

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 космическая техника)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва — 2015 год

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

- Научный консультант — доктор технических наук, профессор
Хахулин Геннадий Федорович
Заведующий кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления» МАИ
- Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор,
Шаламов Анатолий Степанович
ФИЦ "Информатика и управление" РАН, научный консультант
- кандидат технических наук, доцент
Головин Валерий Яковлевич,
Директор Департамента послепродажного обслуживания авиационных комплексов по гособоронзаказу ОАО «Компания «Сухой»
- Ведущая организация — ОАО НИЦ «Прикладная логистика»

Защита состоится «24» декабря_2015 года в 17 часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.125.12 Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

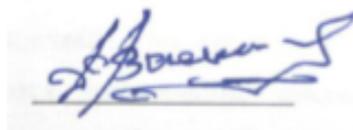
Автореферат разослан _____

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, Ученый совет МАИ

Учёный секретарь

Диссертационного Совета Д 212.125.12

к.т.н., доцент



Дарнопых В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Жизненный цикл (ЖЦ) технического изделия (ТИ) от момента появления идеи до момента снятия с эксплуатации и замены новым, более совершенным ТИ является актуальным объектом научно-технических исследований. Основная цель таких исследований путем выбора управленческих решений и автоматизированной информационной поддержки обеспечить наибольшую эффективность ТИ, сущность которой определяется не только его техническими показателями, но и затратами различного рода ресурсов и времени на реализацию этапов ЖЦ ТИ. Одним из проблемных этапов ЖЦ ТИ с точки зрения эффективного управления является этап эксплуатации ТИ. Сложности его реализации связаны с тем, что на этом этапе необходимо рациональное сочетание участия в управлении разработчиков, изготовителей и потребителей (покупателей) ТИ, что организационно ввиду разноплановости целей перечисленных сторон не так просто сделать. На этапе эксплуатации осуществляются процессы послепродажного обслуживания (ППО) ТИ. От эффективности управления этими процессами во многом зависит реализация заложенных на этапе проектирования ТИ его технической и экономической эффективностей.

Важным классом ТИ является авиационная техника военного назначения (АТ ВН). В соответствии с приказом Министерства Обороны РФ №320 2010 г. для обеспечения необходимой эффективности применения систем вооружения (в том числе и АТ ВН) осуществляется перераспределение ответственности в реализации ППО с подразделений вооруженных сил на специально созданную для этих целей структуры, освободив подразделения вооруженных сил (для АТ - авиационные части АЧ) от не свойственных для них работ по обслуживанию, сосредоточив основное внимание на боевой подготовке и применении АТ ВН.

В данной работе под АТ ВН будем понимать летательные аппараты военного назначения, их подсистемы и другие части, являющиеся объектом ППО. Характерными особенностями этого класса ТИ является:

- уникальность и сложность эксплуатируемой техники,
- динамичность и многорежимность их функционирования,
- территориальная рассредоточенность как самих объектов ППО, так и объектов их инфраструктуры,
- требование обеспечения высокой боевой готовности на всем времени их эксплуатации,
- ограниченность бюджетных средств, выделяемых на обеспечение боеготовности АТ.

Для управления процессами ППО создаются специальные системы ППО (СППО). Важнейшими задачами СППО является материально-техническое обеспечение (МТО) процессов

ППО, под которыми понимают процессы производства новых ЗЧ, техническое обслуживание и ремонт АТ, восстановление работоспособности отказавших частей АТ, хранение и транспортировка ЗЧ. Процессы ППО имеют многомерный, динамический и стохастический характер. Для управления МТО этих процессов необходимо разработать математический аппарат, обеспечивающий адекватный анализ, всестороннюю оценку качества и оптимизацию принимаемых решений.

Состояние разработки математического, алгоритмического и информационного обеспечения процессов ППО, в частности МТО, к сожалению, отстает от потребностей по сравнению с другими этапами ЖЦ. Для интеграции всех участников ППО в единое информационно-алгоритмическое пространство создаются системы интегрированной логистической поддержки (ИЛП).

Среди наиболее продвинутых научных работ в направлении разработки систем ИЛП следует отметить работы профессора А.С. Шаламова и созданной под его руководством научной школы в военно-воздушной инженерной академии им Н.Е.Жуковского. В работах А.С.Шаламова, В.Я. Головина и С.М. Ямпольского описывается математический аппарат, использующий теорию случайных процессов, стохастических дифференциальных уравнений и других аналитических моделей, для описания и управления различными процессам ППО. Необходимо отметить работы Е.В. Судова, в которых описываются процессы ИЛП в том числе МТО АТ ВН с точки зрения марковских процессов и созданный под его руководством программный комплекс ИЛП Logistic Support Analysis Suite (LSS).

Анализ этих и близких к ним работ показал, что на сегодняшний день отсутствуют математические модели, комплексно отражающие указанные процессы и механизмы принятия решений по управлению ими. Сложность, многоплановость, динамичность и стохастический характер указанных процессов определяет необходимость использования имитационного моделирования для обеспечения адекватности их отображения.

Поэтому актуальной научно-технической задачей, решаемой в данной диссертационной работе, является задача разработки комплекса взаимосвязанных имитационных моделей (КВИМ), отображающих все основные составляющие рассматриваемых процессов, и метода поддержки решений, обеспечивающего эффективное управление ими. С учетом такой формулировки научно-технической задачи, решаемой в диссертационной работе, следующим образом определяются ее основные положения.

Объектом исследования являются система и процессы МТО ППО АТ ВН.

