

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Лахин Олег Иванович

**УПРАВЛЕНИЕ ГРУЗОПОТОКОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ УДАЛЕННОГО БАЗИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)

**Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Скобелев Петр Олегович

Самара – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УДАЛЕННОГО БАЗИРОВАНИЯ.... | 14 |
| 1.1 Проблемы процесса управления грузопотоком и особенности современных пилотируемых космических аппаратов как объекта управления | 14 |
| 1.2 Анализ процесса управления полетом и грузопотоком РС МКС | 18 |
| 1.3 Анализ процесса группового построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС..... | 22 |
| 1.4 Анализ событий и сценариев изменения грузопотока РС МКС | 30 |
| 1.5 Обобщенная постановка задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС | 34 |
| 1.5.1 Формализация начальных данных задачи..... | 34 |
| 1.5.2 Формализация результата решения задачи | 35 |
| 1.6 Обзор существующих методов и средств управления ресурсами | 37 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 | 58 |
| 2 РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ПВ-СЕТИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ И МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ РС МКС | 60 |
| 2.1 Мультиагентные технологии для адаптивного управления сложными системами..... | 60 |
| 2.2 Формализованное описание критериев, предпочтений и ограничений для построения программы полета и грузопотока РС МКС | 66 |
| 2.2.1 Ключевые частные критерии принятия решения | 66 |
| 2.2.2 Построение комплексного критерия оценки решения задачи | 68 |
| 2.2.3 Основные правила и ограничения..... | 71 |
| 2.3 Развитие модели ПВ-сети управления грузопотоком и модификация метода сопряженных взаимодействия для построения программы полета и грузопотока РС МКС | 74 |

| | |
|---|-----|
| 2.3.1 Базовые принципы концепции ПВ-сети и метода сопряженных взаимодействий | 74 |
| 2.3.2 Развитие модели ПВ-сети и модификация метода для управления грузопотоком РС МКС | 79 |
| 2.3.3 Ключевые критерии принятия решения | 86 |
| 2.3.4 Оценочные функции удовлетворенности агентов..... | 87 |
| 2.3.5 Общая схема работы модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока РС МКС..... | 92 |
| 2.3.6 Протокол взаимодействия агентов для построения программы полета и грузопотока РС МКС..... | 94 |
| 2.4 Онтология управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования..... | 97 |
| 2.4.1 Основные понятия и особенности применения онтологий для описания предметной области..... | 97 |
| 2.4.2 Обзор инструментальных средств для построения онтологий | 99 |
| 2.4.3 Конструктор онтологий, моделей и сцен | 100 |
| 2.4.4 Применение онтологии для управления грузопотоком РС МКС | 102 |
| 2.4.5 Онтология конфигурации космических аппаратов | 105 |
| 2.4.6 Использование онтологии конфигурации космических аппаратов при планировании программы полета..... | 108 |
| 2.4.7 Онтология построения грузопотока..... | 109 |
| 2.4.8 Использование онтологии построения грузопотока при распределении грузов по полетам транспортных кораблей | 110 |
| 2.5 Исследование эффективности модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока..... | 111 |
| 2.5.1 Исследование зависимости времени вычислений на размещение грузов на транспортных кораблях от количества грузов..... | 111 |
| 2.5.2 Исследование влияния фазы разрешения конфликтов на качество результатов | 114 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 | 116 |

| | |
|---|-----|
| 3 АРХИТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ | 118 |
| 3.1 Основные принципы разработки мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС | 118 |
| 3.2 Назначение, цели и задачи создания МАС «Грузопоток»..... | 119 |
| 3.3 Основные функциональные возможности МАС «Грузопоток» | 122 |
| 3.4 Архитектура МАС «Грузопоток»..... | 123 |
| 3.5 Виртуальный мир модулей планирования | 125 |
| 3.6 Описание использования МАС «Грузопоток» для адаптивного перепланирования на примере потери ТК «Прогресс М-27М»..... | 127 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 | 135 |
| 4 РЕАЛИЗАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ РС МКС | 136 |
| 4.1 Группы пользователей МАС «Грузопоток» и их функции | 136 |
| 4.2 Процессы использования МАС «Грузопоток» | 137 |
| 4.3 Основные модули МАС «Грузопоток»..... | 138 |
| 4.4 Автоматизированные рабочие места МАС «Грузопоток» | 139 |
| 4.5 Интеграция МАС «Грузопоток» в информационную среду РКК «Энергия»..... | 144 |
| 4.6 Результаты и оценка эффективности внедрения МАС «Грузопоток» | 145 |
| 4.7 Перспективы развития МАС «Грузопоток»..... | 151 |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 | 153 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 154 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... | 155 |
| ЛИТЕРАТУРА | 156 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРУЗОПОТОКА | 171 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ..... | 177 |

| | |
|--|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАХИНА О. И. В РКК «ЭНЕРГИЯ» | 179 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАХИНА О. И. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА | 181 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАХИНА О. И. В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ..... | 182 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Управление грузопотоком для обеспечения автономной жизнедеятельности труднодоступных нефтегазовых месторождений, удаленных северных поселений, орбитальных космических станций, включая в будущем и дальний космос, является актуальной задачей для обеспечения безопасности и надежности при эксплуатации указанных объектов.

Решение этой задачи требует учета ряда возмущающих факторов, вызывающих необходимость оперативной реакции в принятии решений по формированию состава грузов и расписаний движения транспортных средств (ТС) по мере возникновения различных событий, связанных с изменениями режимов эксплуатации объекта, доступности ТС, потребностей в доставляемых грузах и др.

Одним из примеров таких особенно сложных технических объектов является Международная космическая станция (МКС), эксплуатируемая в экстремальных для выживания условиях. Вся жизнедеятельность станции напрямую зависит от своевременности ее обеспечения ресурсами, включая топливо для маневров, воду и воздух, продукты питания для космонавтов, научную аппаратуру (НА) и запасные части для ремонта техники – всего около семи тысяч наименований грузов [1-5].

Для успешного решения задачи управления грузопотоком Российского сегмента МКС (РС МКС) требуется построение, согласование и адаптация по событиям многоуровневых и взаимоувязанных планов различных подразделений, поддерживающих жизненный цикл грузов: от поступления заявки на груз до их возврата и утилизации. При этом требуется учитывать индивидуальные особенности транспортных кораблей (ТК), грузовых (ТГК) и пилотируемых (ТПК), размеры отсеков на МКС, массу и объем каждого груза, состояние оборудования на борту, потребности экипажа в топливе, воде, продовольствии, баллистику полета и т.д. При этом любое важное событие, например, перенос дат стартов ТК, изменение состава экипажа, поломки оборудования, внеплановые эксперименты или появление космического мусора на орбите ведет к пересчету планов.

До недавнего времени эта задача решалась вручную с использованием Excel-таблиц проектантами и кураторами РКК «Энергия» с привлечением специалистов других подразделений, которым для выработки согласованных решений приходилось вручную производить много корректировок планов, что влекло за собой большие затраты времени, ошибки в расчетах, задержки сроков и т.д.

С целью выбора методов и средств автоматизации процессов решения поставленной задачи были рассмотрены теоретические основы и практический опыт управления космическими полетами, представленные в работах Соловьева В. А., Лысенко Л. Н., Любинского В. Е. и ряда других авторов [6-7]. В этих работах показано, что безопасность и надежность работы МКС во многом определяется эффективностью командной работы, предполагающей выработку согласованных решений всеми участниками команды при формировании планов доставки грузов.

Большую роль в решении важных задач управления сыграли работы Беллмана Р., Канторовича Л. В., Конвея Р. В., Максвелла В. Л., Миллера Л. В., Буркова В. Н., Новикова Д. А., Лазарева А. А., Шмелева В. В. и ряда других [8-14]. Помимо развития классических методов линейного и динамического программирования, в настоящее время активно развиваются такие эвристические методы, как табу-поиск, метод отжига, муравьиные алгоритмы, нейронные сети, генетические алгоритмы и др. Однако, в классической постановке предполагается, что заказы и ресурсы заранее известны, однородны и не меняются в ходе вычислений. В данной же задаче каждая бортовая система МКС обладает индивидуальными особенностями и требует своих ресурсов, которые зависят от ситуации на борту, интенсивности расхода ресурсов, времени работы и т.п.

В этом плане особую важность для настоящего исследования получили работы Пригожина И., Хакена Г. и Ржевского Г. А. [15-17], показавших возможность применения принципов самоорганизации для управления сложными адаптивными системами, к числу которых можно отнести и управление грузопотоком.

В работах Вулдриджа М., Граничина О. Н., Городецкого В. И. [18-20] были показаны перспективы применения мультиагентных технологий для решения

сложных задач согласования решений в условиях неопределенности, в которых традиционные методы трудно применимы в связи с наличием разнородных критериев принятия решений участников, высокой размерностью, сложностью и взаимной зависимостью планов, наличием шумов и помех. Предполагается, что мультиагентные технологии со временем смогут заменить существующие методы и средства планирования и оптимизации ресурсов, включая известные решатели задач: Microsoft Solver Foundation, IBM Solver, ILog, J-Log, Quintic, Scilab и другие, работающие в пакетном режиме.

В работах Оливера де Вега из М.И.Т. (США) и ряда других исследователей логистики создания удаленных баз и освоения дальнего космоса отмечается, что сложность, неопределенность и динамика управления космическими полетами в будущем будут только нарастать и в этих условиях будут необходимы новые методы и средства согласованного принятия решений [21-22].

Новые подходы к решению рассматриваемых задач начали развиваться в рамках научного направления Кибернетика 2.0, которое предполагает усиление роли коммуникационных аспектов в принятии решений [23]. В трудах Виттиха В. А. [24-25] разработаны принципы эвергетики – новой пост-неклассической науки о процессах управления, включающей человека-актера из повседневности в принятие решений по урегулированию проблемных ситуаций путем поиска компромиссов по ключевым критериям (ценностям). В работах Виттиха В. А. и Скобелева П. О. [26-27] в качестве инструмента эвергетики предложено понятие сети потребностей и возможностей (ПВ-сети), моделирующей процессы выработки акторами согласованных решений при построении расписаний использования ресурсов в логистических задачах на основе мультиагентных технологий. Выводы и результаты этих работ могут быть использованы при создании моделей, методов и средств управления грузопотоком объектов удаленного базирования.

В этой связи предлагаемая в диссертации разработка метода и средств управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на основе мультиагентных технологий представляет собой актуальную и значимую задачу для современной науки об управлении и аэрокосмической отрасли.

Целью диссертационного исследования является разработка моделей, методов и средств поддержки принятия решений управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования (на примере РС МКС), повышающих оперативность, гибкость и эффективность этого процесса.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1) провести системный анализ процессов управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на примере согласованного построения программы полета, плана грузопотока и расчета ресурсов РС МКС;

2) развить концепцию ПВ-сети управления грузопотоком и провести модификацию метода сопряженных взаимодействий для решения задачи управления грузопотоком РС МКС и согласования планов с участниками процессов принятия решений, в первую очередь, с проектантами и кураторами;

3) разработать онтологию предметной области управления грузопотоком и показать возможности ее использования для настройки ПВ-сети на особенности технического объекта, например, бортовых систем РС МКС, полетов ТГК и ТПК, грузов и экипажа (как в случае введения нового типа корабля Dragon);

4) разработать архитектуру мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком сложных технических объектов;

5) разработать и реализовать модель данных, алгоритмы метода и программные средства мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС;

6) провести экспериментальное исследование качества и эффективности предложенных решений при планировании грузопотока.

Методы исследования. В качестве методологической основы решения указанных задач в диссертационной работе использовались теория интерсубъективного управления, принципы и методы системного анализа, в частности, эвергетики, метод сопряженных взаимодействий в ПВ-сетях, методы представления знаний на основе онтологий и семантических сетей. Для подтверждения полученных теоретических результатов применялись методы

математического и имитационного моделирования, а также сравнение результатов планирования в системе с реальными и модельными планами.

Достоверность результатов обеспечивается использованием выводов и рекомендаций теории интерсубъективного управления, применением апробированной концепции ПВ-сетей и метода сопряженных взаимодействий, сравнением полученных результатов исследований с результатами традиционного построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС в РКК «Энергия», непротиворечивостью предложенных математических моделей и методов решения, а также использованием мультиагентной платформы для управления ресурсами, успешно применяемой в других приложениях.

Объектом исследования является процесс управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования, который необходим для обеспечения ресурсами всего комплекса решаемых прикладных задач, а также итерационного построения и согласования программы полета и грузопотока РС МКС в РКК «Энергия», предполагающий участие более 150 специалистов (проектантов и кураторов) в контуре управления.

Предметом исследования являются: модели, методы и средства поддержки принятия решений по управлению грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на основе мультиагентных технологий.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1) формализована постановка задачи построения плана грузопотока РС МКС на основе поиска баланса интересов всех участников, позволяющая учитывать индивидуальные особенности (критерии, предпочтения и ограничения) подсистем МКС, ТС, грузов и экипажа;

2) развита концепция ПВ-сети управления грузопотоком для сложных технических объектов удаленного базирования, отличающаяся (а) введением новых классов агентов, представляющих в архитектуре программного обеспечения подсистемы объекта, ТС, грузов и команды (экипажа), (б) применением новых протоколов их взаимодействия, а также (в) использованием специальной модификации метода сопряженных взаимодействий в ПВ-сетях для управления

грузопотоком РС МКС, что совместно позволяет учитывать логику планирования основных категорий грузов и обеспечивать баланс интересов в ходе построения программы полета и плана грузопотока РС МКС;

3) разработана онтология для формализации семантики задачи управления грузопотоком для сложных технических объектов удаленного базирования, позволяющая выделить общие свойства и учитывать индивидуальные особенности подсистем объекта, ТС, грузов и экипажа, а также без перепрограммирования вводить новые классы объектов, влияющих на планы доставки грузов;

4) реализована мультиагентная система поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС, возможности которой применимы для решения ряда подобных задач для удаленных и труднодоступных объектов.

Практическая значимость результатов работы позволяет:

1) повысить надежность доставки грузов при эксплуатации объектов за счет возможности моделирования различных сценариев развития проблемных ситуаций при управлении грузопотоком (для РС МКС – перенос стартов кораблей, нештатные ситуации на борту МКС, корректировки орбиты, потеря корабля и др.);

2) снизить трудоемкость процесса планирования за счет создания общего информационного поля, поддерживающего процессы автоматического принятия взаимоувязанных и согласованных решений, генерируемых с помощью разработанной мультиагентной системы; это общее информационное поле доступно всем членам команды кураторов и проектантов, в отличие от существующей информационной поддержки процессов планирования в виде слабо связанных Excel-таблиц, требующих для принятия решений ручной работы;

3) повысить оперативность, гибкость и эффективность процесса построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС, что существенно сокращает сложность и трудоемкость расчетов, уменьшает сроки и снижает число ошибок, связанных с человеческим фактором;

4) обеспечить возможность дополнять и учитывать индивидуальные особенности модулей и бортовых систем МКС, полетов ТГК и ТПК, грузов и

членов экипажа за счет использования онтологии проблемы управления грузопотоком РС МКС;

5) применять полученные мультиагентные модели, алгоритмы и программное обеспечение в других приложениях, где своевременность доставки грузов имеет жизненную важность, а их доставка – высокую стоимость; примерами таких приложений являются задачи ресурсного обеспечения удаленных нефтяных платформ, арктических станций и т.п.

Положения, выносимые на защиту:

1) постановка задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС с учетом баланса интересов и индивидуальных особенностей участников;

2) расширенная модель ПВ-сети управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования и модифицированный метод сопряженных взаимодействий для управления грузопотоком РС МКС, обеспечивающий совместную работу команды проектантов и кураторов при построении программы полета и грузопотока РС МКС;

3) онтология проблемы управления грузопотоком для РС МКС, позволяющая сформировать базу знаний и настраивать систему на индивидуальные особенности предметной области при формировании и согласовании планов;

4) мультиагентная система поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС, интегрированная с существующими системами предприятия IMS, АСП РС МКС, Windchill, позволяющая автоматизировать процесс интерактивного построения и согласования планов грузопотока РС МКС, и обеспечивающая оперативное, гибкое и эффективное формирование планов.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при проектировании, разработке и внедрении в РКК «Энергия» интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610854 от 20 января 2015 года и имеется акт внедрения результатов в РКК «Энергия». Результаты работы используются в учебном процессе Самарского университета в курсе

«Онтология производственной сферы» для подготовки бакалавров по направлению 15.03.04 и в учебном процессе Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики» в курсе «Методология управления» для подготовки бакалавров по направлению 09.03.01.

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научно-технических конференциях: IV Междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (г. Минск, 20 – 22 февраля 2014 г.); XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 30 июня - 03 июля 2014 г.); V Междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (г. Минск, 19 – 21 февраля 2015 г.); XVII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 22 – 25 июня 2015 г.); XI Междунар. науч.-практич. конф. «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 10 – 12 ноября 2015 г.); VI Междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (г. Минск, 18 – 20 февраля 2016 г.); XVIII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 20 – 25 сентября 2016 г.); VI Науч.-техн. конф. молод. учён. и специалистов ЦУП (г. Королев, 07 – 09 апреля 2016 г.); Междунар. конф. International Conference on Complex Systems in Business, Administration, Science and Engineering (New Forest, UK, 01 – 03 June, 2016).

Основные публикации. Результаты диссертации опубликованы в 20 работах, из них 7 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, 4 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus, 1 публикация в рецензируемом журнале, 8 работ в трудах международных и всероссийских конференций; имеется также свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, пяти приложений, списка литературы, включающего 140 источников. Текст занимает 182 страницы основной части, содержит 43 рисунка, 16 таблиц и 5 приложений объемом 12 страниц.

1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УДАЛЕННОГО БАЗИРОВАНИЯ

1.1 Проблемы процесса управления грузопотоком и особенности современных пилотируемых космических аппаратов как объекта управления

Существует специфический класс прикладных задач управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования, где своевременная доставка грузов имеет большое значение для обеспечения безопасности, надежности и жизнедеятельности при эксплуатации этих объектов в критической для выживания среде. При этом ресурсы по доставке грузов имеют высокую стоимость, а множество возмущающих факторов вызывают большую неопределенность в принятии решений. Примеры задач управления грузопотоком: обеспечение грузами труднодоступных нефтегазовых месторождений, удаленных северных поселений, орбитальных космических станций, включая дальний космос.

Формирование расписания движений ТС и планирование грузопотока сопряжено с учетом множеством потребностей при изменении режимов эксплуатации объекта, доступности ТС и индивидуальных особенностей доставляемых грузов. При планировании грузопотока требуется учитывать множество разнородных критериев, ограничений и предпочтений, а планы требуют оперативного согласования по мере возникновения непредвиденных событий.

Специфика предложенного класса задач управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования такова, что при их решении известными методами возникает проблема оперативного изменения и согласования всех планов по событиям. Эта проблема существует для большого класса сложных технических объектов, которые являются уникальными и требуют учета своей специфики и индивидуальных особенностей при принятии решений.

Для решения подобного класса задач хорошо зарекомендовали себя активно развивающиеся в последнее время мультиагентные технологии. Однако известные мультиагентные системы не позволяют эффективно решать предлагаемый класс

задач, в результате требуется развитие моделей, методов и автоматизированных средств поддержки принятия решений для управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на основе мультиагентных технологий. При этом необходима разработка новых классов агентов для рассматриваемой предметной области и протоколов их взаимодействия для выработки согласованных решений и поиска баланса интересов.

Одним из наиболее сложных процессов управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования является процесс управление грузопотоком РС МКС, на примере которого предлагается разработка метода и средств поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС.

Освоение космоса является актуальной сферой человеческой деятельности и открывает новые перспективы человечеству, но при этом формирует мощный вызов всем существующим технологиям, включая информационные. Априорно имеющаяся здесь высокая сложность и неопределенность, агрессивная среда, необходимость обеспечения надежности космических аппаратов (КА) и безопасности экипажа, постоянно порождают проблемы, которые можно решить только с созданием и использованием новых подходов, обеспечивающих поддержку принятия решений в реальном времени.

Эффективная эксплуатация КА и комплексов является важнейшим условием для достижения цели любой космической программы. Как отмечается в работе [1] понятие «эксплуатация космических аппаратов и комплексов» включает в себя следующие основные составляющие: управление полетом КА с обеспечением требуемой надежности работы КА и безопасности его экипажа; выполнение транспортных операций ТК типа ТПК «Союз ТМА» и ТГК «Прогресс М»; координирование доработки и дооснащения бортовых систем станции и наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ); подготовка предложений по совершенствованию технологии выполнения полета и управления им.

При управлении пилотируемыми полетами выделяют следующие основные приоритеты: максимально возможная безопасность экипажа; живучесть КА в целом и его сегментов; выполнение программы полета в полном объеме.

При этом сложность управления космическим полетом со временем только возрастает и зависит от следующих факторов (табл. 1.1): количество операций, выполняемых КА (возросло от 5 на корабле «Восток» в 1961 году до 100 000 на МКС в 2016 году); количество управляющих воздействий на бортовые системы (возросло от 48 на «Востоке» до 12 000 на МКС); количество наблюдаемых параметров, характеризующих функционирование КА (возросло от 400 на «Востоке» до 50 000 на МКС); сложность баллистической схемы полета; многообразие правил планирования полета; количество алгоритмов обработки и анализа наблюдаемых параметров; количество нештатных ситуаций.

Таблица 1.1 – Тенденция усложнения управления космическими полетами

| Пилотируемый КА | «Восток» 1961 | «Союз» 1966 | «Мир» 1986 | МКС 1998 | МКС 2016 |
|--|-------------------------------|-------------------------------|--|---|---|
| Количество выполняемых операций | 5 | 30 | 500 | 5 000 | 100 000 |
| Количество управляющих воздействий на бортовые системы | 48 | 256 | 4 096 | 8 000 | > 15 000 |
| Количество телеметрических параметров | 400 | 1 000 | 14 000 | 30 000 | > 90 000 |
| Особенности управления полетом | Управление одиночным объектом | Управление одиночным объектом | «Суточное» управления различными объектами | Распределенное управление из «ЦУПа-Х и ЦУПа-М | Распределенное управление из нескольких ЦУП (РФ, США, Япония, ЕС) |

В настоящее время в международной космонавтике основным объектом управления является пилотируемый комплекс МКС с обслуживающими его пилотируемыми кораблями ТПК «Союз ТМА» и грузовыми кораблями ТК «Прогресс М». Особенностью усложняющей управление полетом МКС является распределенное управления станцией из нескольких центров управления полетом (ЦУП), принадлежащих космическим агентствам разных стран.

МКС состоит из двух сегментов: Российского сегмента (РС) и Американского сегмента (АС). Российская и американская стороны несут ответственность за функционирование своего сегмента и снабжение жизненно важными грузами своей части станции и экипажа.

При решении задач управления полетом и материального снабжения РС МКС необходимо обеспечить достижение комплекса целей полета [6]: доставка полезного груза и космонавтов на станцию; обеспечение в любых ситуациях спасения жизни экипажа; обеспечение безопасной, надежной и эффективной эксплуатации РС МКС; обеспечение реализации программ научно-прикладных исследований (НПИ), проводимых на борту РС МКС; возвращение на Землю экипажа МКС, результатов космических экспериментов (КЭ) и других необходимых грузов; выработка согласованного решения ответственными специалистами группы управления полетом, выраженного в планах, методиках, указаниях экипажу, управляющих воздействиях на бортовые системы и т.д.

