672	3	
	Клапан 5102	3	
	Кран наддува 4602	2	
	Первичный ВВР 4487Т	3	
	Распределитель	3	
	Система охлаждения ВСУ	1	
	Смеситель	0	
	Турбохолодильник	2	

Значение оценок математических ожиданий критериев для полученных решений:

Таблица 4.14.

№ решения	M(Кг)	M(стоимость ППО)
9	0,835	4,7 млн. руб.
10	0,809	4,25 млн. руб.
19	0,795	4,2 млн. руб.
16	0,78	3,9 млн. руб.

В результате решение №9, полученное ММК лучше расчетного решения, принятого в главе 4.2.2 по обоим критериям: обеспечивает большее значение оценки математического ожидания коэффициента готовности парка АТ и при этом минимальную оценку математического ожидания стоимости мероприятий МТО ППО. По результатам работы ММК оптимальным решением выбирается решение №9.

Итоговый ГР и путь агента, определяющее решение №9 в данном графе приведены на рисунке 4.18. Пунктиром выделяются ЗЧ, которые необходимо отправить на один склад, каждый прямоугольник определяет Тип ЗЧ, а набор линий под ним значение количества ЗЧ на складе ТЦ. Толщина линий определяет «вес» вершины «Количество ЗЧ» графа решений (зеленый – «вес» для критерия «Коэффициент готовности», синий – «вес» для критерия «Стоимость мероприятий МТО ППО»).

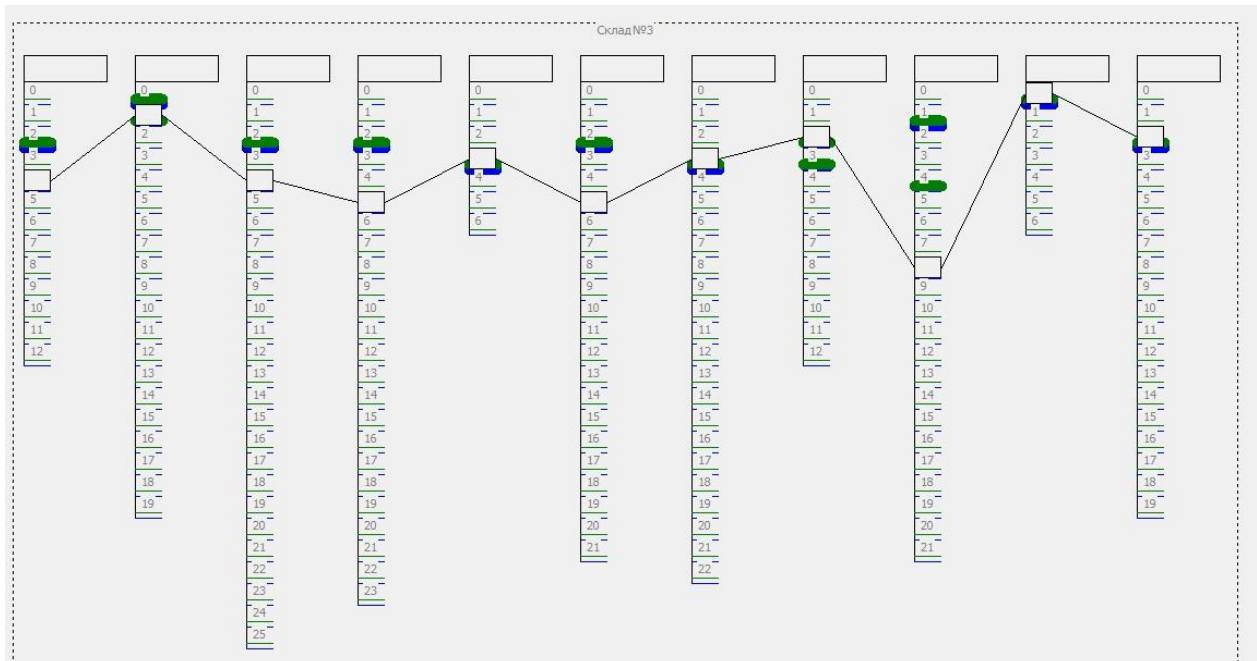


Рис 4.18. Итоговый ГР и путь агента, определяющее решение №9.

4.3.2 Технологический процесс работы ЛПР с СППР.

Процесс формирования решения СППР при помощи ЛПР состоит из трех этапов:

1. Формирование Паретто-оптимального множества решений с помощью ММК.

2. Выборка решения из Паретто-оптимального множества с помощью его визуализации.
3. Оптимизация выбранного решения путем рассмотрения временных диаграмм процессов МТО ППО, происходящих в КВИМ.

Для приведенного выше примера, после 10-ти прогонов ММК, благодаря визуализации множества Паретто всех решений видно, что решение №9 обеспечивает наилучшее значение оценки математического ожидания критерия «Коэффициент готовности парка АТ» (0,679) при умеренных затратах на мероприятия МТО ППО (5,413 млн. руб.). При детальном анализе выбранного решения №9 заметно, что в заявке на производство находится большое число ЗЧ «Система охлаждения ВСУ», 8 штук. Для анализа целесообразности заказа на производство такого количества ЗЧ проведем 1000 прогонов КВИМ с целью получения временных диаграмм для данной ЗЧ. Данные диаграммы приведены на рисунках 4.19 и 4.20.

Из графиков видно, что количество ЗЧ «Система охлаждения ВСУ» в заявке на производство для ПИ может быть сокращено до 6-х штук. В результате оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ не изменился, а оценка математического ожидания стоимости мероприятий МТО ППО уменьшилось на 150 тыс. руб.