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

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.

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

Основные научные результаты, выносимые на защиту

1. Метод поддержки решений для управления процессами МТО ППО АТ ВН, основанный на совместном использовании КВИМ, многокритериальной оценки эффективности процессов ППО, многоагентного метода муравьиных колоний (ММК) для выбора эффективных управляющих решений.
2. КВИМ для оценки эффективности процессов МТО ППО АТ ВН, позволяющий осуществить исследование характеристик МТО ППО АТ ВН при различных параметрах и управляющих воздействиях и обеспечивающий метод поддержки принятия решений необходимой информацией об эффективности рассматриваемых решений.

Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальным обоснованием эффективности предложенного метода поддержки решений и проверкой работоспособности КВИМ с помощью детального анализа трассировочной печати динамического процесса смены состояния комплекса моделей и их верификации.

Научная новизна состоит в следующем:

- 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;

- впервые разработан КВИМ для проведения имитационных исследований процессов МТО ППО АТ ВН, позволяющий оценить эффективность принимаемых управляющих решений и взаимодействующий с предложенным методом поддержки решений.

Практическая значимость работы состоит доведении всех полученных в работе новых научных результатов (метода поддержки решений, КВИМ) до алгоритмической и программной реализации.

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.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на научно-практических 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, автоматизации 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.);

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 4-х научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК.

На защиту выносятся:

1. Новый метод поддержки принятия решений, основанный на применении, для реализации процедуры неявного перебора, метода муравьиных колоний,
2. Алгоритмическое и программное обеспечение КВИМ, адекватно отображающего процессы МТО ППО АТ ВН
3. Алгоритмическое и программное обеспечение метода поддержки принятия решений, позволяющее находить рациональные решения по МТО ППО АТ ВН и работающее совместно с КВИМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список используемой литературы. Работа состоит из 170 страниц, из них основной

текст 170 страниц, включая 61 рисунок, 60 таблиц и список литературы, содержащий 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определяется цель диссертационной работы, формулируется решаемая в ней научно-техническая задача, обосновывается ее актуальность, формируются основные результаты работы, их научная новизна, практическая значимость и достоверность.

В первой главе

Проведен системный анализ процессов ППО АТ ВН, среди которых выделены процессы МТО (рис. 1), связанные с производством, ремонтом, транспортировкой и хранением запасных частей (ЗЧ). Определены структурные компоненты, осуществляющие процесс МТО ППО АТ ВН, и процедуры их взаимодействия:

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 составных частей (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

Показан комплексный взаимосвязанный, динамический и стохастический характер их функционирования. Для каждого структурного компонента приводится содержательное описание его задач, а так же анализ процессов, протекающих в нем. Этот анализ в дальнейшем является основой для математического моделирования МТО ППО.

Приведен обзор различных существующих математических моделей, для описания процессов МТО ППО АТ. Рассмотрены достоинства и недостатки приведенных математических моделей.

Определена актуальность математического моделирования МТО ППО АТ ВН на основе имитационного моделирования, как инструментального средства, позволяющего, с одной стороны, отобразить комплексный динамический характер МТО ППО АТ ВН и, с другой стороны, обеспечить при этом важнейшее свойство - адекватность отображения моделируемых процессов. При этом в содержательном виде определены показатели критерия оценки результатов

оценки результатов моделирования:

1. Средний коэффициент готовности на плановом периоде процесса обслуживания по всему парку обслуживаемой АТ.
2. Средние затраты на реализацию процессов МТО ППО на плановом периоде процесса обслуживания.

В составе КВИМ выделяются пять моделей, отражающих процессы функционирования соответствующих частей моделируемой системы (рис. 2):

1. Модель надежности структуры (НС) составной части АТ. Данная модель описывает процессы функционирования СЧ АТ с точки зрения надежности и предназначена для отображения процессов отказа, восстановления и других процессов эксплуатации СЧ АТ. Так как каждая единица АТ представляет собой отдельный экземпляр АТ, то для него создается своя модель НС. С помощью этих моделей осуществляется оценка коэффициента готовности АТ и оценка стоимости мероприятий по МТО ППО АТ ВН. Имитационная модель НС является основным источником стохастического и динамического характера моделируемых процессов. В этой модели отражена многоуровневая структура СЧ АТ, как источника отказов, процессы эксплуатации и технического обслуживания АТ. С учетом этой структуры проводится логический анализ последствий отказов и восстановления СЧ АТ. В ИМ НС имеется возможность задания различных видов отказов: внезапных, износных, скрытых, зависимых и др, вероятностное описание которых задается с помощью соответствующих законов распределения времени безотказной работы. В НС имеется возможность задание различных видов резервирования, и так же датчиков, сигнализирующих об отказе определенного блока СЧ АТ. Процесс эксплуатации для каждого экземпляра АТ задается в виде последовательности действий, выполняемых с различными СЧ НС АТ, переводящих их в различные состояния: включена, выключена, демонтирована и т.д. При выполнении определенных действий по обслуживанию АТ с определенной вероятностью возможно обнаружение скрытых отказов определенных СЧ АТ, что приводит к операциям по их устранению. Последовательность действий определяет режим, в котором функционирует АТ. Последовательность смены режимов функционирования задается для каждого экземпляра АТ отдельно и определяется заданным в параметрах ИМ планом эксплуатации.