В настоящее время РС МКС состоит из следующих модулей [28]: функционального грузового блока (ФГБ) «Заря»; служебного модуля (СМ) «Звезда»; стыковочного отсека (СО1) «Пирс»; малых исследовательских модулей (МИМ1) «Рассвет» и (МИМ2) «Поиск»; ТГК «Прогресс М» и ТПК «Союз ТМА».

Каждый модуль состоит из множества различных бортовых систем, например, бортовая вычислительная система (БВС) и система управления бортовой аппаратуры (СУБА) находятся в модуле СМ. БВС предназначена для управления бортовыми системами СМ и координации работы всех модулей РС МКС, решения задач планирования и автономного управления, обеспечения связи с системой управления бортовой аппаратурой АС. В свою очередь в состав БВС входят следующие подсистемы: цифровая вычислительная машина (ЦВМ), терминальная вычислительная машина (ТВМ), устройства сопряжения (УС21, УС22), контроллер сетевых каналов (КСК), коммутатор согласующих резисторов (КСР), каждая из которых состоит из составляющих. СУБА предназначена для управления, контроля и диагностики бортовых систем СМ и состоит из порядка 100 элементов, большинство из которых также состоит из определенных частей.

Таким образом РС МКС состоит из множества элементов, которые в свою очередь включают в себя большое количество более простых элементов. Сложность системы определяется не только обилием элементов и сложностью их структуры, но и сложностью функциональных и логических связей между ними,

многорежимностью, возможностью восстанавливаемых и невосстанавливаемых отказов у одних и тех же элементов в зависимости от характера самого отказа и т.д.

Контур управления РС МКС включает в себя в качестве отдельных элементов также специалистов главной оперативной группы управления на Земле и экипаж МКС. Структура связей внутри РС МКС является сложной вследствие их большого количества, многочисленных пересечений и различной природы.

Таким образом РС МКС представляет собой сложную систему. При этом для решения задач управления станции необходимо учитывать специфику управления полетом РС МКС и повысить эффективность процесса принятия решения за счет внесения элементов самоорганизации и выработки согласованных решений.

Одним из наиболее трудоемких и сложных компонентов процесса эксплуатации РС МКС, обеспечивающих основные приоритеты управления станции, является процесс управления грузопотоком РС МКС, который служит для материального снабжения орбитальной станции, выполнения целевых операций, ее обслуживания и ремонта, утилизации отходов и отслужившего оборудования.

В связи с усложнением конструкции РС МКС и устойчивым возрастанием объемов обрабатываемой информации для управления полетом, необходимо развитие и автоматизация процесса управления грузопотоком РС МКС в рамках единой наземно-космической системы, направленной на достижение целей полета.

При изучении особенностей организации процесса управления полетом и грузопотоком РС МКС необходимо четко представлять весь механизм в целом для чего рассмотрим его более подробно.

1.2 Анализ процесса управления полетом и грузопотоком РС МКС

Управление полетом РС МКС – это процесс, включающий ряд последовательно выполняемых операций, направленных на последовательное изменение параметров состояния станции для реализации целей полета в соответствии с планом полета [6]. Под оперативным управлением полетом понимается управление объектом в реальном или близком к реальному времени. Для оперативного управления полетом требуется достаточно точная оценка на текущий момент времени эксплуатационных качеств объекта (функциональные

возможности, располагаемые ресурсы, характеристики операций, которые объект может выполнять в полете, состав бортовых систем и режимы их работы, методики управления бортовыми системами, описание каналов управления, методики контроля состояний и работы бортовых систем, ограничения на режимы работы).

Множество задач, которое возможно реализовать при помощи станции, определяется совокупностью следующих факторов: располагаемыми ресурсами (топливо, воздух, электроэнергия и т.д.) и функциональными возможностями.

Поставленные задачи и цели полета для станции, характеристики системы и функциональные возможности в процессе продолжительного срока эксплуатации могут варьироваться и уточняться. РС МКС является многоцелевой системой, основными задачами управления которой являются: обеспечение безопасности экипажа и живучести станции; своевременное снабжение станции; планирование полетных операций и КЭ, анализ действий экипажа; контроль и анализ работы бортовых систем станции; контроль параметров орбиты и расчёт маневров для ее поддержания, сближения и спуска; координация работы средств управления.

Процесс управления полетом можно обобщенно представить в виде следующих взаимосвязанных процессов: планирование полета, реализация разработанного плана, контроль полета, анализ результатов контроля, принятие решения по результатам контроля и внесение корректировок к разработанному плану (рис. 1.1). На основе описания этих процессов и их взаимодействия строится модель управления полетом РС МКС.

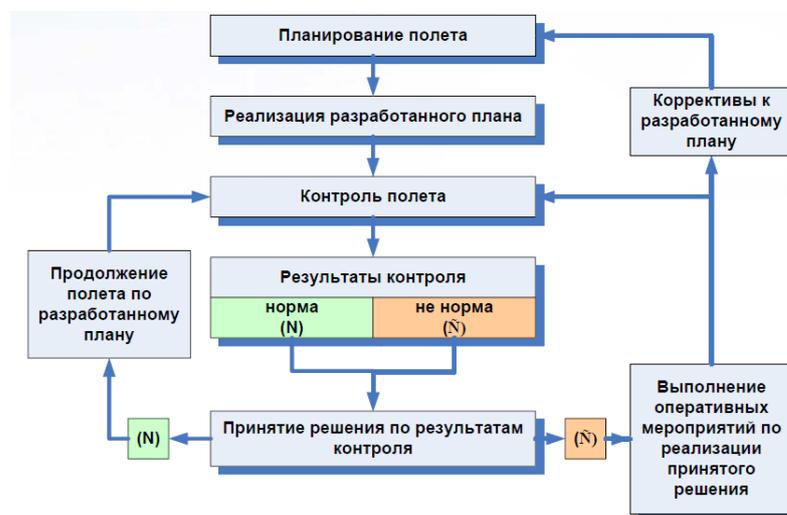


Рисунок 1.1 – Структура процесса управления космическим полетом

При этом одним из основных процессов управления полетом является планирование, где план рассматривается как документ планирования полета, включающий любую последовательность действий, направленных на достижение целей полета в текущей полетной ситуации на оцениваемом интервале времени.

Существует несколько уровней планирования, которые оказывают взаимное влияние друг на друга (рис. 1.2): стратегическое планирование (временной интервал – несколько лет); тактическое планирование (временной интервал – около года); исполнительное планирование (временной интервал – от полугода (номинальный план полета) до суток (детальный план полета)).

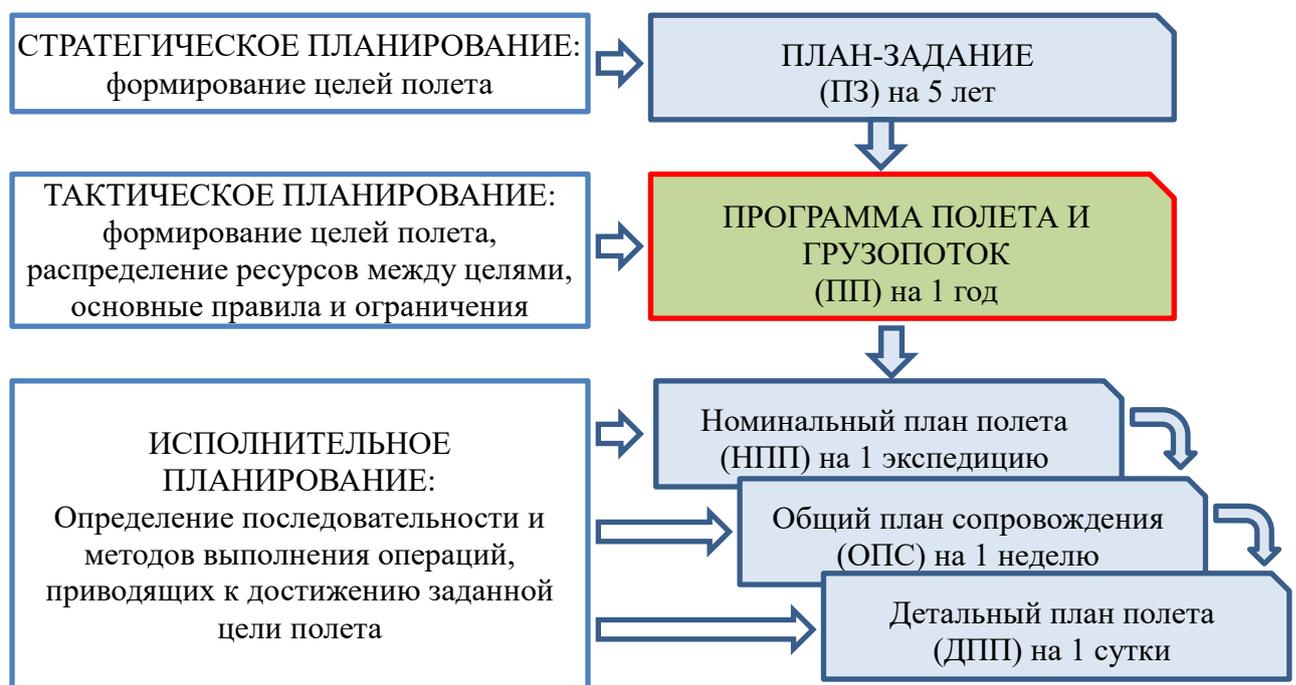


Рисунок 1.2 – Уровни планирования полета МКС

При переходе от стратегического уровня планирования к исполнительному уровню идет уточнение планов, их конкретизация и более глубокая детализация.

Стратегическое планирование решает задачу определения основных целей полета, проектных параметров бортовых систем, методов управления орбитальным комплексом (ОК) и т.д. На стадии тактического планирования рассчитываются даты стартов ТК, располагаемые на МКС ресурсы и пределы их расхода, перечень КЭ и др. Исполнительное планирование устанавливает конкретные даты, время, исполнителей, последовательность и методы выполнения полетных операций,

приводящих к достижению целей полета, порядок использования различных средств, входящих в состав системы управления полетом.

Контроль полета проводится непрерывно в процессе выполнения полета и включает несколько этапов: получение информации, описывающей фактическое состояние станции; обработка полученной информации для определения достоверных данных на момент контроля; анализ полученной информации.

По результатам контроля принимается решение следовать прежнему плану, если контролируемые параметры находятся в пределах допустимых значений, или перейти к скорректированному плану для достижения поставленных целей, если контролируемые параметры находятся вне диапазона допустимых значений.

В управлении полетом РС МКС задействованы различные группы специалистов, отвечающих за «свою» предметную область. Причем каждый специалист должен владеть большим количеством информации в своей области и уметь выбрать на основе сопоставлений, логических рассуждений, расчётов и моделирования лучший вариант для достижения поставленных целей. При этом необходимо учитывать сложность объекта управления, рост количества требований и ограничений, перепланирование при возникновении аномалий, нештатных и аварийных ситуаций в условиях дефицита времени, необходим анализ большого количества данных и соблюдение ограничений при принятии решений.

Окончательное решение принимается в результате совместной деятельности и переговоров специалистов различных групп управления. Однако отсутствие взаимосвязи между ними увеличивает сроки принятия решений, снижает их оперативность и эффективность.

Поддержание жизнедеятельности МКС и ее эффективное функционирование с учетом необходимости обеспечения существующей замкнутой системы жизнеобеспечения напрямую зависит от успешного решения задачи управления грузопотоком РС МКС. Решение данной задачи состоит из ряда взаимозависимых этапов, таких как формирование программы полета и расчёт времени экипажа, планирование поблочного грузопотока, где осуществляется расчет и планирование доставки топлива, воды, воздуха, кислорода и продовольствия, ремонтного

оборудования и НА, различных материалов и инструментов для сервисного обслуживания МКС и проведения КЭ, размещение доставленных грузов, а также возврат грузов с результатами КЭ и утилизацию накапливаемых на МКС отходов, что предъявляет ряд специальных правил, условий и ограничений, а также требует учета множества факторов (состояние бортовых систем МКС, грузоподъемность ТК, объемы отсеков МКС, данных баллистики, веса и объемов груза и т.д.).

Работа по построению грузопотока РС МКС до недавнего времени выполнялась вручную проектантами и кураторами грузов, которым для получения рабочего плана приходилось вместе производить множество итераций и постоянно взаимодействовать для выработки и согласования компромиссных решений.

Основная сложность планирования заключается во взаимозависимости всех планов и принимаемых решений, что требует смыслового согласования и точной координации действий всех подразделений с учетом перечисленных факторов.

Вместе с тем, в традиционной постановке задачи управления распределением ресурсов до сих пор доминирует централизованный подход, в котором заранее определены все критерии и их важность, все заказы и ресурсы известны заранее и не меняются в ходе работы, а также однородны и обладают одними свойствами или характеристиками. В рассматриваемой же задаче каждая подсистема станции, например, система обеспечения жизнедеятельности, требует своих ресурсов, одна часть из которых требует уникальных расходных материалов, другая – разделяемых ресурсов, третья – зависит от интенсивности потребления, четвертая часть – от времени, а также обладает другими индивидуальными особенностями.

Процесс группового построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС является одним из основных при управлении грузопотоком РС МКС, рассмотрим его особенности более подробно.

1.3 Анализ процесса группового построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС

Как уже отмечалось, одна из важнейших задач жизнеобеспечения работы РС МКС – это управление грузопотоком станции для обеспечения ее важнейшими

грузами, такими как воздух и вода, топливо, продукты питания и НА для КЭ, а также возврата результатов КЭ и других грузов обратно на Землю [29].

Управление грузопотоком РС МКС обуславливается возрастающей сложностью процессов планирования и отслеживания исполнения программы полета и грузопотока станции, что вызывается следующими причинами [30]:

- главный приоритет – обеспечение безопасности экипажа;
- десятки запусков ТК различных типов, в том числе с международным участием, что требует работы с различными грузами от разных организаций;
- ограниченная грузоподъемность ТГК и ТПК, обслуживание МКС осуществляется в условиях жестких ограничений пространства, веса и времени;
- необходимость учета индивидуальных особенностей пусков ТК и каждой единицы оборудования;
- растущие потребности станции вызывает рост числа грузов, доставку и возврат которых необходимо планировать с учетом их накопления на МКС и пожеланий кураторов для выполнения программы полета;
- изменяемый регулярно состав экипажа необходимо своевременно обеспечивать запасами воды, воздуха и продуктами питания, а станцию топливом, запасными приборами и материалами;
- необходимо учитывать личные предпочтения космонавтов;
- разнородность доставляемых на борт станции грузов, наличие у них разнообразных индивидуальных особенностей и характеристик, ограничений и параметров, например, по весу и габаритам, в том числе своевременности доставки, необходимость соблюдения условий хранения и размещения, при этом грузы насчитывают тысячи наименований и десятки тысяч отдельных единиц;
- необходимость исполнения регламентов обслуживания и синхронизации использования грузов, например, доставка НА должна быть согласована с НПИ;
- необходимость нахождения оптимального баланса транспортировки топлива, воды, других ресурсов системы жизнеобеспечения, и прочих грузов;
- требуется постоянно проводить инвентаризацию и отслеживать местонахождение и статус имеющихся на борту запасов;

- необходимо отслеживать грузы и оборудование с истекающим сроком годности и временем наработки для их утилизации на ТК и высвобождения пространства под размещение новых доставляемых грузов;

- в случае аварий, нештатных ситуаций, задержек и переносов стартов требуется перепланирование с учетом корректировки сроков доставки грузов.

Кроме этого необходимо усилить контроль исполнения плана подготовки грузов к доставке на станцию для исключения непредвиденных ситуаций, вызывающих необходимость перепланирования грузопотока. Необходимо обеспечить принятие экономически целесообразных решений при планировании программы полета и грузопотока, с учетом, с одной стороны, высокой стоимости доставки грузов и их содержания на МКС, с другой – необходимости обеспечения безопасности жизнедеятельности и поддержания нормальной работы станции.

Выделим следующие основные особенности процесса планирования: при планировании работы РС МКС необходимо учитывать планы еще трех других космических агентств (США, ЕС, Япония); строятся планы на различный горизонт времени; процессом построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС управляет 8 проектантов и до 150 кураторов грузов; постоянно возникают конфликты между грузами различных приоритетов.

Построение программы полета, грузопотока и расчет ресурсов РС МКС состоит из нескольких этапов (рис. 1.3).

В ходе планирования формируются следующие виды планов:

- программа полета РС МКС представляет собой расписание стыковок, перестыковок, полета в составе станции и отстыковок различных типов ТК к основным модулям (портам) РС МКС на период один год, и учитывает различные ограничения, такие как временные периоды автономного полета ТК от старта до стыковки и от отстыковки до приземления или затопления, минимальный период времени между операциями стыковки и расстыковки между различными полетами ТК, необходимость постоянного наличия по меньшей мере одного пристыкованного к станции ТК, а также баллистические данные, позицию Солнца, ориентацию станции, освещенность «мишени» для стыковки и т.п.;

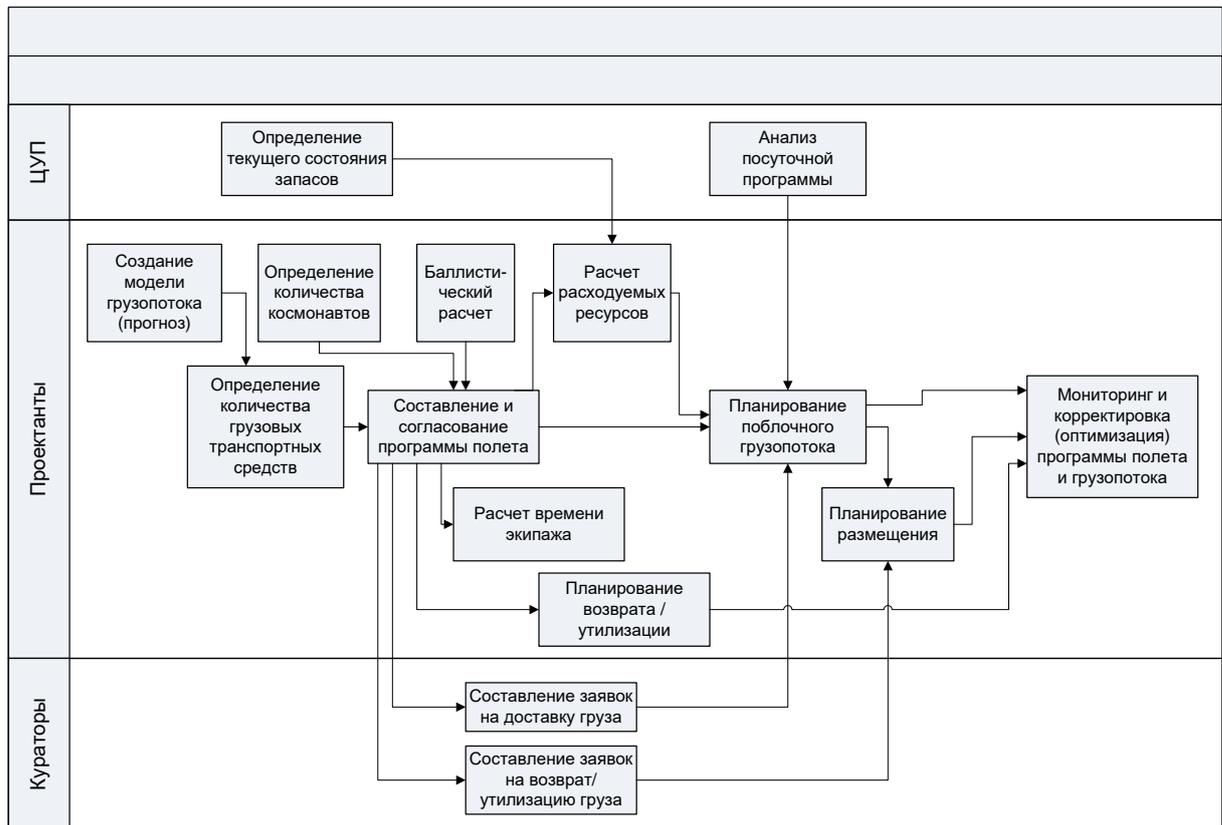


Рисунок 1.3 – Схема процесса построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС

- стратегический (укрупненный) план потребности в ресурсах, рассчитываемый на основе программы полетов и общего знания о потреблении с учетом необходимых технологических операций, численности космонавтов и т.д.;
- тактический план поблочного грузопотока, который указывает конкретные даты и объемы грузов для поставок топлива, воды, газа и продовольствия, систем, блоков и материалов для станции, основанный на программе полетов;
- планы размещения, утилизации и возврата грузов на Землю, рассчитанные с учетом наличия свободного места на РС МКС и дат отстыковки и возврата ТК.

1 этап – создание стратегической модели грузопотока. На первом этапе создается стратегическая модель грузопотока для расчета количества необходимых полетов ТК в год на основе количества ожидаемых экспедиций и состава экипажа.

2 этап – интерактивное формирование программы полета. Затем начинается процесс интерактивного построения программы полета. На данном этапе рассматриваются и сравниваются несколько вариантов программы полета, в которых определяются и согласовываются всеми заинтересованными участниками

количество и время стыковок и отстыковок ТК с модулями РС МКС с учетом периодов возможных стартов ТК, конфигурации, ожидаемого расположения и ориентации МКС, требований экипажа и т.д., пока не будет согласован и утвержден окончательный вариант программы.

Входные данные, используемые для построения программы полета, включают модель грузопотока РС МКС, данные баллистики, а также свойства ТК (грузоподъемность сухих грузов, объем баков топлива, воды и газа). При формировании программы полета ТК планируются по времени и распределяются по портам с учетом данных предыдущих периодов, на основании количества полетов ТК, определенных в модели грузопотока РС МКС и с приблизительной равномерностью распределения в течении года полетов ТГК и ТПК.

Кроме актуального варианта программы полета рассчитывается несколько альтернативных. Процесс интенсивного формирования программы полета на следующий календарный год идет на протяжении около трех месяцев в конце каждого года. Согласованная актуальная программа полета направляется на утверждение, после которого предоставляется кураторам для формирования заявок на доставку грузов на РС МКС. На протяжении всего календарного года программа полета уточняется по мере возникновения событий, что приводит к перепланированию стартов, стыковок и отстыковок ТК.

3 этап – планирование грузопотока и расчет баланса расходуемых ресурсов. На следующем этапе в соответствии с программой полета выполняется интерактивный процесс планирования поблочного грузопотока с распределением грузов по полетам ТК, а также производится расчет баланса топлива и воды. В этот процесс кроме проектантов вовлечены около 120 постоянных кураторов различных бортовых систем РС МКС. Данный процесс изначально предполагает многочисленные итерации для согласования конфликтных интересов проектантов и кураторов. Объемы грузов распределяются по полетам ТК на основе данных о среднем потреблении ресурсов экипажем и бортовыми системами МКС, а также информации о количестве космонавтов и о датах стартов и стыковок, которая имеется в программе полета.