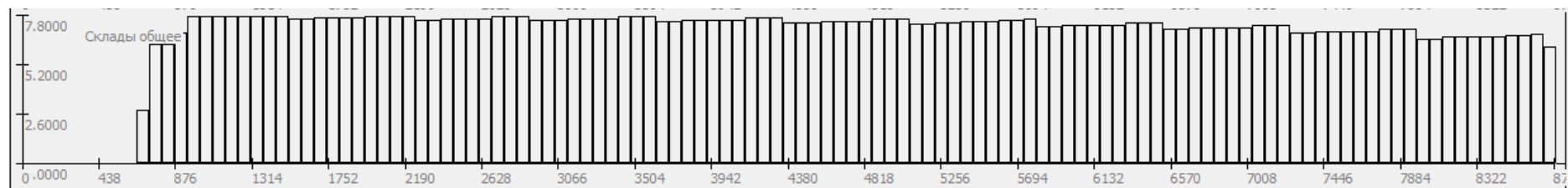


Рис 4.19. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «Система охлаждения ВСУ» на всех складах сервисного центра при решении

№9

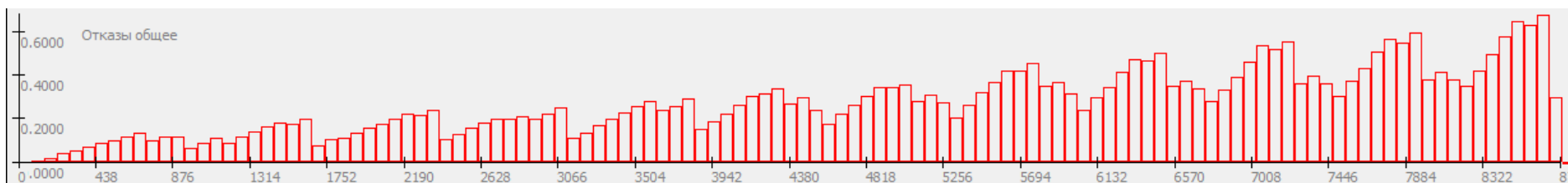


Рис 4.20. Оценка математического ожидания количества отказов «Система охлаждения ВСУ» в парке АТ при решении №9

	2	5701Т-02		2		4487Т				сть		
1	1	0	3	6	1	2	1	2	1	3,7 6	0,7 52	0,8 41
2	0	0	5	6	3	1	1	2	1	3,6 2	0,7 9	0,8 49
3	0	0	5	6	3	2	3	1	1	3,4 4	0,7 6	0,8 50

В результате ММК быстро нашел решение удовлетворяющее завершающим условиям. Это решение позволило улучшить найденное с помощью ЛПР. Но в случае, если завершающие условия ставятся очень «жесткими», ММК может заикнуться и остановка работы ММК не произойдет. Время работы ММК составило около 1 часа.

4.3.4. Анализ параметров ММК, устанавливаемых для работы СППР с заданными завершающими условиями.

Алгоритм муравьиных колоний имеет параметры (количество муравьев в итерацию, количество феромона, коэффициент испарения), от которых зависит скорость сходимости данного алгоритма. В данном разделе проведен анализ скорости сходимости алгоритма при различных значения данных параметров.

Скорость сходимости алгоритма вычислялась путем определения количества итераций алгоритма до момента нахождения решения, удовлетворяющего завершающим условиям. Для сбора статистики по скорости сходимости проводилось 30 подобных прогонов и вычислялась оценка математического ожидания количества итераций. Для оценки времени моделирования можно учесть, что 500 прогонов КВИМ в среднем требуют 90 секунд машинного времени. Значение завершающих условий были выставлены следующие: коэффициент готовности не меньше 0,815 и стоимость МТО ППО не больше 4,5 млн руб.

Рассмотрим влияние изменения количества агентов на скорость сходимости ММК. Остальные параметры ММК приведены ниже (таблица 4.17):

Таблица 4.17.

Параметр		Значение
Тип ММК		Ранжированный
Коэффициент ранга		3
Критерий –	Количество феромона	1
Коэффициент готовности	Коэффициент испарения	0,5
Критерий –	Количество феромона	60000000
Стоимость	Коэффициент испарения	0,5
Коэффициент отображения частот		1200

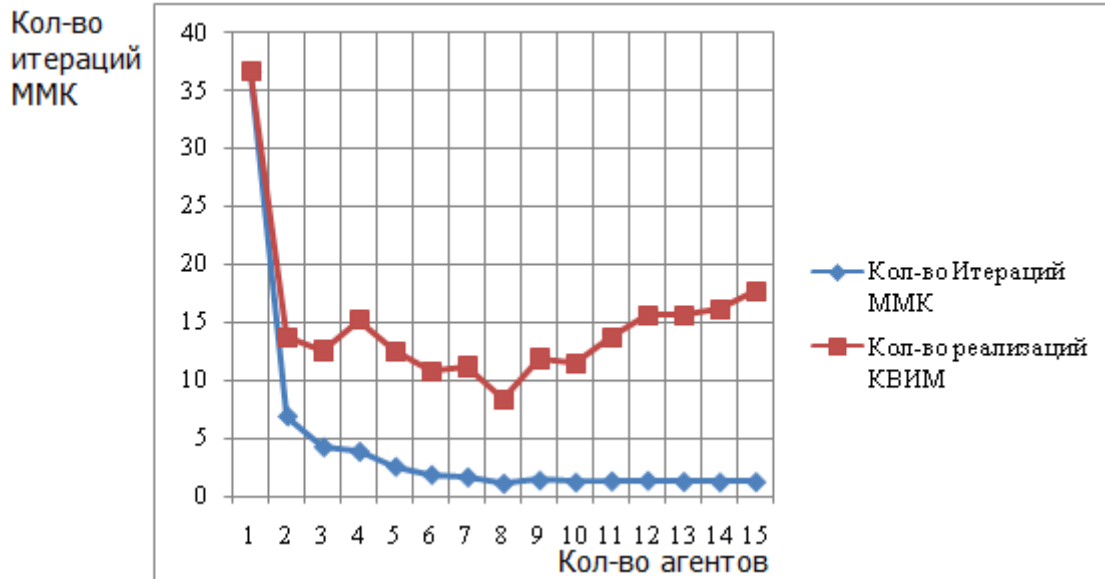


Рис 4.22. Влияние количества агентов на скорость сходимости ММК.