2. Модель транспортировки реализует процессы перемещения ЗЧ и отказавших СЧ АТ между различными складами системы МТО ППО АТ ВН. В данной модели реализованы задержки при перемещении ЗЧ и вычисляется оценка стоимости процессов транспортировки в системе МТО ППО АТ ВН. Основным объектом транспортной ИМ является транспортная сеть. Она задается в виде графовой модели. Вершины соответствуют транспортным узлам, а дуги определяют возможные пути перемещения ЗЧ между узлами. В вершинах транспортной сети задаются:

склады, предприятия производители ЗЧ, АРЗ и АЧ с множеством, базирующихся в них экземпляров АТ.

3. Модель хранения ЗЧ на складах технического центра. Данная модель описывает процессы хранения. Модель определяет оценку стоимости, с учетом времени, хранения ЗЧ в системе МТО ППО АТ ВН.

4. Модель производства новых ЗЧ (модель предприятия-изготовителя) предназначена для моделирования задержек при производстве новых ЗЧ с учетом производственной мощности ПИ, а также вычисления затрат на производство. В данной работе ИМ ПИ представлена в виде модели системы массового обслуживания. Для управления очередностью в ней реализовано управление системой динамических приоритетов.

5. Модель восстановления отказавших частей ЛА на АРЗ. Данная модель предназначена для отображения процессов восстановления отказавших частей ЛА на АРЗ и пополнения ими складских запасов. Данная ИМ аналогична ИМ ПИ. Для управления очередностью в ней реализовано управление системой динамических приоритетов.

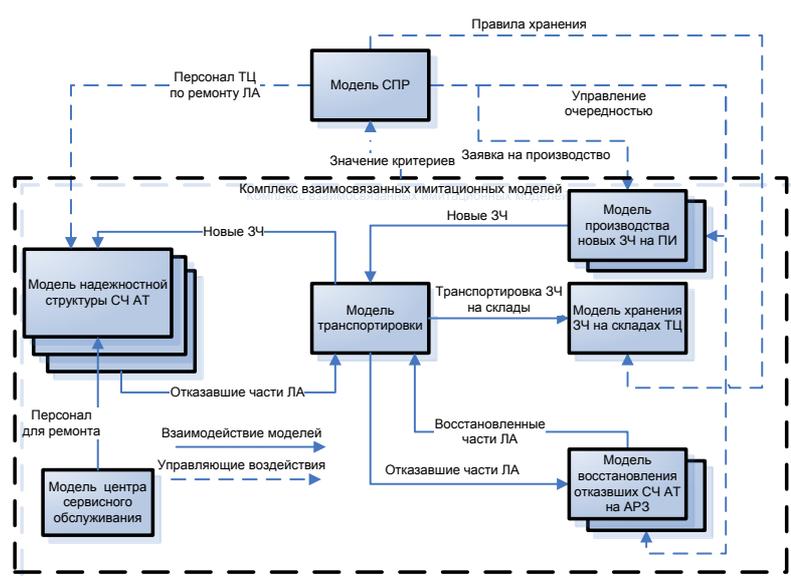


Рис. 2. Состав КВИМ, их взаимодействие и модель СППР.

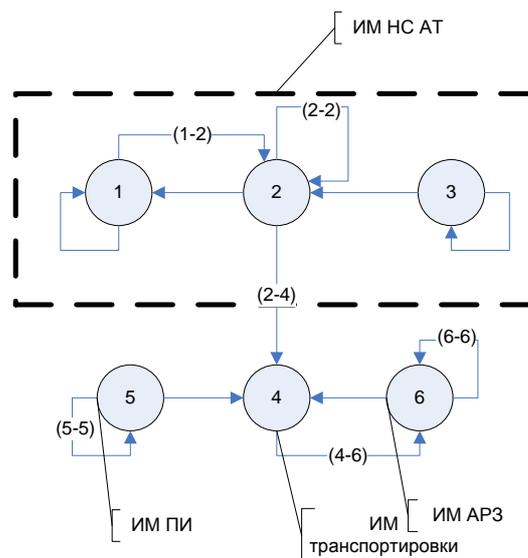


Рис. 3. Граф-схема взаимосвязи событий КВИМ.

Взаимодействия отдельных ИМ в КВИМ осуществляется путем реализации метода модельных событий на основе единого списка будущих событий (СБС) и реализации возможности планировании одних событий при обработке других в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3.

Перечень основных временных модельных событий в КВИМ следующий:

1. Отказ элемента,
2. Выполнение действия над СЧ НС АТ:
 - а. включение, отключение в процессе применения СЧ АТ – операции выполняются над

ЛА в процессе эксплуатации,

в. окончание монтажа, демонтажа или настройка в процессе ТО – операции выполняются специалистами центра сервисного обслуживания. Данные события являются событиями имитационной модели центра сервисного обслуживания.

3. Смена режима функционирования АТ,
4. Окончание транспортировки ЗЧ на склад,
5. Производство ЗЧ,
6. Окончание восстановления СЧ АТ.

Условия планирования событий ИМ ППО АТ ВН:

(1-2) Если у отказавшего элемента есть резервный работоспособный элемент,

(2-2) Если выполнены не все действия из заданной последовательности для перевода НС

ЛА в определенный режим эксплуатации,

(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 СЧ 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.

Для каждого из указанных модельных событий разработаны алгоритмы обработки, в которых осуществляется изменение состояния КВИМ и планирование новых модельных событий. Основными случайными явлениями в КВИМ является событие отказа элементов, входящих в состав НС АТ.