4 этап – планирование размещения грузов на станции. На четвертом этапе план поблочного грузопотока дополняется планом размещения грузов на станции.

5 этап – планирование утилизации и возврата грузов. На пятом этапе планируется утилизация использованных ресурсов на затапливаемых ТК и возврат на Землю результатов КЭ на ТПК.

Все этапы связаны между собой и особенности планирования на одном этапе могут привести к изменениям на других. Например, изменения программы полета приводит к перераспределению грузов по ТК, а изменения грузопотока могут влиять на сроки стартов ТК. Если какие-то грузы не готовы к запланированной дате старта ТК, они снимаются, или если на конец года накапливается неготовность грузов, некоторый полет ТК может быть отменен, а остаток грузов с него перенесен на более ранние или поздние сроки.

При планировании на всех этих этапах учитывается множество различных по своей природе факторов: состояние бортовых систем, приборов и оборудования РС МКС, замкнутый объем станции и наличие в зонах хранения свободных мест для размещения грузов, постоянно изменяющиеся потребности в топливе, воде, воздухе и продуктах питания, рост интенсивности запусков ТК, ограниченную грузоподъемность ТК, особенности баллистики в движении станции и солнечную активность, типы ТК и стыковочных модулей МКС и другие. На процесс влияет также наличие жестко регламентированных правил и ограничений по временным параметрам (таким как сроки доставки, сроки старта, сроки возврата и т.п.).

При этом определяется масса сухих грузов, затем проверяется объем по топливу, воде и газообразным грузам. Осуществляются проверки временных ограничений (в том числе на операции космонавтов, которые связаны с использованием грузов). В случае возникновения необходимости, например, при поступлении срочной и важной заявки от кураторов, проводится возврат к плану доставки сухих грузов для его пересмотра. При анализе балансов топлива, газообразных грузов, воды и питания используются графики баланса. Для топлива расход определяется в соответствии с планом динамических операций на станции, для воды и питания расход рассчитывается по нормативам в соответствии с

количеством экипажа. Также из системы управления инвентаризацией МКС (IMS) в ежедневном режиме учитывается информация о фактическом наличии грузов на станции, которая может инициировать перепланирование в реальном времени.

Кроме того, необходимо принимать во внимание возможность появления непредвиденных событий, приводящих к пересмотру всех планов грузопотока, например, перенос дат стартов ТК, изменение дат стыковок и отстыковок ТК, возможные аварии и потери ТГК, изменение состава экипажа, нештатный выход в космос или внеплановые работы на борту станции, изменение планов проведения КЭ и т.п. Например, при появлении космического мусора на орбите возникает необходимость в экстренной корректировке орбиты станции для обеспечения безопасной удаленности от космического мусора, это требует включения двигателей и дополнительный расход топлива, что в свою очередь приводит к пересчету поблочного грузопотока для доставки на станцию дополнительного топлива на следующем ТГК, при этом необходимо какие-то грузы перераспределить на другие полеты ТК или совсем отменить. Также при возникновении нештатных ситуаций на борту станции возникает потребность в доставке дополнительных грузов, что из-за ограниченности грузоподъемности ТК может привести к необходимости уменьшить объемы топлива, воды, воздуха, и других грузов, согласованно меняя планы доставки грузов на других ТК (рис. 1.4).

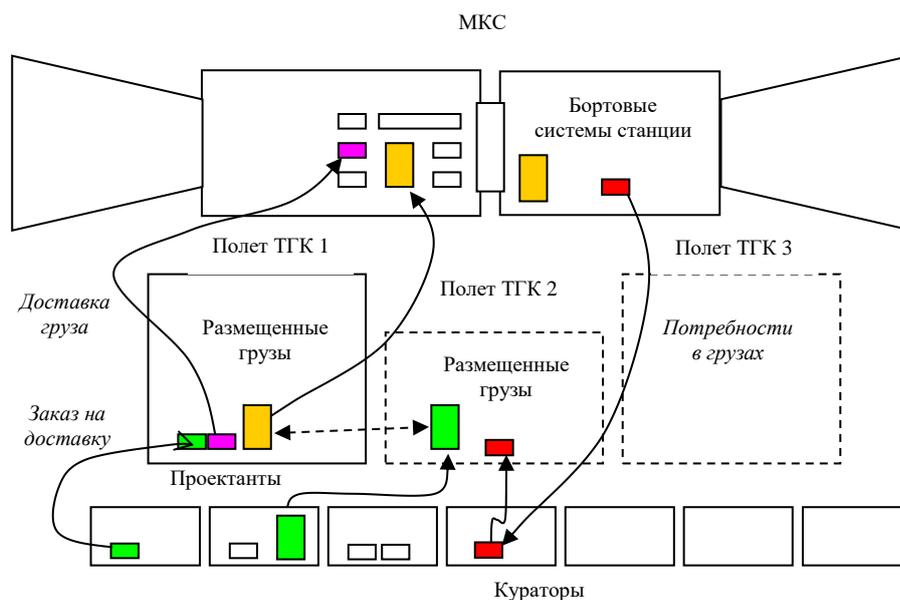


Рисунок 1.4 – Общий принцип управления грузопотоком РС МКС

Основная проблема и сложность планирования программы полетов и грузопотока заключаются в наличии ряда участников с собственными интересами и планами, в множестве вариантов и взаимозависимости создаваемых планов, ситуативном характере принимаемых решений, требующих согласования и координации действий всех участников, что приводит к большой сложности и трудоемкости этого процесса и высокой зависимости от человеческого фактора.

Основными участниками процесса управления грузопотоком РС МКС являются проектанты, кураторы, специалисты ЦУП и баллистики.

На рис. 1.5 приведена схема взаимодействия участников в процессах построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС.

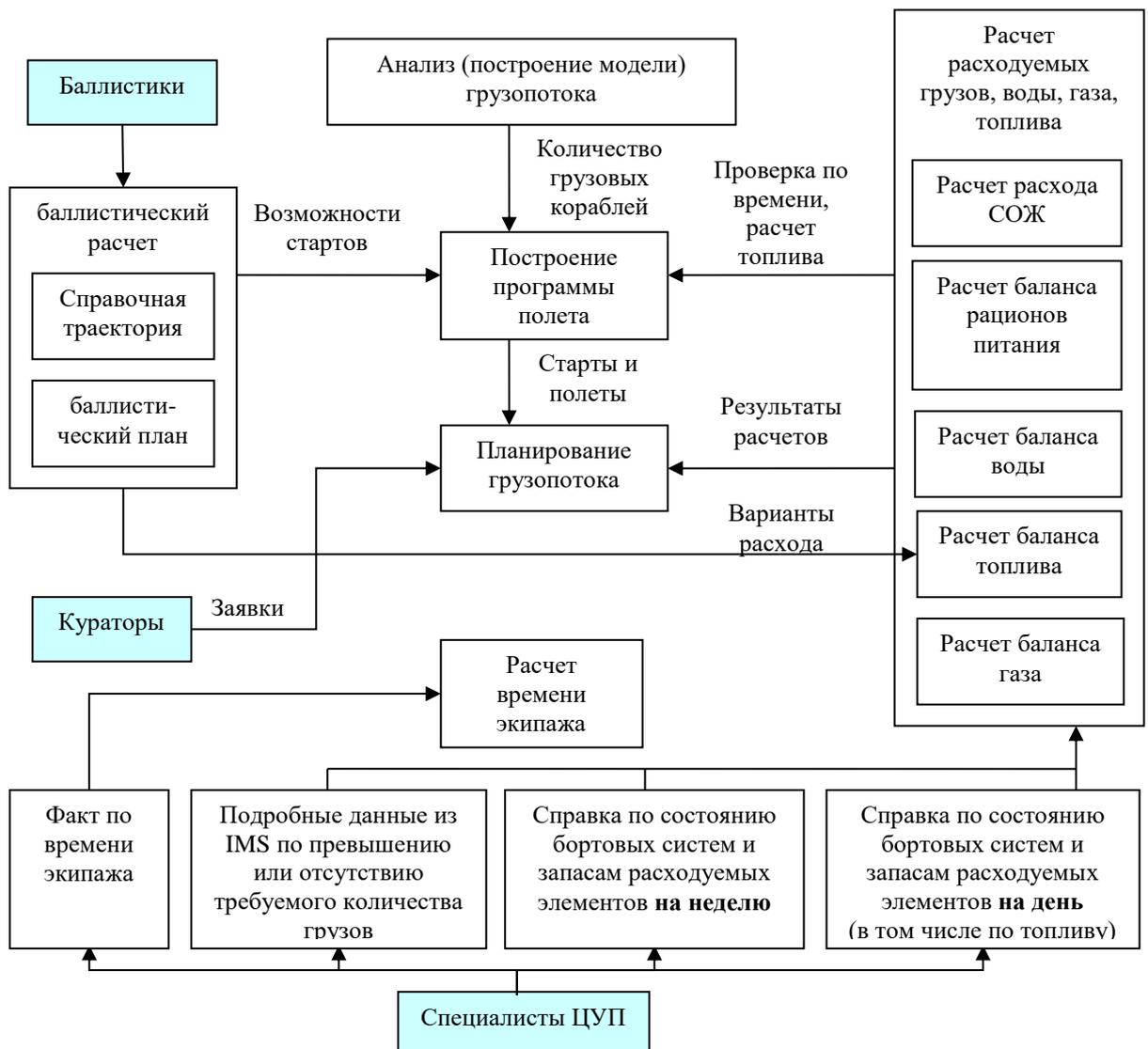


Рисунок 1.5 – Схема взаимодействия в процессах построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС

В табл. 1.2 приведены основные функции участников процесса управления грузопотоком РС МКС.

Таблица 1.2 – Функции участников процесса управления грузопотоком РС МКС

| Участник | Выполняемые функции |
|-----------------|---|
| Проектант | Получает заявки от кураторов и формирует программу полета и поблочный грузопоток, проводит расчет ресурсов (топлива, воды, газа, продуктов питания, СОЖ и т.п.) и времени экипажа. Проверяет ограничения по объемам и времени и проводит анализ программы полета и поблочного грузопотока, при необходимости находит варианты перепланирования и обосновывает изменения в плане грузопотока. |
| Куратор | Получает текущую программу полета и грузопоток, а также данные о фактическом состоянии ресурсов и грузов, и использует их в качестве основы для формирования заявок для проектантов на доставку курируемых грузов. Отвечает за доставку курируемых им грузов на станцию, их размещение, возврат и утилизацию. |
| Специалист ЦУП | Является источником данных о фактическом исполнении плана грузопотока. Осуществляет передачу информации о фактическом расходе ресурсов и грузов (воды, топлива и сухих грузов), а также о фактических запасах на станции. |
| Баллистик | Сообщает данные о датах и времени возможных стартов, стыковок, отстыковок и спусках ТК. Готовит план коррекций орбит для поддержания рабочей орбиты МКС, что отражается на планировании доставки топлива. |

Для более детального описания процесса управления грузопотоком РС МКС далее рассмотрим и проведем анализ событий и сценариев их обработки, приводящих к изменению грузопотока РС МКС.

1.4 Анализ событий и сценариев изменения грузопотока РС МКС

Сложность планирования поблочного грузопотока вызвана следующими правилами и ограничениями:

- грузоподъемность ТГК «Прогресс» составляет 2500 кг;
- грузы делятся на четыре категории: сухой груз, вода, топливо, газ;
- каждая категория грузов имеет ограничивающий диапазон с минимальным и максимальным значениями возможной к доставке массы (табл. 1.3);
- определение даты возможной доставки грузов на станцию.

Таблица 1.3 – Характеристики разных категорий грузов

| Наименование категории груза | Минимальная масса доставляемого груза, кг | Максимальная допустимая масса доставляемого груза, кг |
|-------------------------------------|--|--|
| Сухой груз | 100 | 1600 |
| Вода | 100 | 420 |
| Топливо | 100 | 1100 |
| Газ | 20 | 50 |

Грузы, входящие в категорию «Сухой груз», имеют приоритет размещения, варьируемый от 1 (максимальный) до 8 (минимальный). При этом грузы с большим приоритетом могут вытеснять грузы с меньшим приоритетом.

В случае нехватки свободного места на ТК «Прогресс» грузы разных категорий могут вытеснять друг друга в следующей последовательности:

- если не хватает свободного места для сухих грузов, то последовательно вытесняются вода, топливо, газ до своего минимума, например, воды – до 100 кг;
- если масса всех сухих грузов превысила максимальный допустимый предел в 1600 кг, то сухие грузы вытесняют друг друга с учетом приоритета.

Был проведен анализ и классификация всех возможных типов событий (табл. 1.4), приводящих к перепланированию грузопотока [31].

Таблица 1.4 – События адаптивного планирования грузопотока РС МКС

| № | Тип события | Причины возникновения события |
|------|--|--|
| 1 | Добавление груза в поблочный грузопоток | Срочный заказ на доставку не предусмотренного ранее груза, например, в связи с поломкой оборудования |
| 2 | Удаление груза из грузопотока | Отмена заказа на доставку запланированного груза, например, если не успели вовремя подготовить груз |
| 3 | Изменение количества груза | |
| 3.1 | Увеличение количества сухого груза | Запрос на доставку дополнительного количества сухого груза |
| 3.2 | Уменьшение количества сухого груза | Запрос на уменьшение количества запланированного на доставку сухого груза |
| 3.3 | Увеличение количества жидкости | Запрос на доставку дополнительного количества жидкости |
| 3.4 | Уменьшение количества жидкости | Запрос на уменьшение количества запланированной на доставку жидкости |
| 4 | Изменение массы груза на полете ТК | Запрос на уменьшение массы груза, запланированного на доставку |
| 5 | Изменение приоритета груза на полете ТК | Срочная заявка на изменение приоритета груза, предназначенного для устранения нештатной ситуации |
| 6 | Изменение предпочитаемого типа ТК в онтологии | Изменение типа ТК для доставки груза |
| 7 | Изменение предпочитаемого диапазона для доставки груза | Изменение даты доставки груза, например, с ЗИП на более ранний срок при выходе из строя оборудования |
| 8 | Фиксирование груза на полете ТК | Заявка на фиксацию груза на конкретном ТК при необходимости доставить его в любом случае |
| 9 | Доукомплектация полета ТК сухими грузами | Необходимость доукомплектации ТК дополнительными сухими грузами |
| 10 | Разукомплектация полета ТК | Отмена полета ТК |
| 11 | Изменение программы полета | |
| 11.1 | Удаление полета ТК | Изменение программы полета при удалении полета ТК |
| 11.2 | Добавление полета ТК | Изменение программы полета при добавлении нового полета ТК |

Вышеперечисленные события приводят к адаптивному изменению программы полета и плана грузопотока РС МКС. Для примера приведем ниже сценарий перепланирования грузопотока РС МКС для одного типа события «Добавление груза в поблочный грузопоток». Сценарии перепланирования для остальных типов событий подробно рассмотрены в работе [31].

Добавление груза в поблочный грузопоток

Для описания сценария перепланирования в качестве исходных данных выступают сформированные программа полета и поблочный грузопоток РС МКС.

Предположим, что для поддержания жизнедеятельности станции необходимо срочно доставить некоторое оборудование в связи с его поломкой. Поскольку доставка этого груза имеет приоритетное значение, в результате планирования грузопотока грузы с меньшим приоритетом будут вытеснены с текущего полета на более позднее время.

Данный сценарий показывает пример добавления груза «Вентилятор» с большим приоритетом и вытеснение уже запланированных грузов, имеющих меньший приоритет.

Шаг 1. Создать копию поблочного грузопотока для дальнейшего формирования извещения.

Шаг 2. Добавить новый груз в поблочный грузопоток: выбрать наименование нужного груза, например, «Вентилятор» (децимальный номер 17КС.53Ю 5011-0, приоритет груза 2) и ввести требуемое количество на соответствующий полет, например, 7 ед. на ТГК «Прогресс 410».

Шаг 3. В поблочном грузопотоке должна появиться строка, соответствующая новому грузу. Строка с данным грузом должна быть подсвечена розовым цветом, это означает, что у массы данного груза значение «предложено» больше, чем «запланировано». Далее начинает работать подсистема автоматического планирования. После обновления сведений от планировщика строка, соответствующая грузу «Вентилятор», окрашивается в белый цвет, т.е. для массы данного груза значение «предложено» равно значению «запланировано».

Шаг 4. Поскольку добавленный груз имеет высокий приоритет 2 и общая загрузка ТГК «Прогресс» не увеличилась и составила 2500 кг, в результате перепланирования поблочного грузопотока часть менее приоритетного груза была вытеснена на другие полеты ТГК.

Шаг 5. Формируется извещение со списком вытесненных грузов (табл. 1.5).

Таблица 1.5 – Фрагмент извещения с перечнем перепланированных грузов после добавления

| № | Наименование груза | Децимальный номер и приоритет груза | Количество груза | | Причина перепланирования |
|---|--|-------------------------------------|---------------------|------------------------|---|
| | | | до перепланирования | после перепланирования | |
| 1 | Преобразователь тока аккумуляторной батареи ПТАБ-1М | ЕИГА.435241.001-03 приоритет 3 | 6 | 5 | При вытеснении груза учитывается его приоритет и масса. Вытеснение груза произошло, поскольку приоритет ПТАБ-1М ниже (3), чем у добавленного груза. Также у вытесненного груза высокая масса (14 кг). |
| 2 | Микроэлектронный интегратор разрядно-зарядных токов МИРТ-3 | СЛИЮ.411613.001 приоритет 3 | 0 | 1 | <p>Переброс на ранний полет произошел, т.к. в результате переброса груза «ПТАБ-1М» (см. № 1) освободилось 14 кг массы. Общая масса добавленного вентилятора составила 6,3 кг. Итого, осталось свободного места на $14 - 6,3 = 7,7$ кг.</p> <p>Чтобы заполнить данное свободное место, с более поздних полетов будут переброшены легкие грузы с учетом их приоритета.</p> |
| 3 | Регулятор тока РТ-50-1М | ЕИГА.435264.001-03 приоритет 3 | 1 | 2 | |
| 4 | Элемент питания, тип AA Alkaline | AA Alkaline приоритет 7 | 16 | 15 | |
| 5 | Жесткий диск HDD | SM-FOTO-HDD приоритет 7 | 0 | 1 | |
| | | | | | |

В результате перепланирования состав грузов может измениться и на других ТГК, запланированных в программе полета.

В итоге проведенного анализа основных событий, влияющих на изменение планов грузопотока РС МКС, разработана классификация событий по их типам и приведены сценарии перепланирования программы полета и грузопотока.

Таким образом, рассмотренные особенности в процессе группового построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС должны быть учтены при разработке моделей, методов и средств, направленных на получение согласованных решений при управлении грузопотоком РС МКС. Далее

представим формализованную постановку задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС для жизнеобеспечения работы станции.

1.5 Обобщенная постановка задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС

1.5.1 Формализация начальных данных задачи

Представим заданный набор начальных данных следующими объектами [29]:

1) интервал планирования $IP = [t_{min}; t_{max}]$, где t_{min} и t_{max} – заданные в днях границы интервала планирования;

2) множество моментов времени внутри интервала планирования с дискретностью один день $D = \{d_t, t = 1 \dots Nd\}$, где d_t – конкретный доступный на интервале планирования момент времени (день), t – идентификатор момента времени (дня), Nd – общее количество моментов времени (дней) на интервале планирования, причем $t_1 = t_{min}$, $t_{Nd} = t_{max}$;

3) множество полетов ТК $P = \{p_i, i=1 \dots Np\}$, где p_i – отдельный полет ТК, i – идентификатор полета ТК, Np – общее количество полетов ТК;

4) каждый полет ТК характеризуется набором критериев, представленных множеством $PP_i = \{pp_{ij}, j=1 \dots Npp\}$, где pp_{ij} – отдельный критерий полета ТК i , j – идентификатор отдельного критерия полета ТК i , Npp – общее количество отдельных критериев полета ТК i . В общем случае, критерии полетов ТК могут характеризовать доступный объем баков для топлива, воздуха, жидкостей, «сухих» грузов, даты старта, стыковки, отстыковки и т.п.;

5) длительности полетов ТК представим в виде множества $INT = \{int_i, i=1 \dots Np\}$, где int_i – длительность полета ТК i ;

6) множество портов (стыковочных узлов) на РС МКС $S = \{s_c, c=1 \dots Ns\}$, где s_c – отдельный порт РС МКС, c – идентификатор порта РС МКС, Ns – общее количество портов РС МКС;

7) множество космонавтов $KOS = \{kos_r, r = 1 \dots Nkos\}$, где kos_r – отдельный космонавт, r – идентификатор космонавта, $Nkos$ – общее количество космонавтов;

8) множество доставляемых грузов $G = \{g_k, k=1 \dots Ng\}$, где g_k – отдельный груз, k – идентификатор груза, Ng – общее количество грузов;

9) каждый груз характеризуется набором критериев, представленных множеством $PG_k = \{pg_{km}, m=1 \dots Npg\}$, где pg_{km} – отдельный критерий груза k , m – идентификатор отдельного критерия груза k , Npg – общее количество отдельных критериев груза k . Критерии грузов могут характеризовать тип, массу, объем, габариты, требуемое время доставки, срок годности, время эксплуатации и т.п.;

10) множество зон хранения грузов на РС МКС $Z = \{z_e, e=1 \dots Nz\}$, где z_e – отдельная зона хранения грузов на РС МКС, e – идентификатор зоны хранения грузов, Nz – общее количество зон хранения грузов.

Также для решения задачи, кроме выше перечисленных исходных данных, используется следующая информация: модель грузопотока (определяет годовые потребности в грузах на планируемый период и предоставляет количество ТК), программа полета предыдущего периода, баллистические данные, данные о имеющихся на борту РС МКС грузах и ряд других.

1.5.2 Формализация результата решения задачи

В результате решения поставленной задачи на основе приведенных первоначальных данных необходимо сформировать программу полета и грузопоток РС МКС с планами размещения, утилизации и возврата грузов.

1. При построении программы полета на основе выше перечисленных исходных данных полеты ТК планируются с приблизительной равномерностью по времени и распределяются по портам.

Программу полета можно представить в виде множества

$$PT = \{p_i, PP_i, ds_i, dd_i, do_i, int_i, s_c, \{kos_r\}\}_{i=1}^{Np}, \quad (1.1)$$

где i – идентификатор полета ТК; Np – общее число полетов ТК; p_i – отдельный полет ТК; PP_i – множество критериев полета ТК p_i ; $ds \in [t_{min}, \dots, t_{max}]$ – день старта полета ТК i ; $dd \in [t_{min}, \dots, t_{max}]$ – день стыковки полета ТК i ; $do \in [t_{min}, \dots, t_{max}]$ – день отстыковки полета ТК i ; int_i – длительность полета ТК i ; s_c – отдельный порт РС МКС; $\{kos_r\}$ – множество космонавтов доставляемых на МКС.

2. При планировании грузопотока на основе вышеперечисленных исходных данных формируется распределение доставляемых грузов по полетам ТК.

План грузопотока можно представить в виде множества

$$PG = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}\}_{i=1}^{Np}, \quad (1.2)$$

где i – идентификатор полета ТК, Np – общее число полетов ТК, p_i – отдельный полет ТК, PP_i – множество критериев полета ТК, $\{g_k\}$ – множество доставляемых грузов, $\{PG_k\}$ – множество критериев доставляемых грузов $\{g_k\}$.