На рисунке 4.22 оценка математическое ожидание количества итераций ММК, необходимых для нахождения решения, удовлетворяющего завершающим условиям. Из данного рисунка видно, что увеличение количества агентов на итерации уменьшает количество итераций. Но при этом каждый агент находит решение, для которого проводится 500 прогонов КВИМ (что составляет основные временные затраты). При увеличении количества агентов на итерации увеличивается и время выполнения самой итерации, за счет большего количества прогонов КВИМ. В результате оптимальным будет применить от 6 до 8 агентов на итерации, что обеспечит минимальное количество прогонов КВИМ.

Рассмотрим влияние изменения количества феромона у агента на скорость сходимости ММК. Остальные параметры ММК приведены ниже (таблица 4.18):

Таблица 4.18.

Параметр	Значение	
Тип ММК	Ранжированный	
Коэффициент ранга	3	
Количество агентов	3	
Критерий – Коэффициент готовности	Коэффициент испарения	0,5
Критерий – Стоимость	Количество феромона	60000000
	Коэффициент испарения	0,5
Коэффициент отображения частот	1200	

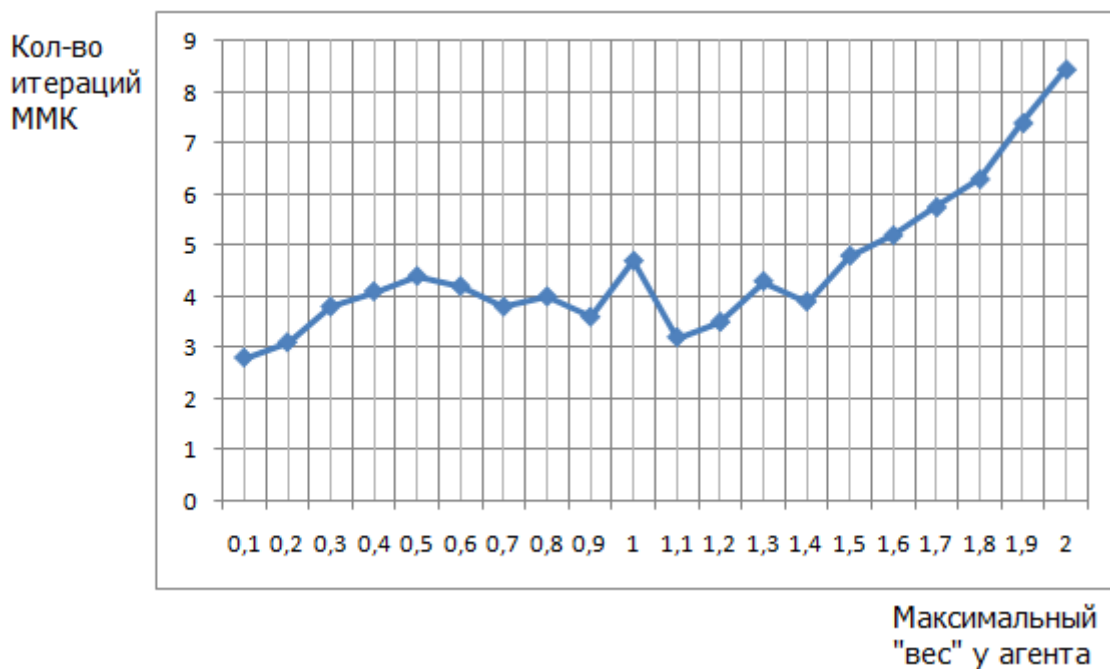


Рис 4.23. Влияние количества феромона у агента на скорость сходимости ММК.

На рисунке 4.23 видно, что количество итераций ММК увеличивается с увеличением количества феромона у агента. При этом на графике заметно, что при количестве феромона до 1,5 количество итераций ММК колеблется в пределах от 4 до 5, а далее монотонно увеличивается. Это обусловлено тем, что максимальное значение критерия «коэффициент готовности» равно 1. Дальнейшее увеличение количества феромона у агента приведет к еще большему увеличению количества итераций.

Рассмотрим влияние изменения коэффициента испарения на скорость сходимости ММК. Остальные параметры ММК приведены ниже (таблица 4.19):

Таблица 4.19.

Параметр	Значение	
Тип ММК	Ранжированный	
Коэффициент ранга	3	
Количество агентов	3	
Критерий – Коэффициент готовности	Количество феромона	1
Критерий – Стоимость	Количество феромона	60000000
	Коэффициент испарения	0,5
Коэффициент отображения частот	1200	