Используемые при моделировании потоки базовых псевдослучайных чисел (БПСЧ) реализованы как управляемые. Для каждого потока имеется возможность задания начального состояния при рассмотрении различных вариантов моделируемой системы. Это позволяет существенно уменьшить дисперсию разности оценок критериев оценки результатов моделирования (КОРМ) для различных вариантов, и, следовательно, безошибочно принимать решение о выборе лучшего решения.

Сбор статистики и расчет показателей КОРМ осуществляется по множеству независимых прогоном КВИМ. Время прогона определяется заданным плановым периодом реализации процессов МТО ППО АТ ВН. По окончании каждого прогона КВИМ вычисляются значения КОРМ:

1. Оценка коэффициента готовности парка АТ. Вычисляется как математическое ожидание по множеству реализаций среднего коэффициента готовности по парку АТ (безразмерная величина).

$$\widetilde{K}_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{\widetilde{K}_{\Gamma_{AT_i}}}{n}$$

Таблица 1

$\widetilde{K}_{\Gamma_{AT_i}}$	Оценка коэффициента готовности i -го экземпляра АТ. (безразмерная величина)	$\widetilde{K}_{\Gamma_{AT_i}} = \sum_{j=1}^K \frac{K_{\Gamma_{AT_i,j}}}{K}; K_{\Gamma_{AT_i,j}} = \frac{T_{\text{раб}} + T_{\text{ожид}}}{T_M}$ <p>Где $T_{\text{ожид}}$ – время, которое АТ находилась в режиме ожидания (в часах); $T_{\text{раб}}$ – время, которое АТ эксплуатировалась (в часах); T_M – Время имитационного прогона. (в часах); K – количество прогонов КВИМ.</p>
n	количество АТ в парке.	

2. Оценка общей стоимости мероприятий МТО ППО парка АТ в рублях ($C_{\text{ППО}}$):

$$\widetilde{C}_{\text{ППО}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{\text{хр}}} \widetilde{T}_{\text{хр } 3\text{ч}_{i,j}} * V_{3\text{ч}_i} * C_{\text{хр } 3\text{ч}_j} + \sum_{j=1}^{N_{\text{пи}}} C_{\text{пи } 3\text{ч}_j} + \sum_{j=1}^{N_{\text{арз}}} C_{\text{АРЗ части } 3\text{ч}_j} + \sum_{i=1}^{N_{\text{мс}}} \widetilde{T}_{\text{мс}_i} * C_{\text{мс}_i} + N_{\text{бр}} * C_{\text{бр}} * T_M$$

Таблица 2

N	Количество различных типов ЗЧ.
$N_{\text{хр}}$	Количество складов ТЦ.
$N_{\text{пи}}$	Количество предприятий-изготовителей ЗЧ.
$N_{\text{арз}}$	Количество АРЗ.
$N_{\text{мс}}$	Количество различных типов транспортных средств.
$\widetilde{T}_{\text{хр } 3\text{ч}_{i,j}}$	Оценка, по множеству прогонов, времени хранения ЗЧ i -ого типа на j -ом складе. (в часах)
$C_{\text{хр } 3\text{ч}_j}$	Стоимость одного часа хранения одного м ² на j -ом складе ТЦ. (в руб.)
$V_{3\text{ч}_i}$	Объем в м ² , занимаемый ЗЧ i -ого типа на складах ТЦ.
$C_{\text{пи } 3\text{ч}_j}$	Стоимость производства всех ЗЧ j -ом ПИ. (в руб., зависит от команд управления)
$\widetilde{C}_{\text{АРЗ части } 3\text{ч}_j}$	Оценка, по множеству прогонов, стоимости восстановления всех СЧ АТ j -ом АРЗ. (в руб.)
$C_{\text{мс}_i}$	Стоимость одного часа использования i -го ТС. (в руб.)
$\widetilde{T}_{\text{мс}_i}$	Оценка, по множеству прогонов, общего времени использования i -го ТС. (в часах)

$N_{бр}$	Максимальное количество требуемых бригад сервисного центра.
$C_{бр}$	Стоимость одного часа содержания бригады сервисного центра. (в руб.)
T_M	Время имитационного прогона. (в часах)

Точность оценок показателей КОРМ определяется путем оценки их дисперсий и построении доверительных интервалов.

Кроме представленных моделей КВИМ, имеется модель СППР, задачей которой является выработка управляющих воздействий для МТО ППО АТ. Управление осуществляется путем задания следующих параметров КВИМ:

- количество и тип ЗЧ, для оформления заявки на производство для каждого предприятия-изготовителя. Заявка формируется на каждый отчетный период (1 раз в год).
- склад технического центра для хранения каждой ЗЧ
- очередность производства ЗЧ на предприятиях-изготовителях и ремонта СЧ АТ на АРЗ.

Для принятия решений по составлению заявок для предприятий-изготовителей ЗЧ и определению мест их хранения предлагается использовать метод, специально разработанный для этой цели в диссертационной работе.

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

- результатов имитационных экспериментов с КВИМ системы МТО ППО АТ ВН,
- формируемого на этой основе специального графа «решений»,
- мультиагентного подхода в виде метода муравьиных колоний (ММК) для неявного перебора решений.

Задача выбора рационального решения по управлению процессами МТО является стохастической, дискретной, многокритериальной задачей.

Проблемы стохастичности решаются за счет уменьшения дисперсий оценок показателей КОРМ 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 Парето и скаляризации векторного критерия для вариантов указанного множества.