3. При планировании размещения грузов на борту РС МКС на основе вышеперечисленных исходных данных доставляемые грузы распределяются по зонам хранения РС МКС.

План размещения грузов можно представить в виде множества

$$PR = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}, \{z_e\}\}_{i=1}^{Np}, \quad (1.3)$$

где i – идентификатор полета ТК, Np – общее число полетов ТК, p_i – отдельный полет ТК, PP_i – множество критериев полета ТК, $\{g_k\}$ – множество доставляемых грузов, $\{PG_k\}$ – множество критериев доставляемых грузов $\{g_k\}$, $\{z_e\}$ – множество зон хранения грузов на РС МКС.

4. При планировании утилизации грузов с борта РС МКС на ТГК «Прогресс» на основе вышеперечисленных исходных данных размещенные на борту РС МКС грузы распределяются по ТГК «Прогресс» для затопления.

План утилизации грузов можно представить в виде множества

$$PU = \{p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}\}_{i=1}^{Np}, \quad (1.4)$$

где i – идентификатор полета ТГК, Np – общее число полетов ТГК, p_i – отдельный полет ТГК, PP_i – множество критериев полета ТГК, $\{g_k\}$ – множество утилизируемых грузов, $\{PG_k\}$ – множество критериев утилизируемых грузов $\{g_k\}$.

5. При планировании возврата грузов с борта РС МКС на ТПК «Союз» на основе вышеперечисленных исходных данных размещенные на борту РС МКС грузы распределяются по ТК «Союз» для доставки на Землю.

План возврата грузов можно представить в виде множества

$$PV = \left\{ p_i, PP_i, \{g_k\}, \{PG_k\}, \{kos_r\} \right\}_{i=1}^{Np}, \quad (1.5)$$

где i – идентификатор полета ТПК, Np – общее число полетов ТПК, p_i – отдельный полет ТПК, PP_i – множество критериев полета ТПК, $\{g_k\}$ – множество возвращаемых грузов, $\{PG_k\}$ – множество критериев возвращаемых грузов $\{g_k\}$, $\{kos_r\}$ – множество космонавтов, возвращаемых на Землю на ТПК «Союз».

Для обеспечения возможности согласованного формирования программы полета PT , планов грузопотока PG , размещения PR , утилизации PU и возврата PV следует определить частные критерии оценки решения и комплексный критерий оценки результата для поиска согласованного баланса интересов между основными участниками процесса построения плана полета и грузопотока РС МКС.

При разработке формализованной модели построения программы полета и грузопотока необходимо учитывать ряд критериев принятия решений и ограничений планирования, формализация которых будет рассмотрена в разделе 2.

Для решения поставленной задачи далее приведен обзор классических и современных подходов, методов и средств планирования и распределения ресурсов, применимых для решения задачи управления грузопотоком.

1.6 Обзор существующих методов и средств управления ресурсами

В современной научной литературе достаточно хорошо представлены подходы и методы планирования и распределения ресурсов [32-34], разработанные для решения задач массового обслуживания и исследования операций. Систематические исследования по анализу и разработке математических моделей и методов принятия решений с помощью предложенных подходов начались в начале второй половины XX века [35-39]. Эти методы можно классифицировать по способу достоверности решения на точные и приближенные [40, 41]. Рассмотрим подробнее их преимущества и недостатки для решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС.

К числу точных методов относятся переборные методы, метод ветвей и границ [42], методы последовательного анализа вариантов и построения последовательности планов [43], методы предварительного расширения и

последовательного сужения, а также методы линейного (графический и симплексный методы) [44] и динамического программирования [45, 46], метод дихотомического программирования [47], метод сетевого программирования [48, 49] и ряд других. Некоторые из них нельзя использовать для решения поставленной задачи, потому что они требуют заранее определение количества и значений параметров, которые получить иногда невозможно. Рассмотрим более подробно некоторые методы, отобранные в качестве возможных претендентов на решение поставленной задачи, хотя в общем случае поставленная задача управления грузопотоком РС МКС не имеет эффективных точных методов решения [50].

Переборные методы [51]. Если допустимое множество решений является конечным, то с помощью метода полного перебора можно найти оптимальное решение. Преимуществом метода полного перебора является его простота и возможность найти наилучшее оптимальное решение из всего множество возможных решений задачи. Недостатком метод полного перебора является необходимость рассмотрения огромного числа всех возможных вариантов. Метод эффективен для задач с малым числом входных данных или, когда имеется возможность свести множество учитываемых критериев к одному, при большом же количестве входных данных и параметров задачи увеличивается число допустимых решений и время поиска оптимального решения, в данном случае метод полного перебора становится не эффективным и найти точное решение за ограниченное время представляется невозможным.

Метод ветвей и границ [52]. Метод ветвей и границ был предложен впервые в 1960 году Лендом и Дойгом [53] для решения общей задачи целочисленного линейного программирования. Работа Литтла, Мурти, Суини и Кэрела [54], посвященная задаче коммивояжера, вызвала интерес к этому методу и его фактическое второе рождение.

Метод ветвей и границ является конечным методом, результат будет получен обязательно, и является разновидностью метода полного перебора, в связи с чем ему присущи все его недостатки, однако позволяет ускорить процесс поиска за счет

отбрасывания подмножества заведомо неоптимальных решений в связи с чем сокращается время работы метода.

Для метода необходимы две процедуры: ветвление и нахождение оценок. Как отмечается в [55] в основу метода ветвей и границ легла идея последовательного разбиения множества допустимых решений на подобласти (подмножества) меньших размеров. Процедура ветвления рекурсивно применяется к различным подобластям. Элементы подмножества на каждом шаге подвергаются проверке на оптимальность решения. Процедура нахождения оценок осуществляется посредством вычисления оценки снизу для целевой функции на данном подмножестве. Если оценка снизу не меньше наилучшего на данный момент из найденных решений, то это подмножество отбрасывается. Если в проверяемом подмножестве удастся найти наилучшее решение, то оно также может быть отброшено. Если значение целевой функции в найденном решении меньше наилучшего на данный момент из найденных решений, то происходит смена наилучшего найденного решения. По окончании работы алгоритма наилучшее на данный момент из найденных решений является результатом его работы.

Если удастся отбросить все элементы разбиения, то наилучшее найденное решение является оптимальным решением задачи. В противном случае, неотброшенные подмножества оцениваются и из них выбирается наиболее перспективное, которое подвергается дальнейшему разбиению на подмножества, которые вновь подвергаются проверке и т.д. Трудоемкость работы алгоритма можно уменьшить различными методами, один из которых состоит в искусственном завышении нижней оценки, например, если нас интересуют помимо оптимального решения также и приближенные с погрешностью не более ϵ , то завышение нижней оценки в $(1+\epsilon)$ раз приводит к желаемому результату.

Анализ данного метода приводит к выводу, что высокая вычислительная сложность метода ветвей и границ не позволяет решать задачи большой размерности и накладывает серьезные требования к вычислительным ресурсам и большому времени моделирования, поэтому для решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС его будет применить нецелесообразно.

Метод наименьших квадратов [56]. Метод наименьших квадратов применяется для решения задач, которые основаны на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных. Метод наименьших квадратов может использоваться для решения системы линейных уравнений. Критерием качества решения метода является минимизация суммы квадратов разностей левой и правой частей уравнений системы. Из-за громоздкости формализации требований и решения оптимизационных уравнений возможность применения данного метода для решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС существенно ограничена.

Линейное программирование [57]. Линейное программирование включается в себя ряд методов, которые ориентируются на решение задач нахождения экстремума линейной функции на множествах n -мерного векторного пространства, которое задается системами линейных уравнений и неравенств. Линейная функция является целевой, а математические уравнения и неравенства образуют систему ограничений.

Основу линейного программирования заложил в 1939 году Л. В. Канторович опубликовав работу [58], в которой сформулировал новый класс экстремальных задач с ограничениями и разработал эффективный метод их решения.

При рассмотрении определенного класса задач распределения поступивших заказов на ограниченное количество ресурсов должно быть наложено обязательное ограничение, что решение должно быть целочисленным. При этом у каждого выбранного ресурса имеется только два решения – ресурс свободен (0) или занят (1). Такой класс задач, в которых допустимы только два значения 0 или 1, называются задачами целочисленного программирования с булевыми переменными. Одним из наиболее эффективных методов для решения такого класса задач является алгоритм на основе рангового подхода [59]. При этом n -мерный единичный куб разбивается на n рангов, где каждый вектор имеет одинаковое число единиц и нулей.

К достоинствам методов линейного программирования можно отнести простоту и наглядность представления решения задачи, и возможность реализации

на параллельных вычислительных структурах. Недостатком является сложность формализации постановки задачи, описания целевой функции и системы ограничений, экспоненциальная сложность.

Симплекс-метод [60]. Симплекс-метод был разработан в 1949 году американским математиком Джорджем Бернардом Данцигом как один из универсальных и эффективных инструментов для решения задачи линейного программирования.

Сущность симплекс-метода состоит в построении базисных решений, на которых монотонно убывают линейные функции до выполнения необходимых условий локальной оптимальности. Симплекс-метод представляет собой итеративный процесс направленного решения заданной системы уравнений по шагам, с начала находится опорное решение и далее в поисках лучшего варианта идет движение по угловым точкам области допустимого решения, улучшающих значение целевой функции пока целевая функция не достигнет оптимального значения.

В целом алгоритм симплекс-метода состоит из следующих этапов [61]:

– составление первого опорного плана. Переход к канонической форме задачи линейного программирования путем введения неотрицательных дополнительных балансовых переменных;

– проверка плана на оптимальность. Если найдется хотя бы один коэффициент индексной строки меньше нуля, то план не оптимальный, и его необходимо улучшить;

– определение ведущих столбца и строки. Из отрицательных коэффициентов индексной строки выбирается наибольший по абсолютной величине. Затем элементы столбца свободных членов симплексной таблицы делит на элементы того же знака ведущего столбца;

– построение нового опорного плана. Переход к новому плану осуществляется в результате пересчета симплексной таблицы.

Симплекс-метод позволяет за конечное число итераций найти оптимальное решение, однако основным недостатком этого метода является его экспоненциальная сложность.

Динамическое программирование [62]. Динамическое программирование состоит из ряда методов, в основе которых лежит идея разбиения сложной задачи на более простые сходных с ней задач, при этом процесс принятия решения связан с многошаговым процессом.

Понятие динамическое программирование впервые ввел в конце первой половины двадцатого столетия Р. Беллман [63] для описания процесса нахождения решения задачи, когда решение одной задачи может быть получено только после решения предшествующей ей задачи.

Динамическое программирование представляет собой пошаговый процесс решения задачи, когда на каждом шаге из множества допустимых решений выбирается оптимизирующее целевую функцию решение. Данный метод рационально использовать в случае возможности разбиения задачи на одинаковые подзадачи. При этом каждая подзадача решается только один раз и ее решение запоминается в таблице, что оптимизирует количество вычислений и время на расчеты, это позволяет исключить решение одних и тех же задач многократно. После решения отдельных задач (подзадач) решение объединяется в одно общее решение, при этом рекуррентные соотношения связывают между собой оптимальные значения целевых функций подзадач.

Основным преимуществом динамического программирования является то, что он позволяет найти глобальное оптимальное решение, а уравнение Беллмана удобно для программирования, а также метод существенно сокращает перебор. Ограничением данного метода является размерность задачи, потому что приходится хранить результаты оптимизации всех этапов, и при увеличении числа ограничений задачи экспоненциально увеличивается объем необходимой памяти. При этом метод динамического программирования применим к ограниченному классу задач.

Метод сетевого программирования [48]. Метод сетевого программирования, как доказывает в своей работе В. Н. Бурков [49], является обобщением метода динамического программирования, при этом метод дает для общего случая достаточно универсальный алгоритм получения нижних (верхних) оценок, что позволяет эффективно применять метод ветвей и границ. В работе также доказывается, что преимущества и результаты решения оптимизационных задач с помощью методов динамического и сетевого программирования являются аналогичными.

Преимуществом метода сетевого программирования является возможность получения точных решений или нижних (верхних) оценок задач дискретной оптимизации, а также нахождение решений для более простых функций в составе сложной. Недостатком метода сетевого программирования является его неэффективность для нелинейных функций, трудность описания целевой функции и системы ограничений задачи в виде суперпозиции более простых функций, а также необходимость использования заранее заданных всех возможных значений переменных. Аналогичные недостатки имеет метод динамического программирования.

Методы планирования производственных ресурсов (MRP II). Методы MRP II реализуют различные стратегии производственного планирования, которые обеспечивают операционное и финансовое планирование производства с широким охватом ресурсов предприятия. Методы MRP II в отличие от MRP производят планирование не только в материальном, но и в денежном выражении. MRP II объединяет проверенные на практике разумные принципы, модели и процедуры управления и контроля, предназначенные для повышения основных показателей экономической деятельности предприятия.

Стандарт MRP II содержит описание 16 групп функций системы и реализует детальное планирование производства предприятия, включая учёт заказов, планирование загрузки производственных мощностей, планирование потребности во всех ресурсах производства (материалы, сырьё, комплектующие, оборудование, персонал), планирование производственных затрат, моделирование хода

производства, его учёт, планирование выпуска готовых изделий, оперативное корректирование плана и производственных заданий.

В основу MRP II положена иерархия планов. При этом планы нижних уровней зависят от планов более высоких уровней, т.е. план высшего уровня должен предоставлять входные данные, намечаемые показатели и/или какие-то ограничительные рамки для планов низшего уровня. Кроме того, эти планы должны быть связаны между собой таким образом, чтобы результаты планов нижнего уровня оказывали обратное воздействие на планы высшего уровня.

Основными недостатками MRP II систем являются: ориентация только на заказ; предоставляют информацию, необходимую для осуществления финансового планирования, однако собственно функции финансового анализа и планирования в MRP II не включены; являются применимыми преимущественно для производственных предприятий со сложным производством, весьма требовательны к уровню организации процесса внедрения и качеству исходных данных; модули позволяют прогнозировать возможные проблемы, но не пытаются вовремя решить выявленные проблемы, оставляя их на усмотрение персонала; не позволяют планировать такие ресурсы предприятия, как человеческие.

При этом выделяют следующие основные факторы неудач при внедрении систем класса MRP II: неформализованность бизнес-процессов на предприятии; недостаточное участие в проекте высшего руководства; несоответствующий уровень знаний и опыта в области MRP сотрудников предприятия; нереалистичные стратегические календарные планы производства; неточные и неполные данные.

В дальнейшем методы MRP II были развиты в стратегии ERP, обзор наиболее известных программных пакетов приведен ниже в данном разделе.

Основной отличительной чертой точных методов является необходимость высокой степени формализации как постановки задачи распределения ресурсов, так и алгоритмов ее решения. Применение выше перечисленных методов для построения программы полета и грузопотока РС МКС оказывается неэффективным по ряду причин [64-67]:

- с ростом размерности решаемой задачи экспоненциально увеличиваются временные затраты и вычислительная мощность на поиск лучшего решения;
- отсутствует гарантия получения допустимого решения задачи;
- в силу большой размерности, многокритериальности, сложности математической модели задачи становится невозможным оценить влияние на решение задачи множества существующих факторов и критичности полученного решения к данным факторам.

Общим недостатком всех классических методов является то, что они в своей основе используют итерационную процедуру улучшения некоторого начального приближения и поиска результата в окрестностях приближения. Возникает проблема выбора значения начального приближения, что ставит полученный результат в прямую зависимость от некоторого начального приближения.

Трудоемкость задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС на реальных объемах данных не позволяет найти решение с помощью точных методов которые позволяют находить оптимальное решение лишь в задачах крайне малой размерности, при небольшом количестве входных данных или без учета многих необходимых требований, и, как правило, при однокритериальной постановке задачи. При этом, с ростом сложности и размерности решаемых задач, классические методы и средства, имеющие комбинаторную природу (варианты полного перебора), приводящую к непропорциональному росту времени вычислений (NP-Hard), не позволяют решать практические задачи.

В силу этого в последнее время все большее развитие получают приближенные эвристические и метаэвристические методы [68], применяемые для автоматизированного распределения ресурсов [69], существенно сокращающие перебор и уменьшающие сложность поиска решения. Эти методы при некоторых условиях позволяют получать приемлемые решения за разумное время за счет сокращения вариантов комбинаторного поиска. К группе этих методов относятся: жадные алгоритмы [62], эволюционные алгоритмы [70-72], генетические алгоритмы [73, 74], метод моделирования отжига [75, 76], нейронные сети [77, 78],

алгоритм колонии муравьев [79- 81], случайный поиск, алгоритм среднего значения и ряд других. Рассмотрим более подробно некоторые из этих методов.

«Жадные» методы [62]. Жадный алгоритм является простым и быстрым, при этом решение принимается последовательно путем выбора на каждом шаге лучшей из альтернатив, при этом однажды принятое решение никогда не пересматривается и не отменяется.

Глобальная оптимальность алгоритма имеет место, если структура задачи задается матроидом, в этом случае его обычно предпочитают другим методам оптимизации, таким как динамическое программирование. Жадный метод обычно используют на начальном этапе, когда необходимо быстро сформировать первичный план, для дальнейшей его оптимизации. Этот метод подходит для решения широкого класса задач, когда необходимо получить быстро решение. Одним из недостатков жадных алгоритмов является, что сложно или не всегда возможно оценить близость полученных решений к оптимальному.

Применительно к задаче построения программы полета и грузопотока РС МКС можно рассмотреть целесообразность применения жадных алгоритмов для построения быстро первоначального плана, который необходимо будет в дальнейшем оптимизировать в поисках баланса интересов другими методами.

Эволюционные алгоритмы [70-72]. Эволюционные алгоритмы являются эвристическими алгоритмами поиска, где моделируются процессы биологической эволюции (процессы естественного отбора, мутации и воспроизводства), при этом решение задачи оптимизации происходит путем последовательного варьирования искомым параметров. В основу эволюционных алгоритмов заложены принципы естественного отбора, где поведение популяции определяется естественной средой, которая эволюционирует в соответствии с правилами отбора и целевой функцией, задаваемой окружающей средой. При этом задается каждому индивидууму популяции значение его пригодности к окружающей среде, и возможность к размножению получают только наиболее пригодные виды. Рекомбинация и мутация позволяют индивидуумам популяции изменяться и приспособливаться к внешней среде.

В настоящее время существует несколько типов эволюционных алгоритмов: генетические алгоритмы, алгоритмы генетического программирования, алгоритмы эволюционных стратегий, алгоритмы эволюционного программирования и другие.

Эволюционные алгоритмы можно использовать для решения классических NP-полных задач, таких как задача о ранце, задача о коммивояжере и другие.

Преимуществом эволюционных алгоритмов является простота реализации, а также способность решать широкий круг задач, т.к. используется аналогия с развитием живых организмов (от простых форм к более сложным).

С помощью данного класса алгоритмов не всегда можно найти оптимальное решение, только с некоторой вероятностью можно предположить, что найденное решение является достаточно хорошим. Использование эволюционных алгоритмов целесообразно в случае отсутствия способа точного решения задачи, или, когда способ решения существует, но очень сложен в реализации, а также требует больших затрат временных, финансовых и вычислительных ресурсов.

Генетические алгоритмы [73, 74]. Генетические алгоритмы являются разновидностью эволюционных алгоритмов и представляет собой гибкий и эффективный инструмент приближенного решения задачи. Генетические алгоритмы позволяют быстро строить и далее улучшать варианты планов путем сопряжения их отдельных хороших частей (через операции мутации вариантов, наследования, отбора и кроссинговера). Для решения задачи оптимизации используется случайный подбор, комбинирование и вариация искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе, при этом делается акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинацию решений-кандидатов как в живой природе.

В настоящее время применяются попытки использования генетических алгоритмов при решении самых различных задач в различных сферах [82]: задача ситуационного управления группировкой автономных подводных роботов [83], задача оптимизации портфеля акций, задача планирования полетных операций [84], задачи раскроя-упаковки и т.п.

В генетических алгоритмах, как и в других эвристических методах, точность решения зависит от качества структурирования данных, что приводит к получению неоптимального решения, при этом генетические алгоритмы могут не привести к получению допустимого решения на заданном временном интервале. Отметим другие недостатки генетических алгоритмов: плохо масштабируются под сложность решаемой задачи, решение является пригодным лишь по сравнению с другими методами, во многих задачах решение сходится к локальному оптимуму, который не всегда является приемлемым.

Метод моделирования отжига [75, 76]. Метод моделирования отжига, расширяющий методы локальной оптимизации, формирует зависимые решения, причем на каждом шаге решения могут не только улучшаться, но и ухудшаться с вероятностью, вычисляемой как функция от некоторого управляющего параметра, аналога температуры. В 1953 году Н. Метрополис разработал алгоритм симуляции установления равновесия в системе с множеством степеней свободы при заданной температуре [75], а в начале 80-х прошлого столетия С. Киркпатрик [76] предложил использовать этот алгоритм не только для моделирования, но и для оптимизации.

Метод отжига основывается на имитации физического процесса, при этом используется упорядоченный случайный поиск на основе аналогии с процессом образования в веществе кристаллической структуры с минимальной энергией при охлаждении, в том числе при отжиге металлов. Предполагается, что процесс протекает при постепенно понижающейся температуре, при этом встроившиеся в кристаллическую решетку атомы допускают переход из одной ячейки в другую, который происходит с некоторой вероятностью, уменьшающейся с понижением температуры. Кристаллическая решетка устойчива, если энергия атомов минимальна, поэтому атомы переходят в состоянии с меньшим уровнем энергии.

Метод отжига в настоящее время применяется для решения различных оптимизационных задач: финансовых [85], в телекоммуникационных сетях [86], компьютерной графики [87] и многих других. Также метод отжига используют для обучения нейронных сетей.

Алгоритм имитации отжига напоминает градиентный спуск, но попадает в локальные минимумы реже за счёт случайности выбора промежуточной точки, что позволяет продолжить поиск глобального минимума, это является основным преимуществом метода. Также при нехватки вычислительных ресурсов метод отжига выдает неплохое решение и быстро находит один из локальных минимумов.

Недостатком метода является не достаточная изученность скорости сходимости метода, а также он не гарантирует нахождения минимума функции.

Нейронные сети [77, 78]. Нейронные сети позволяют обучать сеть тому, как выглядит хорошее решение задачи, и дальше строить новые решения по аналогии. Они позволяют воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости и используются для решения задач управления и классификации. Так как нейронные сети нелинейны, они используются для решения задач, где линейные модели работают неудовлетворительно. Нейронные сети позволяют моделировать линейные зависимости с большим числом переменных, при этом нейронные сети являются обучаемыми. При обучении пользователь помогает нейронной сети подобрать данные и запустить алгоритм обучения на основе накапливаемых статистических данных. При этом при получении задания не надо осуществлять заново процесс прогнозирования, надо просто взять имеющиеся промежуточные данные. После обучения нейронной сети, которое заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами, она способна предсказать будущее значение некой последовательности на основе нескольких предыдущих значений.