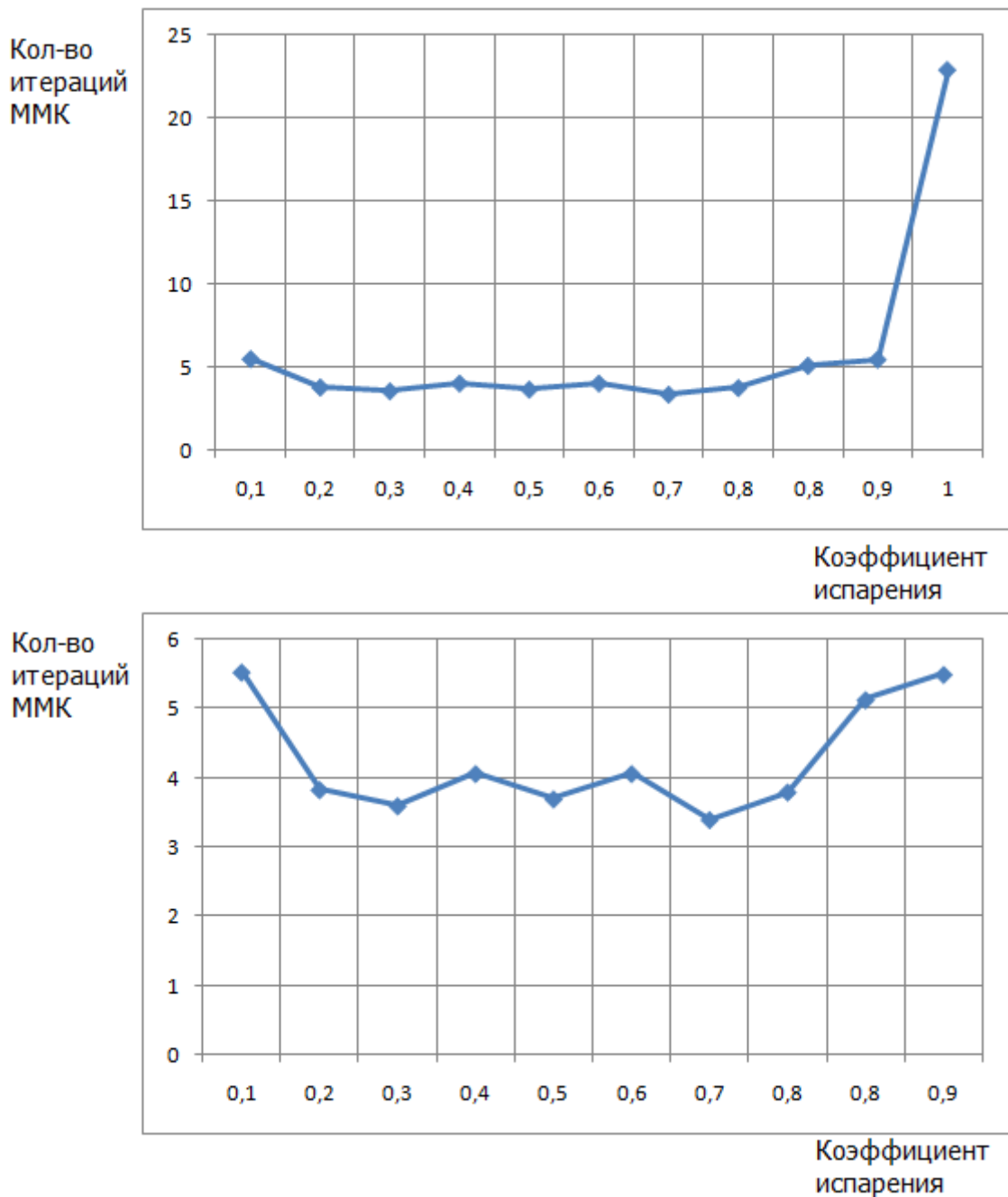


Рис 4.24. Влияние коэффициента испарения на скорость сходимости ММК.

Коэффициент испарения изменяется в пределах от 0 до 1. При установке коэффициента испарения в 0 – весь «вес» с вершин графа будет испарен, и ММК не будет работать. А при коэффициенте испарения равным 1 все «веса» на вершинах графа решений будут сохранены. На рисунке 4.24 показано изменение математического ожидания количества итераций ММК при изменении коэффициента испарения. При больших значениях коэффициента испарения агенты чаще проходят по путям, дающим небольшое значение критерия коэффициента готовности, что приводит к увеличению количества итераций. При

значениях коэффициента испарения близких к 0, почти весь «вес» с вершин графа убирается, что замедляет работу ММК. Рекомендуется устанавливать данный показатель близким к 0,5.

4.3.5. Результаты верификации СППР на модели обслуживания парка самолетов Су-27 на территории РФ.

Для верификации разработанной СППР и КВИМ разработан пример, описывающий парк АТ СУ-27, близкий к реальному, базирующихся на территории России. Вся информация взята из открытых источников [46]. Количество АТ, а так же НС АТ задавались близкими к реальным.

В данном примере имеется 14 аэродромов, на которых базируются 75 АТ СУ-27. Полный список аэродромов приведен в таблице 4.20:

Таблица 4.20

Название аэропорта	Название АЧ	Количество экземпляров АТ
Буденовск	АГ6972	5
Мариновка	2ОРАЭ	6
Домна	120ИАП	3
Дорохово	611ИАП	7
Лебяжье	1ГИБАП	4
Липецкий авиацентр	968ИИСАП	5
Мончегорск	98ОСАП	5
Килпъявр	9ИАП	8
Степь	266ШАП	7
Бесовец	7000а/б	4
Североморск-3	279КИАП	6
Сиверский	67БАП	5
Хотилово	АГ6972	3
Шагол	6980АвБ	7

АТ, а так же их составные части находятся в различных состояниях и имеют различное значение наработки на отказ. В состоянии отказа на момент запуска модели находятся 20% СЧ АТ. Это вызвало неработоспособность 5 экземпляров АТ к началу запуска модели.

Для восстановления СЧ АТ имеются 3 АРЗ: АРЗ №218, на котором ремонтируются простые детали, АРЗ №121 для сложных деталей и АРЗ №514, который может ремонтировать все СЧ АТ (в рассматриваемой НС АТ). Производство новых ЗЧ для АТ

осуществляется на Иркутском авиастроительном заводе. Часть транспортного графа для данного примера приведена на рис 4.25.