Проблема дискретности задачи решается за счет разработанного в диссертационной работе оригинальной специальной процедуры неявного перебора решений, основанной на модернизации известного метаэвристического метода муравьиных колоний (ММК).

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.

Известный ММК предложенный итальянским исследователем Марко Дориго (MarcoDorigo) в 1992 разработан для определения гамильтонова пути на графе. В отличие от оригинального метода для применения ММК в диссертации проведена следующая его модернизация:

1) специальным образом формируется граф «решений» (ГР) по которому движутся агенты (муравьи). Этот граф отражает решения по плану производства и местам хранения новых ЗЧ. Вершины ГР отражают составляющие элементы решения, определяющие объем производства ЗЧ определенного вида, предназначенного для хранения на определенном складе ТЦ. Множество вершин ГР для определенного вида ЗЧ и определенного склада ТЦ объединены в слой. Последовательность расположения слоев в ГР – произвольная. Вершины соседних слоев соединяются дугами, по которым движутся агенты в ММК. (рисунок 4) Маршрут по всем слоям ГР с выбором в каждом слое одной вершины соответствует одному из возможных решений.

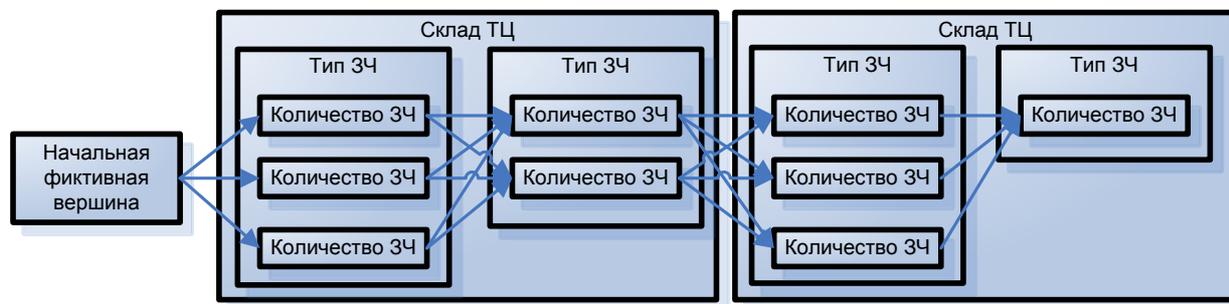


Рис. 4. Структура графа решений для работы ММК.

2) создание специальной фиктивной начальной для всех агентов вершины.

3) вместо веса дуги графа для каждой вершины ГР вводятся по два веса, отражающие двухкритериальность рассматриваемой задачи (один вес характеризует вершину с точки зрения обеспечения максимума показателя КОРМ - коэффициента готовности парка АТ, а второй с точки зрения минимума средних затрат на реализацию процессов МТО). В результате прохождения агентом пути происходит переоценка «весов» вершин, через которые прошел агент. Для переоценки «веса» вершин воспользуемся формулами:

Для «веса» вершины, характеризующего за коэффициент готовности парка АТ:

$$\Delta\tau_{1,i,k}(t) = \frac{Q1}{1 - M(K\mathcal{E})}, i \in T_k(t),$$

$$\Delta\tau_{1,i,k}(t) = 0, i \notin T_k(t),$$

где $M(K\mathcal{E})$ – оценка математического ожидания коэффициента готовности парка АТ; $Q1$ – максимальный «вес»; $\Delta\tau_{1,i,k}(t)$ – изменение «веса» вершины i ; $T_k(t)$ – набор вершин, посещенных агентом k .

Для «веса» вершины, характеризующего за стоимость МТО ППО АТ:

$$\Delta\tau_{2,i,k}(t) = \frac{Q2}{Kst}, i \in T_k(t),$$

$$\Delta\tau_{2,i,k}(t) = 0, i \notin T_k(t),$$

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

4) возможность применения различных «типов» агентов, перемещающихся по ГР:

Агенты, у которых выбор следующей вершины (а в результате и маршрута в целом) определяется одним типом «веса» (коэффициентом готовности или стоимостью МТО ППО), взвешенной суммой весов, или другим обобщенным критерием (например, критерий эффективность - стоимость):

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

где $\tau_i(t)$ – «вес» в i -ой вершине в момент времени t . Значение $\tau_i(t)$ может быть вычислено как отдельно взятый вес τ_1 или τ_2 , так и как результат взвешенной суммы весов $\tau_i(t) = \alpha * \tau_1 + (1 - \alpha) * \tau_2$ и д.р.

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

5) ММК непосредственно взаимодействует с КВИМ для оценки двух показателей КОРМ каждого рассматриваемого решения.

6) начальные «веса» вершин и структура ГР определяются по результатам множества прогонов КВИМ в предположении о неограниченности наличия ЗЧ на складах АЧ. Данное предположение позволяет ММК находить решения сразу из области рациональных решений.

7) изменено условие окончания ММК. Кроме, используемого в оригинальном ММК, условия проведения определенного количества итераций (итерация заканчивается когда все

агенты прошли путь в ГР и по результатам осуществлена переоценка «весов» ГР), имеется возможность задать значения критериев, при достижении которых ММК завершит работу (завершающие условие). В процессе работы ММК возможно нахождение решений, которые удовлетворяют только одному завершающему условию. Для более быстрой сходимости ММК к решению, удовлетворяющему всем завершающим условиям предполагаются следующие формулы переоценки «весов» ГР:

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

$$\Delta\tau_{1,i,k}(t) = \frac{Q1}{Lim_Kz - M(Kz)}, Lim_Kz > M(Kz), i \in T_k(t),$$

$$\Delta\tau_{1,i,k}(t) = Q1 * C_1 * (M(Kz) - Lim_Kz), Lim_Kz \leq M(Kz), i \in T_k(t),$$

$$\Delta\tau_{1,i,k}(t) = 0, i \notin T_k(t),$$

где Lim_Kz – завершающее значение критерия «коэффициент готовности»; $M(Kz)$ – оценка математического ожидания 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 «Количество ЗЧ», посещенных агентом k .