Нейронные сети в настоящее время получили широкое применение в самых различных областях: медицине, бизнесе, физике и т.д.

Достоинством использования нейронных сетей является высокая скорость и точность получения результата, а недостатком – сложность анализа и обучение, которое не всегда бывает адекватным, а также программная реализация.

Алгоритм колонии муравьев [79-81]. Алгоритм колонии муравьев представляет собой метаэвристическую оптимизацию и основан на моделировании поведения муравьев, добывающих пищу. Некоторое удачное решение уподобляется помечаемому феромоном направлению перемещения муравьев к

корму, интенсивность «запаха» которого уменьшается со временем, если это решение никак не улучшается.

Данный алгоритм представляют собой вероятностную жадную эвристику, когда вероятность качества найденного решения устанавливается исходя из информации, полученной из предыдущих решений.

Преимуществом метода является заложенная идея моделирования поведения муравьев и их способности быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи, при этом существует возможность адаптироваться к изменяющимся условиям и находить новый путь. Основным недостатком метода является не точность найденного решения, при этом найденное решение может быть одним из худших.

Перечислим некоторые другие существующие эвристические методы, которые в последнее время получают все большую популярность:

- мета-эвристики локальной оптимизации со случайным выбором (Simple Local Search Based Meta-heuristics) кандидата из списка лучших, с прогнозированием, со случайным выбором критериев и т.д.;

- метод, использующий историю локальной оптимизации (Tabu Search), когда некоторые уже исследованные плохие варианты запрещается использовать на следующих шагах (табу);

- использование общей памяти решений (Adaptive Memory Programming);

- смешанные мета-эвристики – использование нескольких параллельных конкурирующих алгоритмов, каждый из которых формирует свое решение.

Вышеуказанные методы в основном также используют пакетную обработку и с трудом расширяются дополнительными целевыми критериями, не позволяя учитывать множественные факторы, которые часто используются в реальной жизни, которые могут задаваться не только формулами и неравенствами, но также таблицами, графиками и алгоритмами.

В целом основным преимуществом приближенных эвристических методов является возможность получить неплохие решения задачи при сравнительно небольшом объеме необходимых вычислений, а основным недостатком является

зачастую невозможность оценить близость полученного решения к оптимальному, а также существуют задачи, для которых применений данных методов приводит к получению плохих результатов. Кроме того, поиск решения на реальных данных, как правило, занимает слишком много времени, и при этом результаты обычно получаются весьма неправдоподобными, мало сравнимыми с решениями, принимаемыми людьми на практике, и не пригодными для принятия решений.

Проведенное исследование и анализ рассмотренных выше методов позволяет сделать заключение, что для решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС, являющейся NP-трудной, классические методы оптимизации не применимы, а современные приближенные методы оптимизации не могут дать адекватный результат, где должна быть учтена специфика прикладной области, заключающаяся в выработке согласованных решений многими разнородными участниками процесса и поддержке принятия решений в реальном времени.

На сегодняшний день на рынке присутствует ряд известных зарубежных и российских компаний SAP, 1C, Oracle, Microsoft, Галактика, BAAN, Siemens, INFOR, Manugistics, и другие, выпускающие программные системы управления производственными процессами предприятия, которые можно разделить условно на две группы: ERP- и MES-системы [88]. В составе традиционных ERP систем (систем управления предприятием) в последнее время все больше предлагается планировщиков ресурсов (часто называемых ASP средствами - Advanced Scheduling and Planning), однако эти системы, как правило, реализуют пакетные версии линейного или динамического программирования, программирования с учетом ограничений и других классических методов, основанных на комбинаторном поиске вариантов, которые на практике оказываются малоприспособленными. Рассмотрим некоторые из известных систем.

Система SAP ERP [89]. Компания SAP является ведущим поставщиком бизнес-приложений в мире. Система содержит встроенные модули управления производственными потоками, планирования и исполнения производства, логистики, продажи и дистрибуции, управления жизненным циклом продукта, финансового учета, контроллинга и др. Однако детальная проработка модуля

планирования производства оставляет желать лучшего, отсутствует возможность гибкой настройки под тонкие технологические особенности процесса работ и существует недостаточный уровень поддержки концепции логистических цепочек.

Системы 1С [90]. 1С является самой распространённой ERP-системой в России. Решение «1С: Управление производственным предприятием» является универсальной системой, обеспечивающей управление основными функциями производственного предприятия: учет товарных запасов, управление расчетами с контрагентами, учет основных средств и товарно-материальных ценностей и так далее. Недостатком решений 1С является ограниченный набор функциональных модулей по сравнению с SAP и Oracle, реализация преимущественно учетного контура и отсутствие специализированных модулей поддержки автоматизированного планирования и распределения ресурсов.

Система Oracle E-Business Suite [91]. Пакет Oracle E-Business Suite ERP-решение компании Oracle, ориентированное на крупные компании. В состав пакета входят основные модули для управления предприятием: управление производством, управление сервисом, управление финансами, управление сотрудниками, управление портфелем проектов, управление жизненным циклом изделий, управление взаимоотношениями с заказчиками, планирование ресурсов предприятия, управление закупками, управление жизненным циклом продукта, управление цепочкой поставок и другие. Несмотря на то, что приложения Oracle, характеризуется мощной функциональностью, очень тяжело поддерживать, внедрять и настраивать продукт под бизнес-процессы конкретного предприятия.

Система BAAN [92]. BAAN является ERP-системой для управления крупными предприятиями с высокотехнологичным производством и корпоративной логистикой, разработанная транснациональной корпорацией «BAAN Company». BAAN используется как единый интегрирующий комплекс для автоматизации средних и крупных предприятий, при этом поддерживаются все направления деятельности: моделирование предприятия, поддержка производственных процессов, управление финансами, сбытом, снабжением, складом, проектами и др. Предоставляет возможность интеграции с ERP-

продуктами третьих поставщиков и автоматизированными рабочими местами заказчика, обеспечивает открытость для основных операционных систем. Недостатком является отсутствие хорошей поддержки автоматизированного составления расписаний и распределения ресурсов.

Система AnyLogic [93]. Система AnyLogic является разработкой российской компании The AnyLogic Company, являющейся одной из ведущих компаний в области инструментов и бизнес-приложений имитационного моделирования. AnyLogic является инструментом, объединившим подходы системной динамики, "процессного" дискретно-событийного и агентного моделирования. AnyLogic основан на объектно-ориентированной концепции и концепции представления модели как набора взаимодействующих параллельно функционирующих активных объектов. Активный объект в AnyLogic имеет собственный функционал, взаимодействует с окружающей средой и другими агентами. Недостатком продукта является отсутствие механизмов построения планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени, необходимость описания специфики агентов в коде, что является трудоемким процессом и требует привлечения специалистов, отсутствием языка обмена сообщениями между агентами.

Система Simplex3 [94]. Simplex3 является универсальной имитационной системой, разработанной в университетах Нюрнберг-Эрланген и Пассау (Германия). Система включает в себя полную среду экспериментирования и моделирования, собственный объектно-ориентированный язык Model Deskription Language (MDL) для описания системно-динамических и дискретно-событийных моделей в виде базовых компонент, их взаимосвязей и динамики поведения, временных и условных событий, приоритетов и процедур. Недостатком является отсутствие встроенных протоколов взаимодействия агентов и отсутствие встроенных механизмов составления планов.

Consolidated Planning System (CPS) [95, 96]. CPS является системой планирования полетов американского сегмента МКС, обеспечивающая следующие основные возможности планирования полетов: построение предварительных недельных и краткосрочных (дневных) планов полета, а также генерацию на их

основе бортовых краткосрочных планов для экипажа, которые передаются на борт МКС для их последующего выполнения экипажем.

В основе формирования планов CPS лежат ограниченные ресурсы (расходные материалы, НА, служебное оборудование, приборы, исполнители, источники их доставки), которые необходимо задействовать для выполнения полетных операций экипажем на борту станции. Ресурсы бывают индивидуальными и разделяемыми, потребляемыми и возобновляемыми. Индивидуальные ресурсы могут использоваться только для выполнения какой-либо одной полетной операции. Разделяемые ресурсы могут быть задействованы одновременно для выполнения нескольких полетных операций.

CPS определяет различные форматы, составленные из набора разделов, которые могут включать области для отображения шкалы времени, работ, условий, текстовых пометок и т.п. При отображении разных форматов эти наборы могут повторяться несколько раз, при этом их расположение может быть произвольным, например, находиться один под другим, а время начала каждого следующего фрагмента должно соответствовать времени окончания предыдущего.

Для CPS разработаны специальные методы и алгоритмы, предназначенные для автоматизации процесса планирования. Процесс автоматизированного размещения полетных операций в расписании основан на использовании некоторых эвристических функций. При автоматизированном формировании расписания полетных операций применяется основной принцип, который при выборе времени начала полетной операции максимизирует ее длительность, для этого при описании полетной операции определяется ее возможная минимальная и максимальные длительности. После этого для размещения полетной операции в расписании задается метод поиска ее места в плане. При этом поиск наиболее подходящего времени начала полетной операции внутри заданного интервала осуществляется с помощью одного из четырех возможных методов: прямой поиск; обратный поиск; поиск по среднему; комбинированный метод.

Также в CPS применяются правила выбора очередности размещения полетных операций из существующего исходного набора. Пользователь для

определения очередности размещения нескольких полетных операций может выбрать одно из возможных правил: по возрастанию или убыванию желательной длительности; по возрастанию или убыванию приоритетности; в порядке следования временных отношений между полетными операциями; по возрастанию или убыванию начала окна интервала размещения; по возрастанию или убыванию окончания окна интервала размещения. Если не удастся автоматически разместить полетные операции в нужной последовательности, пользователь может в ручном режиме самостоятельно разместить в необходимой последовательности.

Вместе с тем, все рассмотренные выше подходы и методы планирования и оптимизации ресурсов, а также программные средства управления производственными процессами предприятия обладают рядом общих недостатков:

- не позволяют учитывать высокую размерность задачи (десятки стартов, сотни наименований грузов, тысячи различных единиц грузов, сотни ресурсов, тысячи заказов, десятки тысяч различных событий, различный горизонт времени), которая по-прежнему остается критическим фактором в достижении оперативности формирования решений;

- не учитываются у каждого участника процесса формирования решения множество индивидуальных критериев, которые при этом могут задаваться дискретно и даже процедурно (алгоритмически) и могут меняться в зависимости от ситуации или момента времени;

- планирование на практике ведется не пакетами, а по событиям, в «скользящем режиме», и должно сочетаться с одновременным распределением и оптимизацией ресурсов, мониторингом и контролем исполнения планов;

- часто случаются непредвиденные события (задержки старта ТК, нештатные и аварийные ситуации, приход новых заявок на доставку, отзыв уже запланированных грузов, поломка бортовых систем и оборудования, отклонение от космического мусора и т.д.), на которые требуется гибкая (адаптивная) реакция с учетом особенностей ситуации, без полного останова и перезапуска системы;

– качество принимаемых решений часто зависит от самого момента времени, иначе ситуация изменится, и сформированное с большой задержкой решение становится не актуальными;

– характеристики заявок, грузов и ресурсов могут меняться во времени, даже когда они уже запланированы, равно как и важность критериев, которые влияют напрямую на результат;

– требуется индивидуальный подход к каждой заявке, грузу и ресурсу;

– трудно объяснять и обосновывать формируемые решения пользователю.

Как следствие, применение этих подходов, методов и средств, даже в предложениях таких крупных компаний как SAP, Oracle, Manugistics, i-Log, i2 и ряда других, не позволяет на практике решать оперативно сложную задачу построения программы полета и грузопотока РС МКС с приемлемым уровнем качества и эффективности в получении результатов.

Вместе с тем, на базе активного развития мультиагентных технологий [17–20, 24–27] в области оптимизации ресурсов в последние годы наметилось новое научное направление, получившее название Distributed Constraint Optimization Problem (DCOP) – распределенная оптимизация в ограничениях, в котором главной задачей становится не поиск глобально-оптимальных, а возможно приближенных, допустимых или приемлемых (рациональных) решений, отвечающих заданным предпочтениям и ограничениям [97–100].

В этом подходе общим принципом является децентрализация и динамический характер в формировании решений, когда при наличии внешних воздействий мультиагентная система находит постепенно новое положение равновесия, при этом сложная задача разбивается на множество более простых, которые решаются автономно и учитывают сетевую структуру сложной задачи, за счет чего достигается значительный выигрыш в скорости решения задачи.

Алгоритмы могут различаться способом построения решений:

– asynchronous Distributed Constraint Optimization (ADOPT) [101–102] – этот метод использует подход «сверху вниз», при этом учитывается сетевая структура задачи, которая декомпозируется на более простые подзадачи, решаемые агентами;

– optimal Asynchronous Partial Overlay (OptAPO) [103] – этот метод использует подход построения решения «снизу вверх», после чего решения объединяются непротиворечивым образом. Часто может использоваться механизм «распространения ограничений вперед»;

– distributed pseudo-tree optimization (DPOP) [104] – этот метод использует подход разбиения задачи на различные поддеревья;

– asynchronous Backtracking (ABT) [105] – этот метод в децентрализованных алгоритмах использует «возврат», если при обмене сообщениями некоторые агенты получают противоречия в ограничениях, то происходит возврат к предыдущему состоянию задачи и производится корректировка.

Также было разработано несколько биотехнологических методов, например, роевая оптимизация, гибридные методы на основе искусственной иммунной системы и оптимизация методом роя частиц, для решения задач планирования производства и других. Методы роевой оптимизации, Particle Swarm Optimization (PSO) [106], основаны на применении метафоры «роя» агентов, и построены на основе имитации социального поведения и коммуникаций природных объектов, например, рой пчел, колония муравьев, стаи птиц и рыб.

В качестве следующего шага был разработан рыночный подход (Virtual Market) к планированию [107]. Эти методы используют экономический подход на основе виртуального рынка, в которых агенты участвуют в торгах посредством обмена сообщениями на основе модификаций Contract-net протоколов, в результате которых находится согласованное решение выгодное участникам.

Однако, несмотря на значительный прогресс в этой области, разработанные методы сохраняют многие указанные выше недостатки методов комбинаторной оптимизации и имеют экспоненциальный рост либо числа обменивающимися агентами сообщений, либо их объем [108, 109], поскольку лишь объединяют отдельные получаемые решения, но не позволяют согласовывать эти решения и искать баланс интересов между всеми заинтересованными сторонами.

Анализ существующих подходов, методов и средств планирования, распределения и оптимизации ресурсов выявил их основные ограничения, которые

связаны с необходимостью учета множества различных критериев, предпочтений и ограничений для каждой из подсистем МКС, каждого ТК и каждого груза, что на практике и требует значительных усилий от специалистов (проектантов и кураторов). Применение описанных подходов чаще всего оказывается неприемлемым на практике, поэтому проблема поиска и применения «рациональных методов», обеспечивающих быстрое и устраивающее всех решение задачи планирования грузопотока РС МКС, становится первостепенной.

Условие, когда фактор времени выходит на первое место, а скорость получения решения не должна сильно зависеть и увеличиваться от размерности задачи, является принципиальным и напрямую связано с обеспечением эффективного использования ресурсов, потому что возникновение задержек в принятии решений об их распределении может привести к полному срыву сроков поставки грузов на РС МКС, что повлияет на качество обеспечения станции, а также безопасность и надежность ее эксплуатации.

Таким образом, необходимость разработки адекватных методов и средств поддержки принятия решений управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования (на примере РС МКС) является актуальной задачей, решение которой направлено на повышение оперативности, гибкости и эффективности процесса принятия решений для управления грузопотоком РС МКС, при этом предлагается использовать мультиагентные технологии, позволяющие автоматизировать процессы поиска балансов интересов и согласования решений при управлении грузопотоком РС МКС.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Проведен анализ процесса управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на примере РС МКС. Рассмотрены особенности современных пилотируемых КА как объекта управления. В связи с усложнением конструкции РС МКС и устойчивым возрастанием объемов обрабатываемой информации, требуемой для управления полетом станции со стороны различных ЦУП, необходимо развитие процессов управления грузопотоком РС МКС в рамках единой наземно-космической системы.

2. Проведен анализ процесса управления полетом и грузопотокам РС МКС, включающий итерационное построение программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС, выделены основные этапы и проблемы этого процесса, проведен анализ основных событий, приводящих к пересогласованию планов, рассмотрены критерии, предпочтения и ограничения в согласовании и принятии решений.

3. Основная проблема и сложность управления грузопотоком заключается в наличии ряда участников с собственными интересами, множестве вариантов и взаимозависимости планов, ситуативном характере принимаемых решений, требующих согласования и координации действий всех участников, что приводит к большой трудоемкости процесса и высокой зависимости от человеческого фактора – что для решения поставленной задачи требует применение специальных подходов, методов и средств.

4. Формулируется обобщенная постановка задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС, где каждый участник может иметь собственные критерии, предпочтения и ограничения, причем их важность может изменяться.

5. Классические и современные подходы планирования, распределения и оптимизации ресурсов при управлении грузопотоком основаны в основном на использовании пакетного режима и приводят к большим затратам времени и вычислительных ресурсов при поиске решения, что делает на практике невозможным принятие решений по согласованному построению программы полета и грузопотока РС МКС, которая является NP-трудной задачей, и требует разработки новых подходов, методов и средств для решения поставленной задачи.

6. Для повышения эффективности управления грузопотоком РС МКС предлагается использовать мультиагентные технологии, позволяющие автоматизировать процессы разрешения конфликтов и нахождения баланса интересов при построении программы полета и распределении грузов по ТК.

2 РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ПВ-СЕТИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ И МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ РС МКС

2.1 Мультиагентные технологии для адаптивного управления сложными системами

Для решения задачи управления грузопотоком предлагается использовать теорию сложных адаптивных систем - новую науку о сложности (Complexity), основы которой заложил И. Пригожин [15].

Сложные системы в этой теории строятся как самоорганизующиеся системы, которые характеризуются нелинейностью своего поведения, когда малое входное воздействие на систему приводит к большим изменениям на выходе, равно как и наоборот, когда большие входные воздействия могут несущественно влиять на результирующие изменения. При этом также возможны задержки, колебания и осцилляции решений, лавинообразные изменения параметров и многие другие неожиданные реакции, ставящие в тупик управленцев.

В работе [17] предлагается следующее определение сложности: «Сложность является свойством открытой системы, которая состоит из большого числа разнообразных, частично автономных, активно взаимодействующих элементов, называемых агентами. Сложная система обычно не имеет жесткого централизованного управления, а ее поведение определяется взаимодействием агентов, и поэтому, не будучи хаотичным, является неопределенным (недетерминированным), поскольку в каждой ситуации определяется свободой выбора агентов и зависит от принимаемых ими решений».

Как отмечается в [17] сложные системы обладают следующими основными характеристиками: открытость – определяет взаимодействие с внешней средой; разнообразие – определяет автономность и взаимосвязь агентов; отсутствие централизованного управления – определяет способность агентов находить баланс интересов для согласования решений; эмерджентность поведения – определяет способность системы находить решение через взаимодействие своих элементов.

Таким образом, сложная система – это самоорганизующаяся система, построенная на поиске и поддержании баланса (гармонии) интересов агентов, где интеллект системы проявляется в цепочках взаимодействий и согласованных решений для достижения баланса интересов агентов, мгновенно изменяющийся по ситуации, что и определяет чувствительность системы к изменениям.

Сложные адаптивные системы состоят из автономных (самостоятельных) элементов (агентов), которые в результате взаимодействий и собственных решений, предпочтений и ограничений образуют или разрывают связи между собой. В результате целостность сложной системы формируется «снизу-вверх» путем самоорганизации образующих ее элементов, что рассматривается как более высокая ступень в организации систем, предопределяя ее открытость, гибкость и эффективность, надежность и живучесть.

Сложную систему невозможно разделить, как это делается в классическом системном анализе, на подсистемы, поведение которых анализируется отдельно, поскольку разрыв связей между различными элементами сложной системы повлечет за собой искажение поведения всей сложной системы в целом.

Выделяют семь ключевых свойств [110, 111], которые отличают сложные недетерминированные системы от детерминированных систем:

– связность – система состоит из большого числа автономных агентов (элементов), находящихся в тесном взаимодействии друг с другом;

– автономность – элементы имеют собственное целеполагание и не могут быть просто «вызваны» для выполнения требуемой функций, иначе они потеряют свой контекст и никогда не достигнут своих целей;

– эмерджентность – общее сложное поведение системы формируется в процессе взаимодействия относительно простых агентов, что ограничивает поведение агентов, при этом эмерджентные явления возникают спонтанно;

– неравновесность – общее поведение системы «удалено от равновесия» в связи с частым возникновением непредвиденных событий и обстоятельств, которые не позволяют системе вернуться в состояние равновесия;

– нелинейность – мелкие изменения на входе могут приводить к большим изменениям на выходе системы («эффект бабочки»), при этом в самоорганизующихся системах наблюдаются и другие феномены нелинейного поведения, такие как резонансы, катастрофы, автокаталитические реакции и т.д.;

– самоорганизация – система способна к самоорганизации в случае возникновения событий, например, связанных с появлением новых или отзывом уже распределенных заказов, поломками ресурсов и т.д.;

– эволюция – система необратимо развивается во взаимодействии с окружающей средой, адаптивно пересматривая принятые решения, систему нельзя «откатить» назад – изменились условия момента времени принятия решения.

Примерами сложных адаптивных систем в окружающем нас мире являются экология, климат, мировой рынок, семья, команда, рой пчел, человеческий мозг, человеческое общество, дорожное движение, жизненный цикл самолета или КА.

Сложные системы предполагают простейший «интеллект» в базовых элементах, при этом достаточно разнообразные протоколы их взаимодействия обеспечивают гибкое реагирование на изменения и адаптацию планов к событиям.

Традиционные подходы к управлению не могут быть эффективно применимы к сложным адаптивным системам, которые характеризуются высокой степенью неопределенности, поскольку принципы самоорганизации напрямую противоречат стремлению тотально контролировать каждый шаг в решении.

Управление сложными адаптивными системами для достижения поставленных целей предполагает процесс изменения находящихся под нашим контролем параметров. Изменение этих параметров позволяет уменьшить или увеличить сложность системы, при этом можно увеличить или уменьшить степень свободы системы для поиска и согласования вариантов решения сложной задачи.

При адаптивном управлении сложными системами с использованием мультиагентных моделей можно выделить следующие ключевые параметры сложности: уровень автономности агентов – обозначает степень свободы в принятии решений, данную им в системе, чтобы решать, как поступать в той или иной ситуации; степень связности – обозначает, насколько регламентированы

взаимодействия агентов между собой в системе; сила (прочность) связей между агентами – обозначает взаимную удовлетворенность агентов связью и способность агентов противостоять угрозе ее разрыва; удовлетворенность – обозначает величину, обратно пропорциональную разнице между текущим и идеальным значением по заданному агенту целевому критерию; запас энергии агентов – обозначает условные денежные средства, играющие роль потенциальной энергии, позволяя перестраивать решение, при этом наибольшие изменения в системе следует ожидать от неудовлетворенных агентов, обладающих высокой энергией.