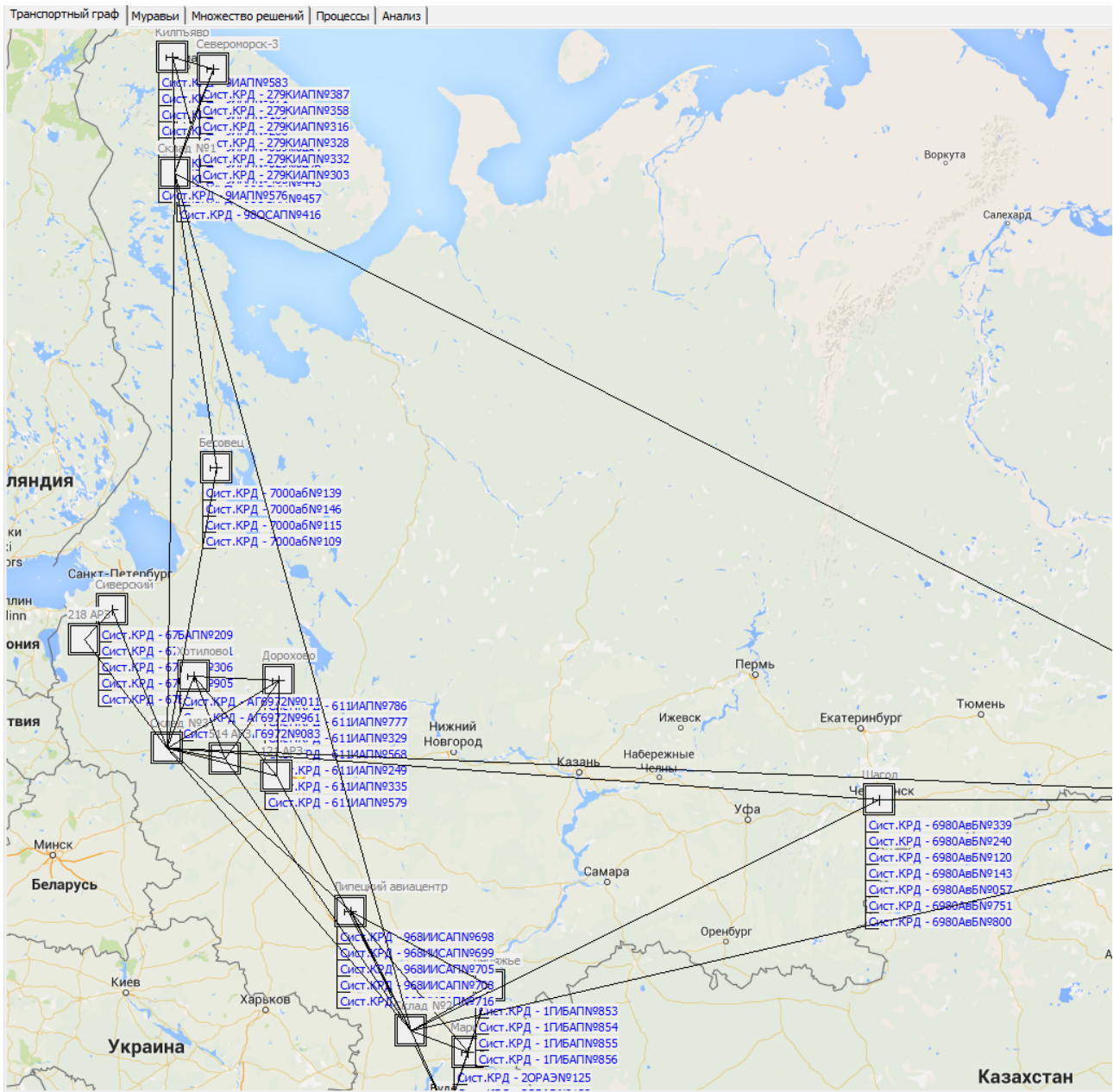


Рис 4.25. Европейская часть транспортного графа.

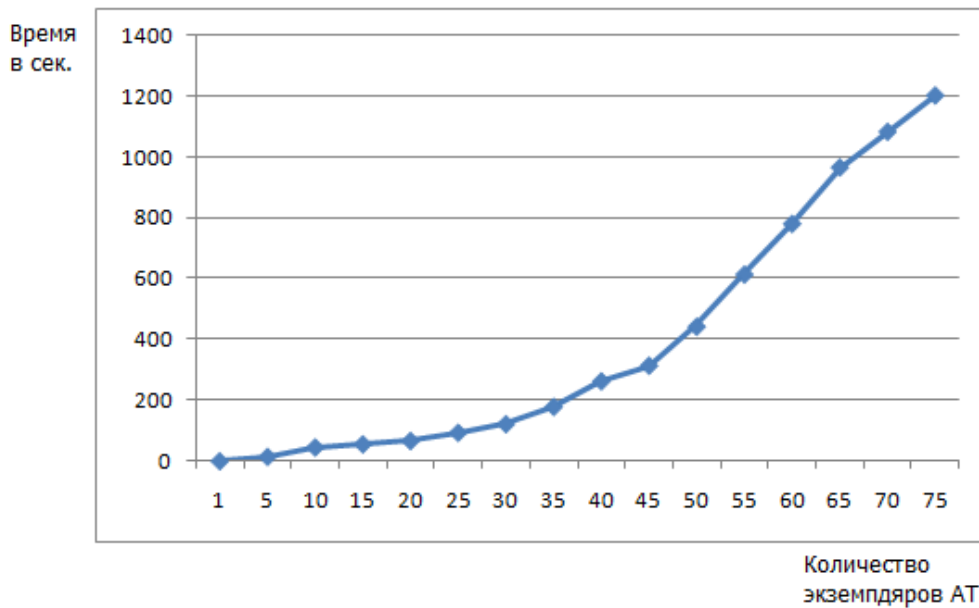


Рис 4.26. График зависимости времени прогона КВИМ от размерности парка АТ

Моделирование проводилось на сроке в 1 год (8760 часов). В течение года количество каждый экземпляр АТ должен совершить 10-12 вылетов. Время проведения одного прогона КВИМ в режиме неограниченного числа ЗЧ на складах технического центра составляет 20-25 минут машинного времени. (рис 4.26) За это время в КВИМ происходит обработка более 135000 модельных событий. ГР состоит из 516 вершин, распределенным по 74 слоям. Объем полного перебора превысил 10^{46} возможных решений. ЗЧ хранятся на 3-х консигнационных складах и складе АРЗ №218.