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

$$\Delta\tau_{2,i,k}(t) = \frac{Q2}{\sqrt{Lim_Kst - Kst}}, Lim_Kst > Kst, i \in T_k(t),$$

$$\Delta\tau_{2,i,k}(t) = Q2 * \sqrt{Kst - Lim_Kst}, Lim_Kst < Kst, i \in T_k(t),$$

$$\Delta\tau_{2,i,k}(t) = 0, i \notin T_k(t),$$

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

Все решения, полученные в процессе работы ММК, заносятся в массив решений. После завершения работы ММК возможно наложение ограничений на один или оба показателя КОРМ для каждого найденного решения. Решения, удовлетворяющие ограничениям включают в множество допустимых решений. Алгоритм работы метода поддержки принятия решений приведен на рисунке 5.

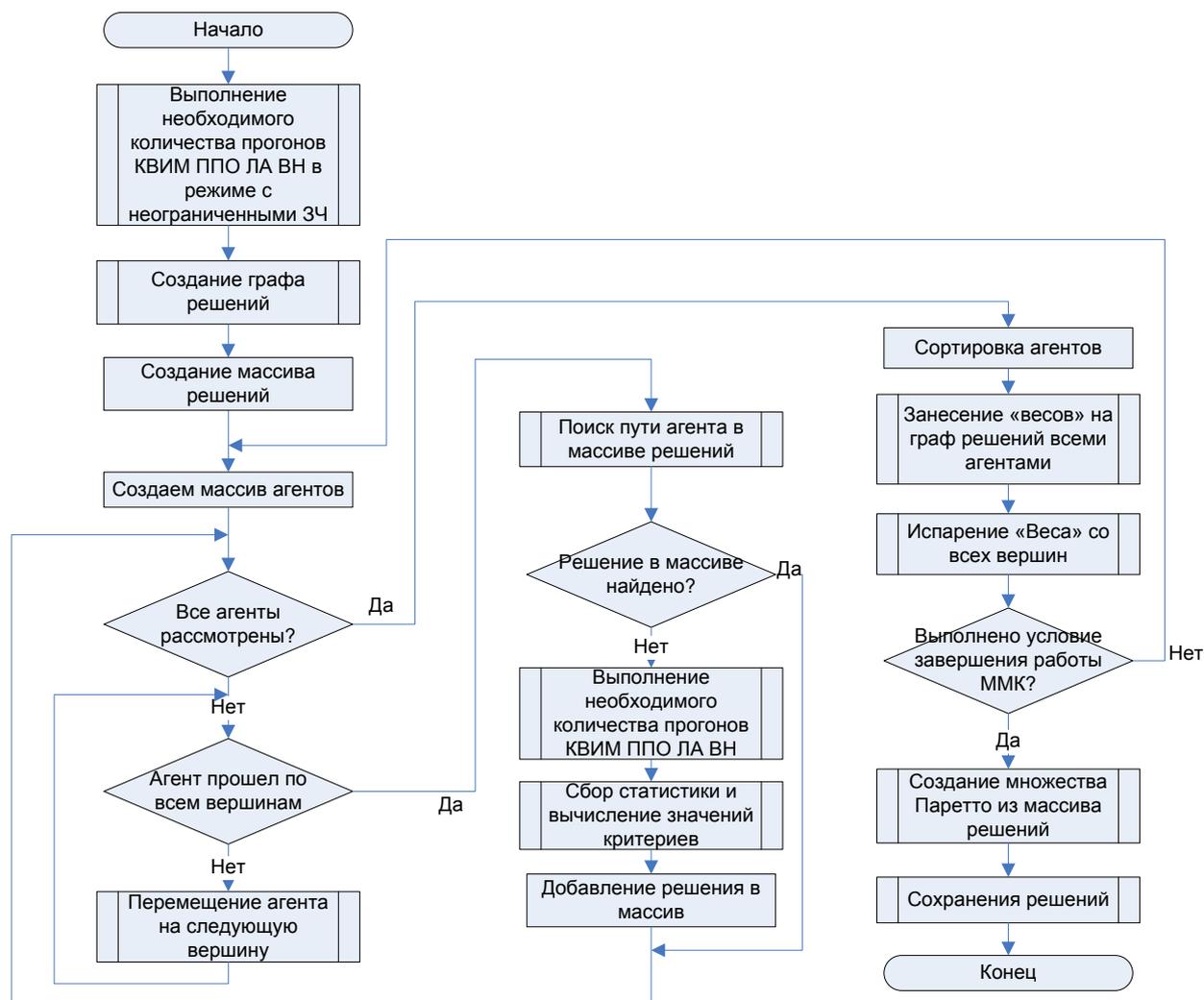


Рис. 5. Алгоритм работы СППР

На основе множества допустимых решений формируется множество Паретто. Для ранжирования решений внутри множества Паретто решается задача скаляризации с использованием одного из возможных методов (например, с использованием критерия эффективность-стоимость).