Для практической реализации этой методологии предлагается использовать мультиагентные технологии (МАТ) [18], направление в области информационных технологий, которое начало формироваться в 70-80-ые годы XX века на стыке достижений в областях объектно-ориентированного программирования, искусственного интеллекта, параллельных вычислений и телекоммуникаций.

В отличие от классических больших, централизованных и последовательных программ, мультиагентные системы (МАС) построены в виде распределенных групп небольших автономных программных объектов, работающих асинхронно и согласованно. В работе [112] экспериментально показано, что решение любой сложной задачи планирования и оптимизации ресурсов может быть получено путем самоорганизации агентов, имеющих множество противоположных интересов, способных как конкурировать, так и кооперировать на виртуальном рынке МАС. Проводимые в последнее время разработки [113, 114] на основе МАТ, использующие фундаментальные принципы самоорганизации и эволюции, присущие живым системам, например, колонии муравьев или рою пчел [115], позволяют представить процесс решения любой сложной проблемы как процесс поиска баланса противоположных интересов базовых агентов. Получаемое решение рассматривается как «неустойчивое равновесие» (или «устойчивое неравновесие») интересов таких сущностей, достигающих в ходе своих взаимодействий определенного баланса интересов (компромисса).

Как отмечается в [17], агент – это автономный программный объект, способный достигать поставленных целей в условиях неопределенности путем

выработки и анализа вариантов принятия решений и согласованного взаимодействия с другими агентами, действуя в интересах или от лица своего владельца, а также воспринимать изменения из внешнего мира, вырабатывать свою реакцию на это воздействие и формировать ответное действие в среду.

При этом выделяют следующие характеристики программных агентов: автономность (autonomy) – способность функционировать для достижения поставленных целей без вмешательства других систем или человека, контролируя свои действия и внутреннее состояние; проактивность (proactivity) – агент демонстрирует управляемое целями поведение, проявляя инициативу для улучшения своего текущего состояния; реактивность (reactivity) – агент воспринимает внешнюю среду и реагирует на события изменений, адаптируя свое поведение для достижения целей; социальное поведение (social ability) – агент взаимодействует с другими агентами среды для согласования решений.

Свойства МАС в сравнении со свойствами традиционных систем (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Сравнение свойств мультиагентных и традиционных систем

| Свойства традиционных систем | Свойства мультиагентных систем |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Иерархии больших программ | Большие сети малых агентов |
| Последовательное выполнение операций | Параллельное выполнение операций |
| Инструкции сверху вниз | Переговоры равных сторон |
| Централизованные решения | Распределённые решения |
| Управляются данными | Управляются знаниями |
| Предсказуемость | Самоорганизация |
| Стабильность | Эволюция |
| Стремление уменьшать сложность | Стремление наращивать сложность |
| Тотальный контроль | Создание условий для развития |

Отметим важные свойства программных агентов [17], которыми они должны обладать для достижения поставленных целей: иметь поставленные цели, следовать им и выбирать способы их достижения в зависимости от текущей ситуации; реагировать на события и изменения ситуации в среде путем мониторинга самой среды или получая сигналы (сообщения); обращаться к встроенным сценариям возможных действий или в базу знаний, чтобы определить, какую задачу необходимо выполнить и как это сделать; отправлять сообщения другим агентам или пользователям, или, наоборот, получать от них сообщения; решать задачи, необходимые для принятия решений; анализировать получаемую

информацию, вырабатывать и сопоставлять варианты решений, принимать решения и согласовывать с другими агентами; устанавливать и разрывать связи с другими агентами; оценивать эффективность своих решений и работы в целом.

В процессе своего жизненного цикла агенты могут быть постоянно активными или временно активироваться при возникновении событий, переходить из пассивного состояния – в активное и наоборот, а также быть проактивными, т.е. самостоятельно, без внешних побуждающих воздействий, искать возможности увеличения ценности своих решений для достижения своих целей. Ценность решения – совокупный показатель эффективности работы агентов, отдельных элементов сети предприятия (или всех элементов предприятия в целом), который включает в себя такие показатели, как прибыль и качество, надежность и безопасность функционирования, риски или любые другие.

МАС – система, состоящая из групп агентов, конкурирующих или сотрудничающих друг с другом с целью выполнить общую задачу таким образом, чтобы увеличить ценность принимаемых решений для всей системы. Поведение МАС определяется не одним детерминированным алгоритмом, а формируется эволюционным путем из взаимодействия составляющих ее агентов.

При этом в МАС ключевое значение для принятия решений агентами при управлении ресурсами играют знания о предметной области – как иначе агенту заказа узнать, например, с какими ресурсами он может взаимодействовать. Применение баз знаний о предметной области позволяет сделать МАС достаточно универсальной и легко настраиваемой под особенности различных предметных областей. Один из подходов создания баз знаний связан с использованием онтологий, представленных семантическими сетями понятий и отношений [116].

На данный момент в мире реализован ряд проектов промышленных МАС для машиностроительных предприятий [117]. В последнее время МАТ все чаще применяются для создания интеллектуальных аэрокосмических систем [118], и в частности систем управления пилотируемыми космическими полетами [119].

В работах О. Н. Граничина [19] и А. Л. Фрадкова [120, 121] доказывается полиномиальный характер сложности подхода к решению подобных задач,

оказывается применим к динамическому распределению ресурсов и позволяет находить квазиоптимальное решение NP-полных задач за приемлемое время.

В результате анализа сделан вывод, что МАС обладают наибольшим потенциалом для управления грузопотоком, так как позволяют достаточно быстро решать сложные задачи планирования с множеством объектов, параметров большой динамикой их изменения, и обеспечивают возможность изменения числа критериев, правил и ограничений для адаптивной подстройки к изменяющейся ситуации, когда ни тип и количество грузов, ни число ТС заранее не известно и может постоянно изменяться в течение горизонта планирования.

Далее дается формализованное описание различных критериев, правил и ограничений для построения программы полета и грузопотока РС МКС, дается развитие подхода на основе МАТ и онтологий для создания МАС поддержки принятия решений для управления грузопотоком, позволяющая выполнять согласованное планирование грузов и полетов «снизу», давая простор проектантам и кураторам для поиска альтернативных вариантов в интерактивном режиме.

2.2 Формализованное описание критериев, предпочтений и ограничений для построения программы полета и грузопотока РС МКС

Формализация множества начальных данных и результатов решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС была представлена в подразделе 1.5. Для обеспечения возможности согласованного формирования всех планов необходимо определить частные критерии оценки решения и комплексный критерий оценки результата решения в целом для поиска баланса интересов между участниками процесса построения программы полета и грузопотока РС МКС, а также систему правил и ограничений, влияющих на результат [29].

2.2.1 Ключевые частные критерии принятия решения

В зависимости от конкретных требований прикладной области и поставленных задач следует рассматривать целый ряд ключевых критериев оценки решения задачи. В частности, для случая построения программы полета и грузопотока РС МКС наиболее обоснованными являются следующие.

1. Максимальное удовлетворение отдельных критериев полета ТК. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого критерия отдельного полета ТК.

$$W_{ij} = f_{ij}(pp_j, pp_{ij}^{id}) \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

где f_{ij} – оценочная функция удовлетворенности по критерию j полета ТК i , pp_j – текущее значение критерия j полета ТК i , pp_{ij}^{id} – идеальное значение критерия pp_j полета ТК i .

2. Максимальное удовлетворение отдельных критериев грузов. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого критерия отдельного груза.

$$W_{km} = f_{km}(pg_m, pg_{km}^{id}) \rightarrow \max, \quad (2.2)$$

где f_{km} – оценочная функция удовлетворенности по критерию m груза k , pg_k – текущее значение критерия m груза k , pg_{km}^{id} – идеальное значение критерия pg_k груза k .

3. Максимальное удовлетворение отдельных портов на РС МКС. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого порта РС МКС.

$$W_c = f_c(s, s_c^{id}) \rightarrow \max, \quad (2.3)$$

где f_c – оценочная функция удовлетворенности порта c на РС МКС, s – текущее значение критерия порта c , s_c^{id} – идеальное значение порта s_c .

4. Максимальное удовлетворение зон хранения грузов на РС МКС. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности каждой зоны хранения.

$$W_e = f_e(z, z_e^{id}) \rightarrow \max, \quad (2.4)$$

где f_e – оценочная функция удовлетворенности зоны хранения e , z – текущее значение критерия зоны хранения, z_e^{id} – идеальное значение зоны хранения z_e .

Вышеперечисленные оценочные функции удовлетворенности строятся таким образом, чтобы при минимальной разности между текущим значением критерия и его идеальным значением, значение функции было максимальным.

К текущей задаче необходимо применение критериев, которые могут появиться каждый раз при изменении ситуации и появлении нового события, при этом меняется постановка задачи и вовлеченных в ее решение состав агентов,

поэтому метод решения задачи должен предусматривать возможность расширения числа критериев и изменения их приоритетности при изменении ситуации.

При построении функций удовлетворенности частных критериев W_{ij} , W_{km} , W_c , W_e необходимо соблюдать требования их нормирования и сведения к безразмерным величинам, чтобы далее можно было их свести к обобщенному виду с применением весовых коэффициентов для построения комплексного критерия.

2.2.2 Построение комплексного критерия оценки решения задачи

Нормированные и сведенные к безразмерным величинам выше описанные ключевые критерии W_{ij} , W_{km} , W_c , W_e необходимо свести к комплексному критерию для сопоставления вариантов расписаний грузопотока. Для этого воспользуемся методом свёртывания векторного критерия, учитывающим относительную важность частных критериев, где общая функция удовлетворенности рассчитывается как сумма удовлетворенностей всех агентов с учетом их весовых коэффициентов. Цель состоит в максимизации общей функции удовлетворенности по всем участникам планирования:

$$F = \sum_{h=1}^H y_h W_h \rightarrow \max, \quad (2.5)$$

где F – комплексный критерий решения задачи планирования, y_h – значение весового коэффициента для критерия h , при этом $0 \leq y_h \leq 1$ и их сумма $\sum_{h=1}^H y_h = 1$, W_h – значение нормированного критерия h , H – общее количество критериев планирования, h – порядковый номер критерия.

Применяемый метод свертывания критериев, позволяет изменять их весовые коэффициенты y_h , при этом повышая приоритет наиболее важным и уменьшая приоритет менее значимым на данный момент времени, адаптивно подстраиваясь под изменяющуюся ситуацию. Все критерии должны быть количественно соизмеримы между собой – нормализованы и приведены к безразмерному виду.

Построение комплексного критерия идет в несколько этапов.

1. Максимальное удовлетворение отдельного полета ТК. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого полета ТК за счет свертывания частных критериев отдельного полета ТК.

$$W_i = \sum_{j=1}^{Npp} y_{ij}^{PP} W_{ij} \rightarrow \max, \quad (2.6)$$

где W_i – комплексный критерий полета ТК i , y_{ij}^{PP} – значение весового коэффициента для критерия j полета ТК i , при этом $0 \leq y_{ij}^{PP} \leq 1$ и их сумма $\sum_{j=1}^{Npp} y_{ij}^{PP} = 1$, W_{ij} – значение нормированного критерия j полета ТК i , Npp – общее количество критериев полета ТК i , j – порядковый номер критерия полета ТК i .

2. Максимальное удовлетворение набора полетов ТК. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности системы полетов ТК за счет свертывания набора полетов ТК.

$$W^P = \sum_{i=1}^{Np} y_i^P W_i \rightarrow \max, \quad (2.7)$$

где W^P – комплексный критерий системы полетов ТК, y_i^P – значение весового коэффициента для полета ТК i , при этом $0 \leq y_i^P \leq 1$ и их сумма $\sum_{i=1}^{Np} y_i^P = 1$, W_i – значение нормированного критерия полета ТК i , Np – общее количество полетов ТК, i – порядковый номер полета ТК.

3. Максимальное удовлетворение отдельного груза. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности каждого груза за счет свертывания частных критериев грузов.

$$W_k = \sum_{m=1}^{Npg} y_{km}^{PG} W_{km} \rightarrow \max, \quad (2.8)$$

где W_k – комплексный критерий груза k , y_{km}^{PG} – значение весового коэффициента для критерия m груза k , при этом $0 \leq y_{km}^{PG} \leq 1$ и их сумма $\sum_{m=1}^{Npg} y_{km}^{PG} = 1$, W_{km} – значение нормированного критерия m груза k , Npg – общее количество критериев груза k , m – порядковый номер критерия груза k .

4. Максимальное удовлетворение набора грузов. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности системы грузов за счет свертывания набора грузов.

$$W^G = \sum_{k=1}^{Ng} y_k^G W_k \rightarrow \max, \quad (2.9)$$

где W^G – комплексный критерий системы грузов, y_k^G – значение весового коэффициента для груза k , при этом $0 \leq y_k^G \leq 1$ и их сумма $\sum_{k=1}^{Ng} y_k^G = 1$, W_k –

значение нормированного критерия груза k , Ng – общее количество грузов, k – порядковый номер груза.

5. Максимальное удовлетворение набора портов станции. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности системы портов за счет свертывания набора портов.

$$W^S = \sum_{c=1}^{Ns} y_c^S W_c \rightarrow \max, \quad (2.10)$$

где W^S – комплексный критерий системы портов, y_c^S – значение весового коэффициента для порта c , при этом $0 \leq y_c^S \leq 1$ и их сумма $\sum_{c=1}^{Ns} y_c^S = 1$, W_c – значение нормированного критерия порта c , Ns – общее количество портов, c – порядковый номер порта.

6. Максимальное удовлетворение набора зон хранения грузов. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности системы зон хранения грузов за счет свертывания набора зон хранения.

$$W^Z = \sum_{e=1}^{Nz} y_e^Z W_e \rightarrow \max, \quad (2.11)$$

где W^Z – комплексный критерий системы зон хранения грузов, y_e^Z – значение весового коэффициента для зоны хранения грузов e , при этом $0 \leq y_e^Z \leq 1$ и их сумма $\sum_{e=1}^{Nz} y_e^Z = 1$, W_e – значение нормированного критерия зоны хранения грузов e , Nz – общее количество зон хранения, e – порядковый номер зоны хранения.

7. Максимально удовлетворение обобщённого комплексного критерия решения задачи планирования. Цель состоит в максимизации функции удовлетворенности комплексного критерия за счет свертывания системы полетов ТК, системы грузов, системы портов и системы зон хранения грузов, полученных выше на шагах 2, 4, 5, 6, при этом необходимо обеспечить баланс интересов для всего набора агентов, которые имеют собственные цели, критерии и ограничения.

$$F = y_p W^P + y_g W^G + y_s W^S + y_z W^Z \rightarrow \max, \quad (2.12)$$

где F – комплексный критерий решения задачи планирования, y_p, y_g, y_s, y_z – значение весовых коэффициентов для набора полетов ТК, набора грузов, набора портов и набора зон хранения грузов, при этом $0 \leq y_h \leq 1$ и их сумма $\sum_{h=1}^H y_h = 1$, W^P, W^G, W^S, W^Z – значение нормированных критериев.

В данном случае суть работы системы по поиску согласованного решения будет состоять в максимизации значения функции удовлетворенности $F \rightarrow \max$, в ходе которого весовые коэффициенты могут меняться, тем самым динамически меняя приоритеты. Таким образом, задача планирования формулируется в работе как задача максимизации показателя удовлетворенности всех участников этого процесса с учетом текущей важности каждого критерия.

Для завершения формализации постановки задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС далее формализуем основные ограничения, которые должны быть учтены при поиске баланса интересов всех участников планирования.

2.2.3 Основные правила и ограничения

Помимо определения частных критериев и комплексного критерия оценки решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС требуется сформулировать систему правил и ограничений, отражающих специфику процесса планирования и учитывающих предъявляемые требования к итоговым версиям программы полета и грузопотока РС МКС. Приведем основные ограничения.

1. Количество космонавтов, доставляемых посредством ТПК «Союз» на борт МКС, должно быть в количестве трех человек:

$$\sum_{r=1}^{Nkos} kos_r = 3, \quad (2.13)$$

где $\sum_{r=1}^{Nkos} kos_r$ – количество космонавтов, размещающихся на ТПК «Союз».

2. Минимальный интервал времени между стартом и отстыковкой на одном порту станции не должен быть меньше чем $T1$ дней:

$$ds_{i+1} - do_i \geq T1, \quad (2.14)$$

где do_i – дата отстыковки ТК i , ds_{i+1} – дата стыковки следующего ТК.

3. Количество дней полета ТК в составе РС МКС должно быть $T2$ дней:

$$do_i - ds_i = T2, \quad (2.15)$$

где ds_i – дата стыковки ТК i , do_i – дата отстыковки ТК i .

4. Суммарное количество грузов, запланированных на полет ТК, не должно превышать грузоподъемность ТК:

$$\frac{\sum_k pg_{km}^{mass}}{pg_{ii}^{gruz}} \leq 1, \quad (2.16)$$

где pg_{ii}^{gruz} – критерий j , характеризующий грузоподъемность ТК i , pg_{km}^{mass} – критерий m , характеризующий массу груза k , $\sum_k pg_{km}^{mass}$ – сумма масс всех грузов, размещающихся на ТК i .

5. Доставляемые на борт станции грузы должны размещаться в закрепленных за этим типом грузов зонах:

$$\sum_{k=1}^{Ng} pg_{km} = \sum_{e=1}^Z z_e^{m1}, \quad (2.17)$$

где $m1$ – тип зоны хранения, $\sum_{k=1}^{Ng} pg_{km}$ – все грузы с критерием m привязывающего к зонам хранения с типом $m1$, $\sum_{e=1}^Z z_e^{m1}$ – все зоны хранения с типом $m1$ для данного типа m груза.

6. Груз должен быть утилизирован через $T3$ дней полета ТК в составе станции:

$$ds_i + pg_{km} = T3 \leq do_i, \quad (2.18)$$

где pg_{km} – критерий m количества дней до утилизации груза k , ds_i – дата старта полета ТК i , do_i – дата отстыковки полета ТК i .

Перечень вышеприведенных правил и ограничений в дальнейшем может быть значительно расширен и дополнен. Правила и ограничение не являются единожды заданными и постоянными, а зависят от конкретной складывающиеся на данный момент ситуации и потока входящих событий, например, при нештатных и аварийных ситуациях, необходимо изменить критерии принятия решений, а также правила и ограничения, при этом изменяется постановка задачи и состав агентов, вовлеченных в решение задачи. Такие постоянно изменяющиеся модели ситуаций, можно описывать с помощью предметных онтологий [122].

На качество решения задачи планирования напрямую влияет применение следующей совокупности данных для построения программы полета и грузопотока РС МКС: начальные сведения о ресурсах, текущая ситуация в реальном мире, события изменений, предпочтения и ограничения, знания о предметной. Входные и выходные данные в контуре управления грузопотоком основных участников для РС МКС представлены ниже (рис. 2.1).

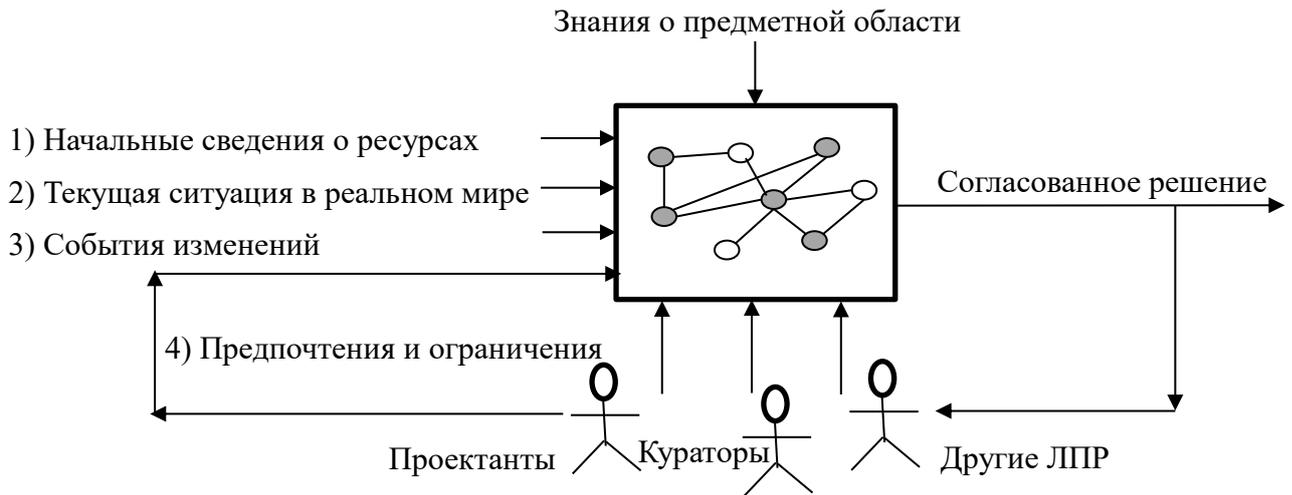


Рисунок 2.1 – Входные и выходные данные в контуре управления грузопотоком

Для решения задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС формализовано множество фактов начальных данных, таких как множество полетов ТК P с набором характеризующих их критериев PP_i , множество грузов G с набором характеризующих их критериев PG_k , а также даны множества космонавтов KOS , портов S , зон хранения грузов Z . При решении задачи необходимо сформировать программу полета PT и грузопоток PG , а также планы размещения грузов на борту станции PR , утилизации PU и возврата PV грузов. При планировании необходимо учитывать критерии максимизации удовлетворенности полетов ТК W^P , грузов W^G , портов W^S и зон хранения W^Z , при этом необходимо учитывать систему правил и ограничения планирования, например, не превышение грузоподъемности ТК, минимизацию интервалов времени между стартом и отстыковкой на одном порту, ограничения по количеству дней полета ТК, приоритеты по размещению грузов на борту станции и т.п.

Поставленную задачу предлагается решать с помощью МАТ и предметных онтологий для согласованного взаимодействия различных модулей планирования, так как они позволяют достаточно быстро и качественно решать подобные сложные задачи с множеством объектов, параметров, событий и большой динамикой их изменения, и обеспечивают возможность изменения числа критериев, правил и ограничений для адаптивной подстройки к изменяющейся ситуации [26, 27, 112, 116, 118, 119, 122-127].

Для решения поставленной задачи на основе предлагаемого подхода следует провести развитие концепции ПВ-сети [26] для управления грузопотоком и модифицировать метод сопряженных взаимодействий [27] для построения программы полета и грузопотока РС МКС, что позволит найти баланс интересов и сформировать планы программы полета и грузопотока РС МКС, запланировать грузы, которые являются наиболее важными и срочными и доставить их на борт РС МКС в требуемое время для обеспечения надежности станции.

2.3 Развитие модели ПВ-сети управления грузопотоком и модификация метода сопряженных взаимодействия для построения программы полета и грузопотока РС МКС

2.3.1 Базовые принципы концепции ПВ-сети и метода сопряженных взаимодействий

В разработанном подходе для создания МАС [26, 27, 123] было предложено использовать ПВ-сети, в которых вместе с базовыми классами агентов заказов и ресурсов дополнительно выделяются агенты потребностей и возможностей, которые представляют собой сущности с противоположными интересами, которые действуют в рамках виртуального рынка МАС на основе экономических рассуждений и могут как конкурировать, так и кооперироваться друг с другом.