Время выполнения прогона КВИМ с учетом ограничений на имеющиеся ЗЧ составляет 40-50 минут, при этом обрабатывается 105000 модельных событий. Для случая 50-100 вылетов АТ в течение года время проведения одного прогона КВИМ составит те же 40-50 минут машинного времени. При этом обрабатывается более 230000 модельных событий.

В условиях неограниченного количества ЗЧ оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ составила 0,724. Данное значение является максимальным для СППО и отличается от 1 в силу того, что необходимо время на обнаружение и устранение отказов. В рассмотренных, во время работы ММК, 25 решений лучшим значением критерия оценка математического ожидания коэффициента готовности стала 0,272. При нормализации данного значения (приняв что максимальное значение 0,724) данная оценка станет равной 0,376. Такое низкое значение данной оценки обусловлено полным отсутствием ЗЧ на складах ТЦ и, как следствие, задержки на производстве и транспортировки необходимых ЗЧ.

Данный пример разработан для проверки работоспособности системы на моделях с объемами данных, близкими к реальным. Так 100 прогонов КВИМ в режиме неограниченного числа ЗЧ на складах АЧ с целью создания графа решений занимают 35 часов машинного времени. Решением данной проблемы является возможность распараллеливания процесса реализации необходимого количества прогонов КВИМ на различных вычислительных устройствах в процессе работы ММК.

4.3.6. Результаты верификации СППР на модели обслуживания неисправного парка самолетов Су-27 с целью эффективного распределения ограниченных средств.

Основное отличие данного примера от примера, представленного в пункте 4.3.6 тем, что в данном примере неисправны 70% парка АТ, а 90% парка имеют различные отказавшие части. В результате остро встает проблема нехватки бюджета для восстановления работоспособности всей АТ. Задачей ММК является распределение ограниченного бюджета для восстановления работоспособности наибольшему числу АТ.

Время прогона для случая, когда мощность ремонтных заводов не изменилось (относительно тестового примера из раздела 4.2.2), время прогона составляет 5-7 минут, а ГР содержит 94 вершины, распределенных по 12 слоям. При выполнении 10 реализаций ММК у наилучшего решения математическое ожидание среднего по всему парку АТ коэффициента готовности равно 0,232, а минимальное равно 0. При этом стоимость МТО ППО 75 АТ стоит 43-43,5 млн. руб.

В случае если мощность ремонтных предприятий увеличить в 10 раз (15000 руб/ч для АРЗ №121, 5000 руб/ч для АРЗ №218 и 35000 руб/ч для АРЗ №514), то время одного прогона увеличилось до 15-17 минут. При этом математическое ожидание увеличилось до 0,26, а стоимость мероприятий МТО ППО не изменилось. Данное изменение обусловлено тем, что СЧ АТ, находившееся в состоянии «Отказ» на момент запуска модели, отправляются на АРЗ и технические центры для их восстановления. Для таких СЧ АТ не заказываются новые ЗЧ, поэтому увеличение мощности АРЗ позволило быстрее восстановить отказавшие СЧ АТ и в результате увеличить коэффициент готовности АТ при той же стоимости ППО.

Выводы по главе 4.

- 1) Тестовая проверка КВИМ и модели СППР на примере ППО системы кондиционирования и регулирования давления самолета показала:
 - а) адекватное отображение в КВИМ логической взаимосвязи моделируемых процессов (на основе анализа трассировочной печати по важнейшим фрагментам состояния);

- b) чувствительность и адекватную реакцию КВИМ на варьирование параметров КВИМ и модели СППР (на основе верификации КВИМ и модели СППР).
- 2) Проведенные эксперименты показали работоспособность алгоритмического и программного обеспечения при решении задач выбора оптимальных решений по управлению процессами ППО АТ ВН.
- 3) Даны рекомендации по использованию результатов оптимизации СППР при выборе решений с участием реальных ЛПР.

Заключение.

По итогам выполнения диссертационной работы:

1. Разработан комплекс взаимосвязанных имитационных моделей для анализа процессов ППО АТ ВН, включающий в себя: имитационную модель надежности структуры, имитационную модель хранения ЗЧ, имитационную модель транспортировки ЗЧ и отказавших СЧ АТ, имитационную модель производства новых ЗЧ и имитационную модель восстановления отказавших СЧ АТ на АРЗ. Данный комплекс позволяет оценить значения критериев: коэффициент готовности парка АТ и стоимость мероприятий МТО ППО. Кроме представленных критериев имеется возможность анализировать динамику процессов МТО ППО, протекающих в КВИМ. Управление КВИМ осуществляется путем: составления заявки на производство, определения мест складирования ЗЧ и управлением очередностью выполнения мероприятий по созданию новых ЗЧ и восстановлению отказавших СЧ АТ.
2. Разработана СППР основанная на методе муравьиных колоний, позволяющая формировать рациональные решения в виде команд управления МТО ППО. После задания команд управления производится множество прогонов КВИМ. Выбор рациональных решений происходит по векторному критерию, состоящему из двух компонент: математическое ожидание коэффициента готовности парка АТ и математическое ожидание стоимости мероприятий МТО ППО. Из полученных решений выбираются и визуализируются решения, входящие в множество Паретто.
3. Среди имитационных моделей КВИМ стоит отметить модель надежности структуры, описывающую процессы отказа и восстановления надежности структуры АТ. В данной имитационной модели восстановление отказавшей СЧ АТ происходит только после обнаружения отказа. Обнаружение отказавшей СЧ АТ может быть обнаружена при эксплуатации (если СЧ АТ не вступает в работу), по показаниям датчиков или при выполнении технического обслуживания. В КВИМ данная модель является основным источником стохастического характера процессов МТО ППО
4. Написан программный комплекс, реализующий КВИМ и СППР. Проведена верификация программного комплекса на тестовом примере.