В третьей главе представлено описание программной реализации КВИМ и метода поддержки принятия решений на языке программирования Borland Delphi 7.0. Описан формат текстовых файлов, необходимых для задания параметров КВИМ и загрузки готовых решений в СППР. Представлены экранные формы, помогающие ЛПР в управлении МТО ППО АТ ВН: визуализация изменения состояния всех частей выбранного ЛА, визуализация графа решений, визуализация множества решений и множества Паретто (рисунок 6), частотные графики (рисунок 7) по количеству отказов, количеству ЗЧ на складах ТЦ, времени транспортировки ЗЧ, времени ожидания в очередях предприятий-изготовителей и АРЗ для каждой части ЛА. На основе данных графиков возможно неформальная оценка «тонких мест» в процессе МТО ППО АТ ВН с учетом лица принимающего решения.

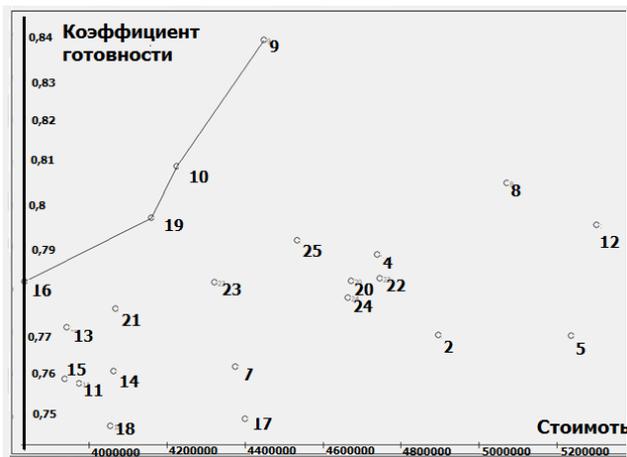


Рис. 6. Множество решений, определенных с помощью ММК.

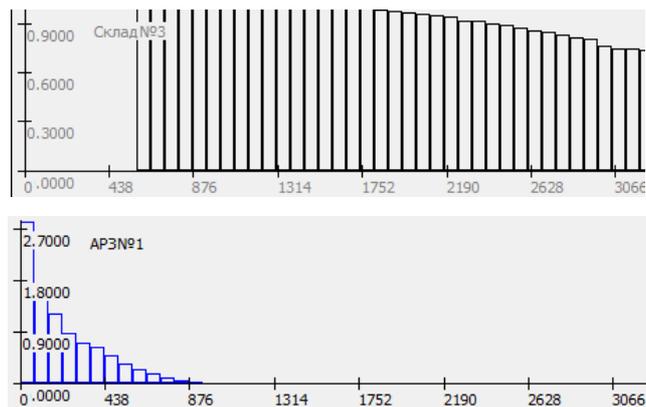


Рис. 7. Оценка математического ожидания количества ЗЧ «АРТ-56-2» и времени ожидания восстановления на АРЗ.

Четвертая глава

посвящена проведению имитационных и вычислительных экспериментов на тестовых примерах с КВИМ и разработанном методе поддержки принятия решений со следующими целями:

- подтверждение достоверности результатов работы КВИМ при оценке показателей КОРМ, используемых в методе поддержки принятия решений
- проверка работоспособности, сходимости и эффективности использования метода поддержки принятия решений при выборе решений по управлению МТО ППО АТ ВН.
- оценка потребных вычислительных ресурсов для решения задач поддержки принятия решений.
- оценка возможности применения КВИМ и метода поддержки принятия решений на задачах с реальной размерностью.

В качестве тестового примера объекта АТ ВН была выбрана система кондиционирования и регулирования давления (СКИРД) для АТ ВН. Многоуровневая НС которой включает:

- 4 подсистемы, 11 блоков, 87 элементов;
- реализуется возможность работы в двух режимах
- реализуется возможность скрытых и зависимых отказов

Размерность решаемых задач при моделировании и поддержке решений в рассматриваемом тестовом примере характеризуется следующими параметрами: рассматриваются две АЧ с числом ЛА 2 и 4, два АРЗ и одно ПИ новых ЗЧ, три склада ТЦ. Все указанные объекты территориально разнесены. Рассматривается плановый годовой период реализации процессов МТО ППО АТ ВН.

Подтверждение достоверности результатов работы КВИМ осуществляется путем реализации двух процедур: детального анализа трассировочной печати КВИМ и сравнения предполагаемых и фактических результатов влияния вариаций параметров КВИМ на показатели КОРМ.

Указанные проверки подтвердили адекватность КВИМ и возможность его использования для решения задач поддержки принятия решений. Реализация графических отображений результатов вычислительных экспериментов (Рис. 6) позволяет проводить всесторонний неформальный анализ процессов МТО ППО АТ ВН.