Базовые классы агентов характеризуются следующими целями и задачами:

- агент заказа – основной целью является обеспечение наилучшего варианта выполнения своего заказа на имеющихся ресурсах с наилучшим качеством, минимальной стоимостью и сроками выполнения, необходимым качеством;
- агент ресурса – основной целью является обеспечение максимальной загрузки своего ресурса с учетом знаний о его специализации, производительности, плане регламентных работ и других особенностях.

Агенты потребностей и возможностей выступают в качестве помощников основных агентов заказов и ресурсов, позволяя указанным выше агентам параллельно и асинхронно постоянно искать друг друга на виртуальном рынке МАС, выполняя непрерывный поиск соответствия между ними (матчинг) и

установить связи (рис. 2.2). При этом роль потребности несет в себе знания «идеала» (будущего), а роль возможности – знание «реальности» (прошлого).

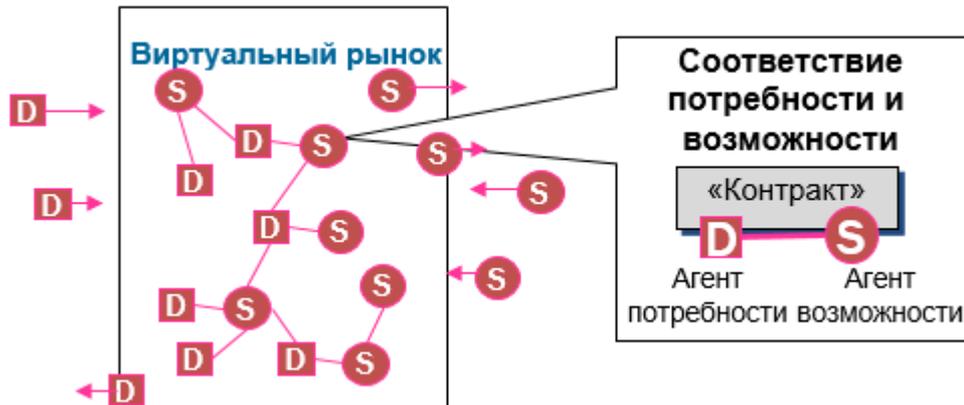


Рисунок 2.2 – Виртуальный рынок агентов ПВ-сети

Основной задачей агентов потребностей является поиск возможностей (ресурсов) для удовлетворения потребностей, а основная задача агентов возможностей состоит в поисках потребностей (заказов) для использования своих возможностей. Если поиск завершился успешно, то агенты потребностей и возможностей заключают или пересматривают контракты между собой на виртуальном рынке МАС с выплатой бонусов в случае успешного установления связей и штрафов в случае их разрыва, при этом производятся при уступках в ходе переговоров компенсации за ухудшение позиций.

Механизм постоянного поиска соответствий между конкурирующими и кооперирующимися агентами потребностей и возможностей на виртуальном рынке МАС позволяет строить решение любой сложной задачи как динамическую сеть связей между потребностями и возможностями, адаптивно изменяемую в реальном времени. При этом основной особенностью подхода является способность агентов потребностей и возможностей реагировать на любые события и изменения в МАС, автономно устанавливая новые связи между компонентами или разрывая существующие, тем самым приводя к самоорганизации заказов и ресурсов.

Устанавливаемые на основе целей связи между агентами потребностей и возможностей могут являться простейшими отношениями различных типов [26]:

– структурные отношения $R1$ – потребность «a» порождается возможностью «b» и $R2$ – потребность «a» есть часть потребности «b»;

– отношение возможного соответствия между возможностями или потребностями (отношение «матчинга») $R3$ – потребность « a » может соответствовать возможности « b »;

– отношение связи $R4$ – потребность « a » связана с возможностью « b ».

В зависимости от специфики предметной области и сложности ПВ-сети спектр базовых отношений может меняться и расширяться.

Для принятия решений агентами и построения ПВ-сети необходимы правила, определяющие возможность установления агентами связей между собой для достижения поставленных индивидуальных целей, например, если параметры возможности и потребности удовлетворяют некоторому условию «матчинга», то агенты потребности и возможности могут вступить в переговоры.

Развивающуюся ПВ-сеть в формализованном виде можно представить множеством D :

$$D = \{A, R, P, G\}, \quad (2.19)$$

где: A – множество агентов потребностей и возможностей для заданной предметной области; R – множество возможных отношений между агентами потребностей и возможностей; P – множество правил принятия решений и установления (разрыва) связей; G – множество целей, заданных агентам.

Реализацией ПВ-сети $S(D, t)$ называется означенная конкретная ее конфигурация (сцена). Сцена отражает состояние агентов потребностей и возможностей и установленные отношения между ними в конкретный момент времени t . Так как МАС является открытой и получает события из внешней среды, то в процессе функционирования или моделирования МАС может перейти из состояния $S1$ в состояние $S2$ с помощью правил P на основе поставленных целей G .

В ходе функционирования МАС сложность модели ПВ-сети постоянно увеличивается за счет роста числа и типов агентов, представляющих разнообразные интересы, постоянно изменяющихся предпочтений и ограничений различных участников, необходимых для решения задачи, числа возможных протоколов взаимодействий между агентами разных типов.

В классической концепции ПВ-сети для решения задач производственного планирования выделяют семь базовых классов агентов: агенты заказа и ресурса, описанные выше, а также агенты технологического процесса, задачи, продукта, потребителя и штабного агента.

Метод сопряженных взаимодействий [27] реализует согласованное взаимодействие агентов ПВ-сети на основе переговоров и позволяет распределять неоднородные ресурсы большой размерности в реальном времени. При этом МАС является открытой и любые элементы могут взаимодействовать между собой в условиях, когда состояние ресурсов МАС и потребность в них могут измениться в любой момент времени. Элементы (потребности и ресурсы), между которыми устанавливается связь, называются сопряженными элементами.

Метод сопряженных взаимодействий для установления связей между потребностями и возможностями в ПВ-сети реализуется следующим образом [27]:

1) фиксируется множество однородных и неоднородных сопряженных элементов МАС (агентов), обладающих определенными возможностями и потребностями в других ресурсах;

2) для всех агентов описываются индивидуальные цели и критерии принятия решения, а также их предпочтения и ограничения;

3) для разрешения возникающих конфликтов и поиска компромисса между элементами при установлении связей определяются правила и протоколы (регламенты) сопряженных взаимодействий между агентами;

4) с помощью специальных инструментальных средств программирования разрабатывается МАС для моделирования сопряженных взаимодействий;

5) в результате моделирования сопряженных взаимодействий строится ПВ-сеть, определяющая соответствующее первоначальное распределение ресурсов;

6) с приходом новых событий может измениться как состояние ресурсов, так и потребность в них, при этом разрешение возникающих конфликтов перестраивает ПВ-сеть только в той части, которая непосредственно связана с изменениями;

7) когда ни один элемент ПВ-сети не может улучшить свое состояние или вышло время на распределение ресурсов, решение считается найденным.

Таким образом, метод сопряженных взаимодействий позволяет построить ПВ-сеть и адаптировать поведение агентов по событиям, происходящим в реальном времени, что представляет собой пример самоорганизующейся МАС.

К достоинствам принципов концепции ПВ-сети и метода сопряженных взаимодействий можно отнести: простоту реализации на их основе МАС, позволившей унифицировать агентов потребностей и возможностей; непрерывный процесс пересмотра решений агентами в реальном времени, позволяющий МАС гибко реагировать на любые события; способность агентов ПВ-сети к самоорганизации; возможность работать с онтологиями предметной области.

К недостаткам можно отнести:

– наличие в ПВ-сети только агентов заказов и ресурсов, а также соответствующих им возможностей и потребностей, что не дает гарантии выполнить «большой» заказ в срок, чьи потребности превышают возможности существующих ресурсов ПВ-сети, в то время как агент более высокого уровня мог бы решить ситуацию выделением дополнительных ресурсов или дать разрешение, если это допустимо, на сдвиг сроков;

– агенты заказов и ресурсов в ПВ-сети позволяют эффективно работать на тактическом (оперативном) уровне предприятия, но плохо моделируют стратегический уровень загрузки мощностей предприятия в целом;

– отсутствие в ПВ-сети механизмов, которые учитывают предъявляемые требования к продуктам и услугам, которые производятся в результате взаимодействия заказов и ресурсов;

– отсутствием в ПВ-сети механизма для учета структуры заказа, технологии исполнения его отдельных частей, требований к специалистам и оборудованию по каждой задаче (операции), материалам и инструментам и т.д.

Таким образом, для эффективного применения мультиагентного подхода к решению задачи управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования требуется развитие концепции ПВ-сети и модификация метода сопряженных взаимодействий для устранения указанных недостатков.

2.3.2 Развитие модели ПВ-сети и модификация метода для управления грузопотоком РС МКС

Для решения задачи управления грузопотоком РС МКС и согласования всех планов основными участниками процесса (проектантами и кураторами) принятия решений было проведено развитие модели ПВ-сети управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на примере РС МКС и модифицирован метод сопряженных взаимодействий для учета особенностей планирования программы полета и грузопотока станции [128, 129].

В рамках развития концепция ПВ-сети для решения класса задач управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования предлагается ввести новые классы агентов, учитывающие индивидуальные особенности подсистем сложного технического объекта, ТС, грузов и команды, а также диспетчеров (специалистов, операторов), которые должны обеспечить повышение качества решения задачи управления грузопотоком сложных объектов:

- агент подсистем сложного технического объекта – является заказчиком и потребителем доставляемых грузов. Основной целью является анализ и прогнозирование своего состояния и обеспечение формирования заказов на своевременную доставку необходимого количества грузов для поддержания требуемых запасов и обеспечения своей непрерывной работоспособности, с минимальной стоимостью и сроками выполнения, необходимым качеством;

- агент ТС – является ресурсом, обеспечивающим доставку грузов. Основной целью является обеспечение оптимальной загрузки своего ресурса по массе и объему с учетом знаний о своей специализации, грузоподъемности, вместимости по различным видам грузов и другим особенностям для перевозки грузов;

- агент груза – является продуктом, который потребляется подсистемами сложного технического объекта и командой. Основной целью является своевременная доставка, обеспечение минимального времени хранения груза на складе, с учетом параметров, условий хранения, транспортировки и эксплуатации;

- агент команды – является, как и подсистемы сложного технического объекта, заказчиком и потребителем доставляемых грузов, а также ресурсом для

выполнения необходимых задач и операций для обеспечения жизнедеятельности сложного технического объекта. Кроме выше описанных целей, которые свойственны и команде, также основной целью является учет психофизических и медицинских особенностей человека для выполнения операций и поддержания жизнедеятельности сложных технических объектов;

– агент диспетчера (специалиста, оператора) – является штабным агентом, сохраняющим целостность решения, также специалисты и операторы могут представлять собой разновидность агентов заказа. Основной целью является обеспечение постоянного анализа ситуации и достигнутых показателей и результатов, также имеет возможность вмешиваться в работу других агентов в случае возникновения критических ситуаций при невозможности самостоятельного разрешения агентами нижнего уровня конфликтов. При этом агент диспетчера может: наблюдать за ситуацией; изменять стратегии поведения агентов нижнего уровня, меняя уставки, веса, пороги, приоритеты и т.п.; делать точечные вбросы для коррекции принятых решений; привлекать ресурсы на сверхурочные; обеспечивать развитие. Задача заключается в том, чтобы гарантировать максимизацию ценности решений в ПВ-сети управления грузопотоком в процессе распределения возможностей по потребностям.

Для дальнейшего развития мультиагентного подхода для управления грузопотоком сложного технического объекта, можно ввести специализированного агента задачи для выполнения операций командой, например, для разгрузки грузов, проведения технического обслуживания и ремонта сложного технического объекта. Агент задачи должен обеспечить исполнение заказа, для этого он имеет доступ к знаниям о структуре заказа, технологии исполнения его частей, требованиям к рабочим и оборудованию для выполнения каждой операции, материалам и инструментам, а также результатам. Так, например, на нижнем уровне задача может создавать потребность в интервале времени для ее исполнения, а ресурс предлагать возможность исполнения задачи на некотором своем доступном интервале времени, при этом связка между ними образует базовый элемент ПВ-сети для любого сколь угодно сложного расписания.

В рамках дальнейшей модификации метода сопряженных взаимодействий для решения задачи управления грузопотоком на примере РС МКС предлагается на основе выше описанных базовых агентов ввести новые специализированные классы агентов рассматриваемой предметной области управления грузопотоком РС МКС, учитывающие индивидуальные особенности бортовых систем, модулей и портов МКС, ТК и их полетов, заказов грузов и грузов, экипажа, проектантов и кураторов (табл. 2.2), а также присущие им новые протоколы переговоров для достижения баланса интересов при построении программы полета и грузопотока.

Таблица 2.2 – Основные классы агентов в задаче управления грузопотоком РС МКС

| Агент | Цели и задачи | Ограничения |
|---|---|---|
| Агенты бортовых систем, модулей, портов МКС | Сохранить величину остатка данного ресурса как можно ближе к желаемой и не ниже критически допустимой. Размещать грузы в предпочтительных, закрепленных зонах на станции. Пристыковывать ТК на предпочтительных портах. | Неснижаемый остаток; срок годности; часы наработки. Максимально возможный объем для размещения; ограничения в зонах хранения по типам грузов. Типы портов стыковки. |
| Агенты ТК и полетов ТК | Оказаться удовлетворенным текущим заполнением (т.е. по всем видам грузов быть максимально заполненным). Попасть в программу полета в необходимое время старта. | Грузоподъемность, вместимость по различным видам грузов; совместимость при перевозке различных грузов. Баллистика, интервалы стартов и стыковок. |
| Агенты заказа груза и груза | Попасть в план грузопотока в требуемый период соответствующей заявки. Разместится в нужной зоне хранения на станции. | Ограничения по максимальному и минимальному количеству. Совместимость с другими видами. |
| Агенты экипажа | Оказаться удовлетворенным текущими запасами продовольственных и медикаментозных ресурсов. | Время работы. Неснижаемый остаток продовольственных и медикаментозных ресурсов. |
| Агенты проектантов и кураторов | Контроль за показателями качества плана и его исполнения плана. Обеспечение целей безопасности и целей полета; формирование заказов и контроль их исполнения. | Количество ТК доступных для включения в план; временные факторы. Ограничения, связанные с безопасностью полета и его целями. |

Каждый из агентов старается добиться заданных целевых установок (идеальных значений показателей) за счет взаимных уступок и не оставляет попыток их улучшить даже тогда, когда промежуточные решения найдены.

Агенты бортовых систем, модулей, портов МКС отвечают за соответствие требованиям МКС и отслеживают свое текущее состояние и состояние грузов. В качестве примера можно привести агентов неснижаемого остатка ресурсов на

борту, создаваемых для топлива, воды, рационов питания и кислорода, и используемых для расчета баланса.

Основные параметры агентов бортовых систем, модулей, портов МКС: вид ресурса (топливо, вода, газ и т.д.); критический уровень ресурса (неснижаемый остаток) на борту МКС; текущая величина остатка ресурса на борту (на указанную дату при текущем плане грузоперевозок и темпах расходования ресурса); желаемая величина наличия на борту МКС; текущая скорость расходования ресурса; текущий план грузоперевозок; признак удовлетворения текущим состоянием (да/нет), если не удовлетворен – инициирует агента заявки на доставку данного вида грузов и очередной раунд переговоров для изменения плана.

Агенты ТК и полетов ТК соответствуют ТК различных типов: ТК «Прогресс», ТК «Союз», ATV, «Спейс Шаттл», Dragon. Они разделяются на две группы: агенты ТК, которые отвечают за соответствие ограничениям ТК, и агенты полетов ТК, которые отвечают за динамические характеристики грузопотока. С каждым ТК может быть связан один агент топлива, один агент воды, один агент газообразных грузов и множество агентов сухих грузов.

Основные параметры агентов ТК: вместимость – с разбивкой по различным категориям, т.е. сколько на ТК можно перевезти топлива, воды, сухих грузов, размеры грузового отсека и пр.; планируемая дата запуска; крайняя возможная дата запуска в случае допустимого переноса старта; планируемая дата стыковки с МКС (т.е. фактической доставки груза); крайняя возможная дата стыковки в случае допустимого переноса старта; признак заполненности (да/нет) – с разбивкой по различным категориям грузов, т.е., когда наступает ситуация, что невозможно размещение одного вида грузов, другие типы грузов еще могут быть размещены; признак удовлетворенности текущим заполнением (да/нет), если не удовлетворен – инициируется очередной раунд переговоров для изменения плана.

Агенты заказов грузов и грузов включают в себя агентов заказов на такие грузы как топливо, вода, газообразные и сухие грузы, а также агентов самих этих грузов. Агенты топлива и воды «умеют» изменять свой объем в заданных границах. Эти границы определяются ограничением по возможной загрузке, а также по

суммарной загрузке (с одной стороны), и требованиями МКС (с другой стороны). Данные требования задаются для агентов топлива и воды на ТК (специальных агентов МКС). Изменение данного объема – событие, приводящее к перепланированию. Для грузов, планируемых к перевозке по заявкам кураторов, создаются соответствующие агенты заявок.

Основные параметры агентов грузов: объем заявки (масса, занимаемый объем на борту ТК); желаемый срок удовлетворения заявки; крайний срок удовлетворения заявки; совместимость с другими видами грузов; срок годности; признак удовлетворения текущим размещением (да/нет), если не удовлетворен – инициирует очередной раунд переговоров для изменения плана.

Агенты экипажа отслеживают свое текущее состояние и состояние грузов для выполнения операций и учета психофизических и медицинских особенностей.

Основные параметры агентов экипажа: ограничение по часам работы; нормы потребления рационов питания, воды, медицинских грузов и т.п.; другие параметры аналогичные агентам бортовых систем; признак удовлетворения текущим состоянием (да/нет), если не удовлетворен – инициирует агента заявки на доставку данного вида грузов и очередной раунд переговоров для изменения плана.

Агенты проектантов и кураторов представляют интересы лиц, вовлеченных в процесс принятия решений, действуют, исходя из базовых стратегий поведения, и позволяют согласовать программу полета и грузопоток.

Агенты проектантов представляют собой главных контролирующих агентов в соответствии со своей зоной ответственности. Цели (в порядке приоритетов): обеспечение наличия на борту МКС в любой планируемый момент времени наличия ресурсов не ниже неснижаемых остатков, минимизация количества требуемых запусков ТК, удовлетворение всех запросов кураторов, максимизация заполнения ТК, максимизация удовлетворения агентов заказов.

Основные параметры агентов проектантов: текущий план программы полета и грузопотока; признак удовлетворения текущим планом (да/нет), если не удовлетворен – инициирует очередной раунд переговоров для изменения плана, в случае необходимости – обращение к оператору для сигнализации о

существующих проблемах, связанных с планом, и, например, с запросом о включении в план дополнительного старта полета ТК.

Агенты кураторов осуществляют контроль за безопасностью станции и выполнения целей полет, а также формируют заказы на доставку грузов.

Основные параметры агентов кураторов: виды заказываемых агентом ресурсов; объем заказываемых в указанный период времени ресурсов, т.е. свой собственный микро-план грузопотока; признак удовлетворения текущим состоянием грузопотока (да/нет), т.е. его соответствием собственному микро-плану перевозок, если не удовлетворен – инициирует агента заявки на планирование определенного вида грузов и очередной раунд переговоров для изменения плана.

Агенты ПВ-сети управления грузопотоком РС МКС осуществляют следующие взаимодействия (рис. 2.3):

1) агент бортовой системы РС МКС, анализируя свое состояние, порождает заявку на доставку груза для обеспечения надежности бортовых систем станции;

2) агент заказа осуществляет запрос в базу знаний и получает технологический процесс исполнения заказа на доставку груза;

3) агент заказа на основе технологического процесса исполнения заказа формирует агентов задач для исполнения заявки на доставку груза;

4) агент груза ведет поиск полета ТК, при этом груз получает активность и быстро размещается на первое свободное место в ТК, но дальше может активироваться ТК, который будет оценивать свое состояние и пытаться его улучшить за счет привлечения недостающих ему грузов;

5) агенты грузов при невозможности размещения на нужном ТК разрешают конфликты между собой через уступки для поиска согласованного решения;

6) агент полета ТК сообщает агентам модулей станции о прибытии груза для его размещения на борту станции;

7) агент модулей станции сообщает агенту бортовой системы о размещении необходимого груза, после чего агенты бортовых систем пересчитывают свое текущее состояние удовлетворенности для обеспечения безопасности и надежности эксплуатации станции.

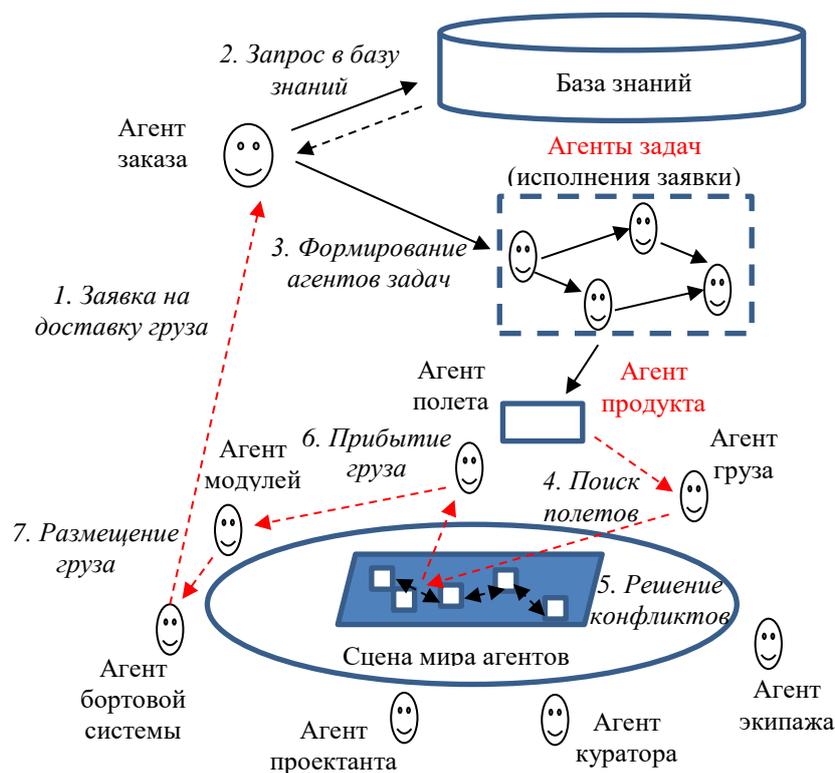


Рисунок 2.3 – Виртуальный мир агентов ПВ-сети РС МКС

В предлагаемой модификации метода сопряженных взаимодействий решение задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС достигается путем выполнения последовательных приближений, от самого грубого, простого и быстро получаемого решения – к более сложным решениям, что важно для оперативной адаптации планов под изменяющиеся условия по событиям в реальном времени. Груз получает активность и быстро размещается на первое свободное место в ТК, но далее может активироваться агент ТК, который будет оценивать свою удовлетворенность и пытаться ее улучшить за счет привлечения других недостающих ему грузов, которые могут далее вытеснить первый груз.