Литература:

1. Анцелович Л.А. Надежность, безопасность и живучесть самолета. – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
2. Анцелович Л.А. Надежность, безопасность и живучесть самолета: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Самолетостроение». – М.: Машиностроение, 1985
3. Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С. Вопросы эксплуатационной живучести авиакоиструкций. – М.: Воздушный транспорт, 2002.
4. Бакаев В.В. Судов Е.В. Гомозов В.А. Иванов В.Ю. Кольцов С.Н. Кураленя Е.И. Левин А.И. Марьин Б.Н. Нахимович А.М. Петров А.В. Сафонов А.А. Черкасов С.Г. Яцкевич А.И. // Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 624 стр.
5. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Курочка П.Н., Образцов Н.Н. Задачи управления материально-техническим снабжением в рыночной экономике. // М.: ИПУ РАН, 2000. – 58 с.
6. Берлинер Э. М., Таратынов О. В/ САПР в машиностроении, автор. // М.: «Форум», 2011. – 448 с.
7. Бирюзова Е.И. Единый регламент технического обслуживания планеров. – М.: Изд-во ДАСААФ, 1959.
8. Бомас В.В., Судаков В.А. Поддержка субъективных решений в многокритериальных задачах. // М.: Изд-во МАИ, 2011. 173 с.
9. Бродецкий Г. Л. Управление запасами. // М.: Эксмо, 2007
10. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. Учеб. Пособие. // М.: Высшая школа, 1981 – 368 с.
11. Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н. – Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. (Книга 2) – 1975
12. Гнеденко Б.В. Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания // М.: ЛКИ, 2007. – 400 с.
13. Головин В.Я., Шаламов А.С., Кирсанов А.П., Миронычев В.Н., Митрофанов Ю.В., Гриценко А.Е., Ямпольский С.М. / Под ред. Головина В.Я. Моделирование систем и процессов: учебник для слушателей и курсантов инженерных вузов ВВС. // М.: Изд. ВУНЦ ВВС «ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2010. – 432 с.

14. Гришин А.А., Карпенко А.П. Исследование эффективности метода пчелиного роя в задаче глобальной оптимизации. // «Наука и образование» (электронное научно-техническое издание), №8 2010 <http://technimag.edu.ru>.
15. ГОСТ 18322-78 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
16. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.
17. ГОСТ Р 53394-2009 Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения.
18. ГОСТ Р 56135-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения.
19. ГОСТ Р 56136-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.
20. Джон Шрайбфедер Эффективное управление запасами. // М.: Альпина Паблишер, 2008 – 304 с.
21. Ескин В.И., Судаков В.А. Гибридный метод формирования функций предпочтений в компьютеризированных системах поддержки принятия решений // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, № 3. С. 166-172
22. Жаднов В. В., Авдеев Д. К., Тихменев А. Н. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП // Надежность. 2011. № 3 (38). С. 53-60.
23. Животкевич И. Н., Смирнов А. П. Надежность технических изделий.
24. Концепция разработки, внедрения и развития технологий информационной поддержки жизненного цикла изделий вооружения и военной техники Утв. 17,06,2006
25. Кунву Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). // СПб.: «Питер», 2004. – 560 с.
26. Курейчик В.М., Кажаров А.А. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 4 (81).
27. Лотов А.В. Рябиков А.И. Бубер А.Л. Визуализация границы Паретто при разработке правил управления ГЭС. // Искусственный интеллект и принятие решений №1,2013 С. 70-83
28. Надежность и эффективность в технике: СППРавочник: В 10 т. Том 8. – М.:

- Машиностроение, 1990.
29. Николашин В.М., Синицына А.С. Основы логистики // М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 252 с.
 30. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях. // СПб: Изд-во Ютас, 2007, 104 с.
 31. Олейник Ал.А., Субботин С.А., Олейник Ан.А., Фрагмент рабочих материалов монографии. Часть III. Интеллектуальные мультиагентные методы.
http://www.csit.narod.ru/subject/МА/МА_lect.pdf
 32. Олейник Ал. А., Субботин С.А. Интеллектуальный метод мультиагентного поиска в многомерном пространстве с использованием прямой связи между агентами // Складні системи і процеси, 2008, №2 – стр 102-108
 33. Павленко А.И. Титов Ю.П. Использование метода муравьиных колоний при решении транспортных сетевых задач. // Научно-практическая конференция студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010» 26-30 апреля 2010. Москва. Сборник тезисов докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010. С. 57
 34. Павленко А.И. Титов Ю.П. Методы муравьиной оптимизации в задачах распределения ресурсов. // 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика 2010». 16-18 ноября 2010. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010. С. 313
 35. Павленко А.И. Титов Ю.П. Применение алгоритмов моделирования процессов совместно с волновым алгоритмом для решения транспортных задач. // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». 17-20 апреля 2012 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-Салон», 2012. С. 252-253
 36. Павленко А.И. Титов Ю.П. Решение задач маршрутизации авиатранспортных средств с помощью алгоритма муравьиных колоний. // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации работ СПб.: «Принт-салон» 2011г. С.112
 37. Павленко А.И. Титов Ю.П. Сравнительный анализ модифицированных методов муравьиных колоний. // Научно-практический журнал «Прикладная информатика» №4(40) 2012. – М., «Синергия ПРЕСС», 2012 с. 100-112

38. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. // М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – 160 с.
39. Послепродажное обслуживание самолетов марки ТУ [Электронный ресурс] // URL: http://www.tupolev.ru/posleprodajnoe_obslyuzhivanie (дата обращения: 29.04.2015).
40. Ризванов Д.А. Алгоритмы управления ресурсами в сложных системах с применением многоагентных технологий. // Вестник УГАТУ т. 17 №5 (58). – Уфа, 2013 стр. 63-69
41. Руководство по обеспечению частями авиационной техники, простаивающей в неисправном состоянии из-за их отсутствия. Введено в действие приказом Главнокомандующего ВВС от 20 мая 2004 г. №216
42. Сеницын И.Н., Шаламов А.С. Лекции по теории систем интегрированной логистической поддержки. // М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012. – 624 с.
43. Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: статьи и тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции (16-17 октября 2014г. Ульяновск). // Ульяновск: УлГУ, 2014. – 360 с.
44. Судов Е.В. // Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003 – 264 стр.
45. 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 стр.
46. Список военных аэродромов России. Википедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_военных_аэродромов_России/ (дата обращения 09.09.2015)
47. Титов Ю.П. Модификации метода муравьиных колоний для решения задач разработки авиационных маршрутов. // Автоматика и телемеханика №3 (76) 2015г. Академиздатцентр «Наука» РАН, 2015 с. 108-124
48. Хахулин Г.Ф. Основы конструирования имитационных моделей. М.: Издательство НПК «Поток». 2002 г. 224 с.
49. Хахулин Г.Ф., Красовская М.А., Булыгин В.С. Теоретические основы

- автоматизированного управления (Задачи, методы, алгоритмы теории оптимального управления): учебное пособие. – М., Изд-во МАИ, 2005. – 396 с.
50. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Имитационная модель надежности структуры летательных аппаратов военного назначения и ее использование в задачах исследования процессов их послепродажного обслуживания. // Журнал Надежность №3 (50) 2014г. М. ООО "Журнал "Надежность"", 2014 с. 3-15.
51. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Имитационная модель многоуровневой надежности структуры летательного аппарата. // 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2013» 12-15 ноября 2013 года. Москва. Тезисы докладов. - СПб.: Мастерская печати, 2013. с. 121-123
52. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Система поддержки решений запасных частей летательных аппаратов военного назначения. // Известия самарского научного центра Российской академии наук. Том 16 № 1(5) 2014г. Самарский научный центр РАН, 2014 с. 1619-1624
53. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Система поддержки решений запасных частей летательных аппаратов военного назначения. // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: статьи и тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции (16-17 октября 2014г. Ульяновск). - Ульяновск: УлГУ, 2014. с. 335-337.
54. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Структура системы поддержки решений для управления техническим центром по обслуживанию летательных аппаратов. // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». 22-24 апреля 2014 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-Салон», 2014. с. 216-217
55. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания // М.: Либрокон, 2010. – 240 с.
56. Шаламов А.С. Интегрированная логистическая поддержка наукоемкой продукции. Монография. // М.: Университетская книга, 2008. – 464 с.
57. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 4 (4). С. 70-75.
58. Ямпольский С. М., Головин В. Я. Актуальные вопросы автоматизации управления поставками предметов материально-технического обеспечения для

- послепродажного обслуживания авиационной техники // Труды МАИ. 2013. № 69. С. 69-79.
59. Ямпольский С. М., Шаламов А. С. Автоматизированное управление поставками запасных частей на основе технологий функционального и математического моделирования процессов // Логистика и управление цепями поставок. 2014. Т. 65. № 6. С. 48-58.
60. Ямпольский С. М., Шаламов А. С. Логистический подход к автоматизации управления оборотными средствами торгового предприятия // Логистика и управление цепями поставок. 2013. Т. 57. № 4. С. 65-70.
61. Ямпольский С. М., Рубинов В. И., Головин В. Я. Расчет периодичности работ по техническому обслуживанию и ремонту изделия авиационной техники с учетом характеристик и места комплектующих его элементов в структурно-логической схеме надежности // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 4. С. 94-99.
62. Automated Master Planning Tools For Integrated Weapon System Management (IWSM). Technical Assessment. CDRL C005 DI-S-30591
63. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. An Investigation of some Properties of an Ant Algorithm. // Proc. Parallel Probl. Solving from Nature Conf. (PPSN 92), Brussels, Belgium, R.Männer and B.Manderick (Eds.), Elsevier Publishing. 1992. P. 509-520.
64. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies. //Proc. First Eur. Conf. on Artific. Life, Paris, France, F.Varela and P.Bourgine (Eds.), Elsevier Publishing. 1992. P. 134-142.
65. Federal Logistics Information System. Procedures Manual Materiel Management Decision Rule Tables. DoD 4100.39-M Volume 13. September 2010
66. Soon-Sup Lee, Jong-Kap Lee, Beom-Jin Park, e.c.t. // Development of internet-based ship technical management system. Ocean Engineering №33 (2006) p. 1814-1828
67. SGML. Википедия. <https://ru.wikipedia.org/wiki/SGML> (дата обращения 09.09.15)
68. JSP 886 Volume 7 Part 1: Integrated Logistic Support Policy, JSP 886 Volume 7 Part 2: Integrated Logistic Support Management