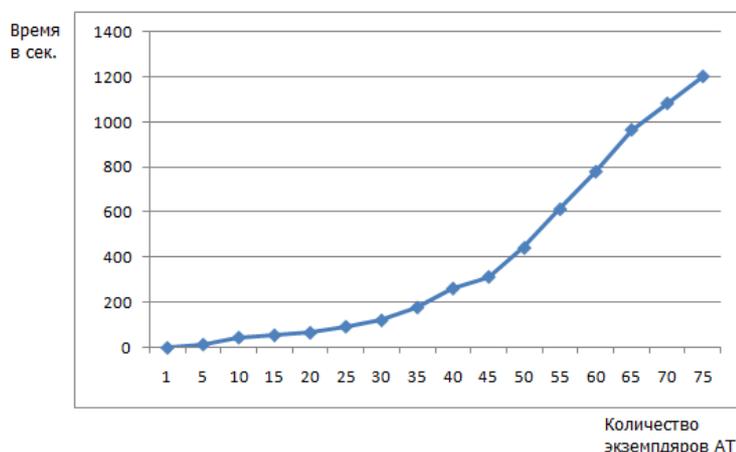


Рис 8. График зависимости времени прогона КВИМ от размерности парка АТ

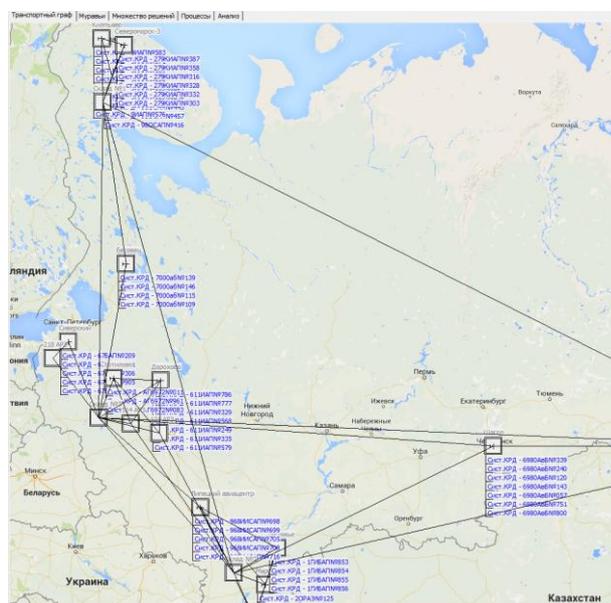


Рис. 9. Транспортный граф тестового примера.

Работа метода поддержки принятия решений проводилась в следующих вариантах, выбираемых ЛПР: без ограничений на значения критериев и с различными вариантами ограничений на значения критериев выбираемых решений. Подтверждена работоспособность разработанного метода и сходимость процедуры неявного перебора с использованием многоагентного подхода ММК к устойчивым рациональным решениям. В частности на рис. 7 показаны решения, найденные процедурой неявного перебора при решении задачи без ограничений и сформированное в результате множество Паретто. Объем полного перебора составляет $1,75 \cdot 10^9$ возможных решений. Для нахождения рационального решения ММК рассматривает около 50 различных решений, что составляет 0,000002% от общего числа решений.

Оценка потребляемых вычислительных ресурсов показывает, что для проведения вычислительных экспериментов по выбору решений в варианте без ограничений потребовалось 7МБ оперативной памяти и 1 час машинного времени. Указанные затраты возрастают с увеличением количества элементов в НС, рассматриваемых в объектах АТ, количества параллельно функционирующих ЛА, количества складов ТЦ, АРЗ и ПИ (рис. 8).

Для оценки возможности применения разработанных моделей и методов в реальных условиях рассматривался тестовый пример, содержащий 75 АТ, распределенных по 15 АЧ на всей территории РФ. Обслуживанием данных ЛА занимаются 3 АРЗ и Иркутское авиастроительное

предприятие (ИАП) в качестве ПИ (рис. 9). Объем полного перебора составляет более 10^{46} решений. По результатам проведенных экспериментов потребление оперативной памяти возросло до 8Мб, а машинное время, необходимое для реализации одного прогона КВИМ, составила 40 минут, а время работы ММК для нахождения 10 различных решений (количество прогонов КВИМ для получения оценок КОРМ равно 30) 3,5 дня. Для данных тестовых примеров были определены планы поставки ЗЧ для обеспечения требуемых характеристик процессов МТО ППО АТ ВН.

В заключении перечислены основные результаты диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработан комплекс взаимосвязанных имитационных моделей для анализа процессов ППО АТ ВН, включающий в себя: имитационную модель надежностной 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. [3,4]
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. [1,2,4]
3. Среди имитационных моделей КВИМ стоит отметить модель надежностной структуры, описывающую процессы отказа и восстановления надежностной структуры АТ. В данной имитационной модели восстановление отказавшей СЧ АТ происходит только после обнаружения отказа. Обнаружение отказавшей СЧ АТ может произойти 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.[3]
4. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее КВИМ и СППР. Проведена верификация программного обеспечения на тестовом примере. [4]

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК, для опубликования основных научных результатов диссертации:

1. 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
2. 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
3. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Имитационная модель надежностной 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.
4. 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

В прочих изданиях:

5. Khahuln G.F. Titov Yu.P. Simulation model of military aircraft dependable structure and its use in the research of after-sale service processes // Journal Dependability №3 (50) 2014/ "Journal "Reliability"" LTd, 2014 pp. 16-26
6. Titov Yu.P. Modifications of the ant colony method for aviation routing problems // Automation and Remote Control March 2015, Volume 76, Issue 3 pp 458-471
7. 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
8. Павленко А.И. Титов Ю.П. Методы муравьиной оптимизации в задачах распределения ресурсов. // 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика 2010». Москва. Тезисы докладов.– СПб.: Мастерская печати, 2010. с. 313
9. 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
10. 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
11. Хахулин Г.Ф. Титов Ю.П. Имитационная модель многоуровневой надежностной 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
12. 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

13. 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. - Ульяновск: УлГУ, 2014. с. 335-337.

Множительный центр МАИ (НИУ)

Заказ от « 27» октября 2015г.

Тираж 100 экз.