Для оценки состояния агентов и управления балансом интересов всех участников предлагается функция удовлетворенности, пропорциональная разности между идеальным и текущим состоянием, например, любой груз «хочет», чтобы его доставили на борт точно в свой срок с минимальным отклонением от идеального времени доставки. Вводится также функция бонусов и штрафов, позволяющая награждать агентов за продвижение к своему идеалу (и наоборот). В этих целях у агентов имеется виртуальный счет, «деньги» на котором помогают улучшить позицию и дать компенсацию агентам, готовым уступить в конфликте.

Каждый раз при изменении ситуации и появлении нового события меняется постановка задачи и состав агентов (и их параметры), вовлеченных в решение задачи, что приводит к изменению оценочной функции решения задачи, которая обеспечивает баланс интересов всех участников планирования, которые имеют собственные цели, критерии, предпочтения, правила и ограничения (2.12).

При поиске решения должны учитываться различные критерии принятия решения агентами, например, груз при планировании хочет быть доставлен точно в срок, а ТК максимально эффективно загружен, не имея недогруза или перегрузки. Подробнее критерии принятия решения представлены в следующем подразделе.

2.3.3 Ключевые критерии принятия решения

При поиске решения должны учитываться различные критерии принятия решения агентами. Приведем критерии задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС для основных типов агентов предметной области (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Критерии принятия решений

| Агенты | Критерии принятия решений |
|--------------------------------------|--|
| Агенты ТК и полетов ТК | <ul style="list-style-type: none"> – Максимальная длительность полета ТК – план наилучший при 100% длительности полета ТК. – Максимально эффективная загрузка ТК (максимально возможная загрузка грузами ТК, т.е. не имеется недогруза и недопустима перегрузка) – план наилучший при 100% загрузке грузами ТК (2.1). |
| Агенты заказов грузов и грузов | <ul style="list-style-type: none"> – Доставка максимального количества грузов в точно определенное для них время (грузы хотят быть доставлены точно в срок) – план наилучший при 100% доставки всех грузов в нужное время. – Максимально своевременный возврат грузов на Землю на ТПК «Союз» – план наилучший при 100% возврате всех грузов в нужное время. – Максимально своевременная утилизация грузов на ТК «Прогресс» – план наилучший при 100% утилизации всех грузов в нужное время (2.2). |
| Агенты портов МКС | <ul style="list-style-type: none"> – Максимальное обеспечение стыковки различных типов ТК к предпочтительным портам станции – план наилучший при 100% обеспечении стыковки различных типов ТК к предпочтительным портам станции (2.3). |
| Агенты бортовых систем и модулей МКС | <ul style="list-style-type: none"> – Максимальное поддержание на борту станции требуемых расходуемых ресурсов (запасов топлива, воды, воздуха, продуктов питания, запасных частей и т.п.) для обеспечения надежности – план наилучший при 100% наличии необходимых запасов ресурсов на борту станции. – Максимальное обеспечение допустимого размещения грузов на станции в закрепленных для различных типов грузов зонах – план наилучший при 100% размещении различных типов грузов в специально закрепленных для них зонах (2.4). |

Критерии принятия решений агентами могут быть описаны формулами, правилами, таблицы, графики и т.п. Могут быть в любое время добавлены и другие критерии принятия решения агентами в зависимости от изменяющихся условий.

Далее представлен способ описания критериев принятия решений агентами на основе оценочных функций удовлетворенности.

2.3.4 Оценочные функции удовлетворенности агентов

Для того, чтобы обеспечить гибкое планирование по событиям, предлагается описывать удовлетворённость агентов в виде кусочно-линейной функции удовлетворенности, которая может иметь различный вид, где максимальной удовлетворенность агента является при совпадении текущего значения с идеальным значением, и уменьшается при удалении текущего значения от идеального значения. Например, рассмотрим функцию удовлетворенности для двух критериев «Длительность» полета ТК и «Время доставки» груза.

Критерий «Длительность» полета ТК

Каждый полет ТК имеет свою длительность. Предлагается ввести функцию удовлетворенности времени $f(\tau)$ отклонения от заданной длительности полета ТК.

1. Если длительность полета ТК является фиксированной и не может меняться, то функция удовлетворенности имеет максимальное значение $f(\tau) = 1$ при определенной фиксированной длительности τ_0 суток, в остальных случаях она равна 0. Для упрощения описания агентов из-за округлений имеет смысл задавать функцию в прямоугольном виде с минимальным временным интервалом (рис. 2.4).

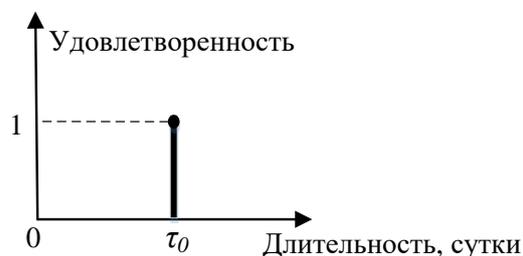


Рисунок 2.4 – Функция удовлетворенности при фиксированной длительности

2. Если длительность полета ТК может изменяться в некоторых пределах, сокращаться на τ_1 или увеличиваться на τ_2 , то функция удовлетворенности в диапазоне от τ_0 до τ_1 или от τ_0 до τ_2 будет равна 1, вне этого диапазона равна 0. Это

возможно, когда изменение длительности полета ТК в рамках диапазона не критично (рис. 2.5).

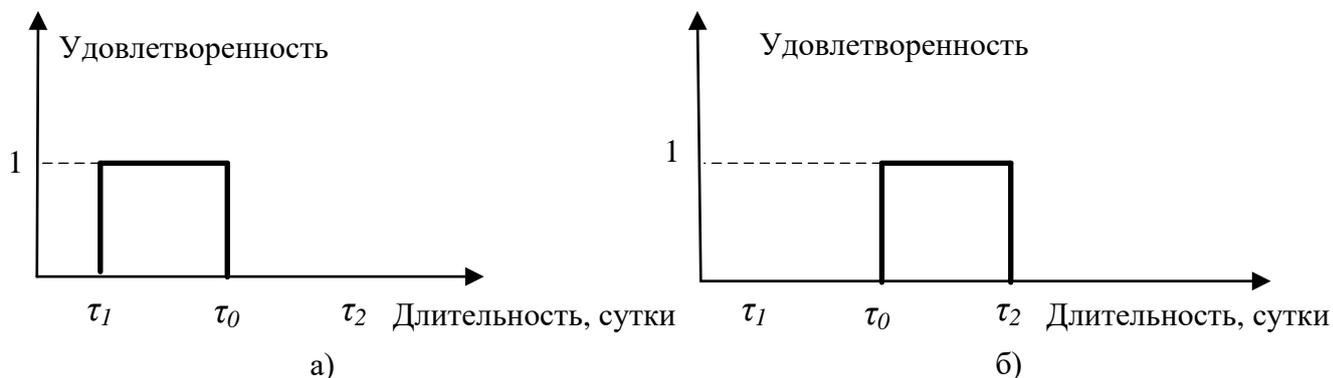


Рисунок 2.5 – Функция удовлетворенности максимальная и не меняется в заданном диапазоне:

а) длительность полета ТК можно уменьшить; б) длительность полета ТК можно увеличить

3. Если длительность полета ТК является фиксированной τ_0 и может изменяться только в одну сторону, сокращаться до τ_1 или увеличиваться до τ_2 плавно, то значение функции удовлетворенности в этих пределах уменьшается линейно от 1 до 0. Идеальным считается случай, когда длительность является фиксированной, т.е. при длительности τ_0 функция удовлетворенности $f(\tau) = 1$. При увеличении длительности полета ТК до τ_1 или уменьшении до τ_2 , функция удовлетворенности будет плавно падать до 0 (рис. 2.6).

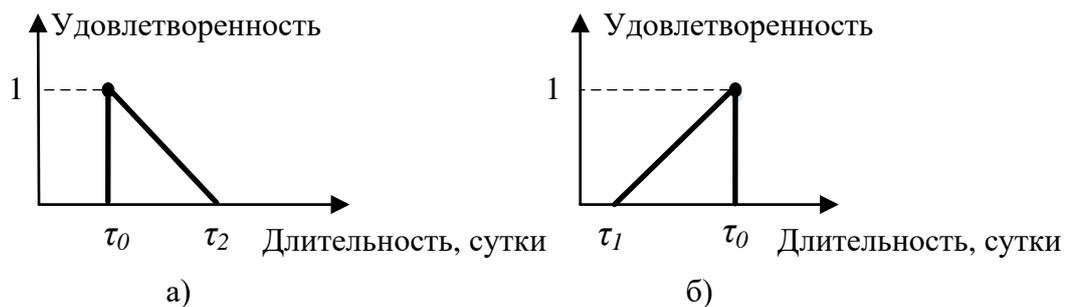


Рисунок 2.6 – Функция удовлетворенности уменьшается в заданном диапазоне:

а) при увеличении длительности полета ТК; б) при уменьшении длительности полета ТК

4. Возможны случаи, когда при описании функции удовлетворенности длительности полета ТК комбинируют ситуации, описанные выше, пример таких функций удовлетворенности представлен на рис. 2.7 и рис. 2.8.

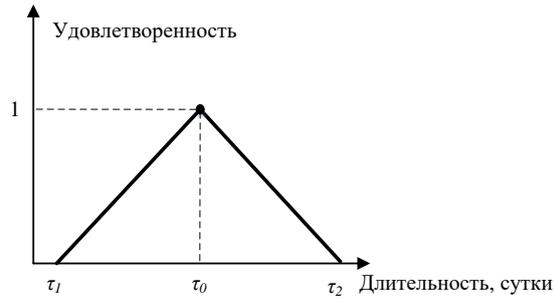


Рисунок 2.7 – Функция удовлетворенности: нежелательно, но возможно, как сокращение, так и увеличение длительности полета ТК

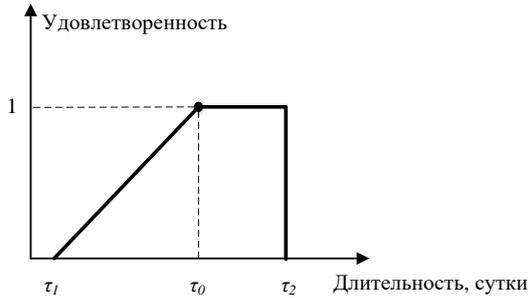


Рисунок 2.8 – Функция удовлетворенности: не желательно, но возможно сокращение длительности полета ТК. Увеличить длительность полета ТК можно без потерь до τ_2

Представленные функции удовлетворенности для каждого полета ТК будут настраиваться в сцене по заложенным в онтологию правилам (рис. 2.9).

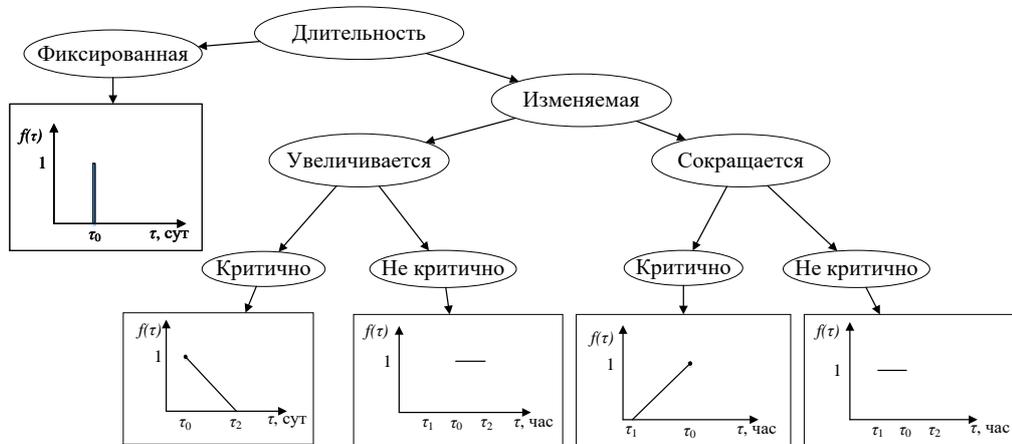


Рисунок 2.9 – Фрагмент онтологии описания правил длительности полетов ТК

Для каждого полета ТК будет определяться общая функция удовлетворенности путем сложения функций удовлетворенности по разным критериям с различными весовыми коэффициентами, которые настраиваются в зависимости от изменяемых в различных полетных ситуациях приоритетов. В случае, если функция удовлетворенности полета ТК меньше допустимого значения или не выполняются правила и ограничения, этот полет ТК будет подсвечен в программе полета, а его агент будет пытаться улучшить свое состояние.

Критерий «Время доставки» груза

Одним из самых важных критериев при распределении грузов по полетам ТК является время доставки груза на станцию. Для данного критерия предлагается ввести функцию удовлетворенности $f(t)$ отклонения от заданного времени доставки груза на станцию, при чем для разных грузов она может отличаться.

1. Если время отправки груза является четко определенным и не может меняться вне зависимости от обстоятельств, то функция удовлетворенности будет принимать значение 1 в случае, когда время доставки груза попадает в узкий диапазон времени около фиксированного значения, и 0 во всех остальных случаях. Для упрощения описания агентов из-за округлений имеет смысл задавать функцию в прямоугольном виде с минимальным временным интервалом (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Функция удовлетворенности при фиксированном времени доставки груза

2. Если доставка груза на станцию может быть осуществлена в любое время и время доставки не является критичным, то функция удовлетворенности будет равна 1 на всем горизонте планирования (рис. 2.11).

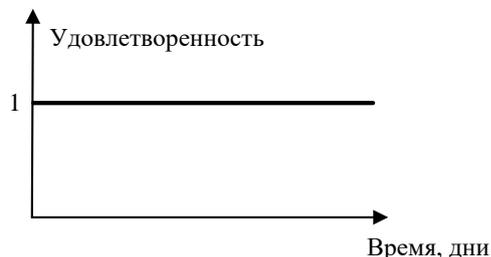


Рисунок 2.11 – Функция удовлетворенности при произвольном времени доставки груза

3. Если время доставки груза на станцию имеет наиболее предпочтительное время t_0 , а планирование на более раннее или более позднее время возможно и, смещая сроки доставки до t_1 или до t_2 , удовлетворенность будет плавно снижаться от 1 до 0, то функция удовлетворенности будет иметь треугольную форму, где

$f(t_0) = 1$, а $f(t_1) = 0$ и $f(t_2) = 0$. При этом выход из диапазона времени $[t_1, t_2]$ не допустим (рис. 2.12).

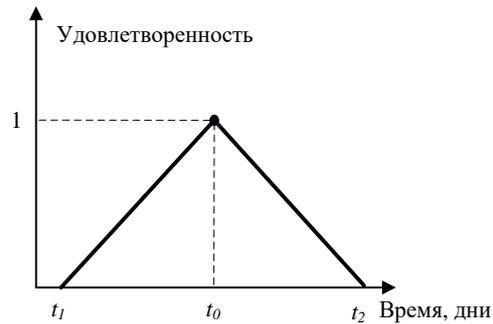


Рисунок 2.12 – Функция удовлетворенности плавно снижается в заданном диапазоне

4. Функция удовлетворенности времени доставки груза может принимать и более сложные формы в зависимости от текущей ситуации. Например, функция удовлетворенности может иметь сложный вид, если время доставки груза не может быть запланировано раньше времени t_0 , время доставки груза в диапазоне времени $[t_0, t_1]$ может быть любым, а в диапазоне времени $[t_1, t_2]$ планирование доставки возможно, но удовлетворенность будет уменьшаться (рис. 2.13).

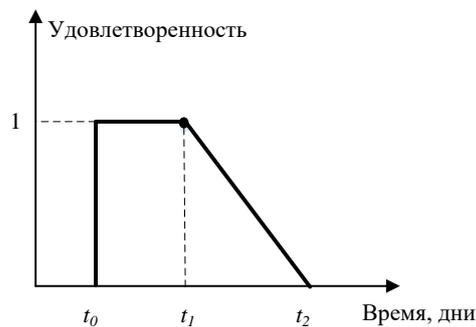


Рисунок 2.13 – Функция удовлетворенности сложной формы

Представленные функции удовлетворённости для каждого груза будут настраиваться в сцене по заложенным в онтологию правилам (рис. 2.14).

Для каждого груза будет определяться общая функция удовлетворенности путем сложения функций удовлетворенности по разным критериям с различными весовыми коэффициентами, которые настраиваются в зависимости от изменяемых в различных полетных ситуациях приоритетов. В случае, если функция удовлетворенности груза меньше допустимого значения или не выполняются правила и ограничения, этот груз будет подсвечен в побочном грузопотоке, а его агент будет пытаться улучшить свое состояние.

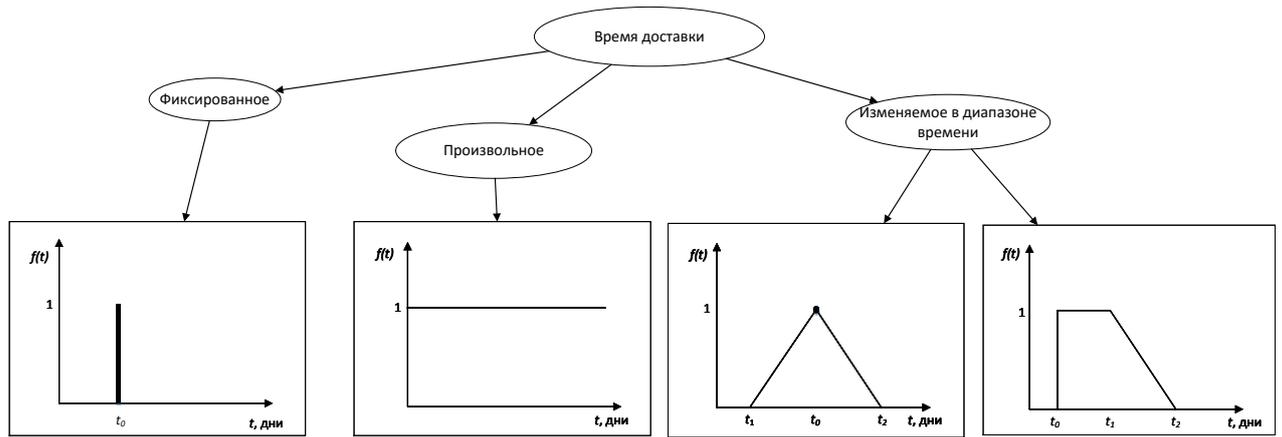


Рисунок 2.14 – Онтологии описания правил времени доставки грузов

Аналогичные функции удовлетворенности таким же образом строятся для всех типов агентов и их критериев принятия решений.

Рассмотрим далее более подробно общую схему работы модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока РС МКС.

2.3.5 Общая схема работы модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока РС МКС

Модифицированный метод сопряженных взаимодействий отражает особенности планирования грузопотока РС МКС и приоритеты основных типов грузов, включая топливо, воду и воздух, продовольствие, НА и другие грузы, каждый из которых имеет свои отсеки для размещения. Основное отличие модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока РС МКС состоит в том, что предварительное планирование происходит один раз в год, а далее только по событиям (нештатные ситуации, внеплановые корректировки орбит и т.п.) происходит разбор конфликтов для размещения грузов и перестроения всех планов. После разбора конфликтов проводятся попытки улучшить положение агентов (рис. 2.15).

Пусть в некотором промежуточном состоянии имеется программа полета и построен план грузопотока, в котором для всех грузов заданы их типы и массы, а также определены сроки доставки.

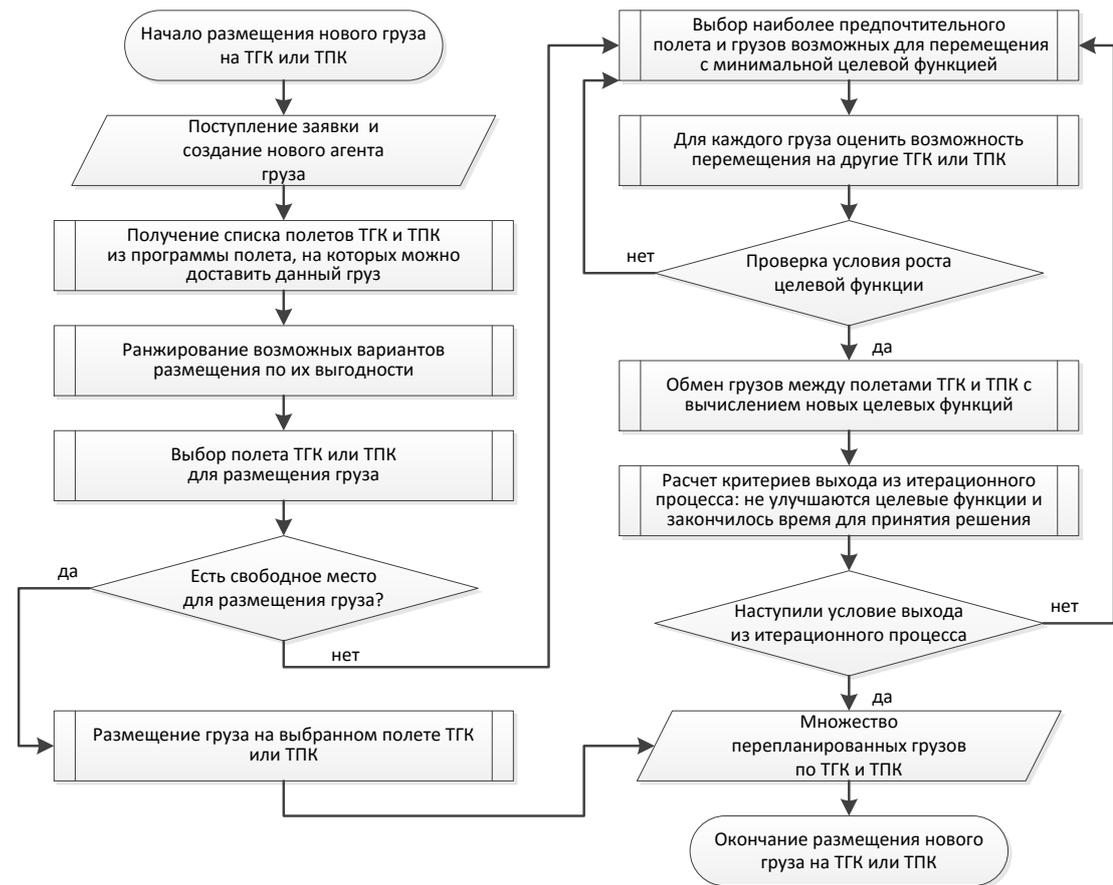


Рисунок 2.15 – Блок-схема модифицированного метода сопряженных взаимодействий для планирования грузопотока РС МКС

При поступлении новой заявки на размещение груза используется следующий протокол [128]:

- 1) по заявке инициируется создание нового агента груза;
- 2) агент нового груза опрашивает агентов полетов ТК, включенных в программу полета, относительно принципиальной возможности размещения в рамках данного полета ТК, и получает от них ответы;
- 3) агент нового груза анализирует и ранжирует возможные варианты по их выгоды для себя (оценка осуществляется по степени соответствия требованиям нового груза, упорядоченным по выгоды);
- 4) если свободного места на выбранном грузом полете ТК достаточно для размещения (груз проходит по весу и объемам), доставка данного груза включается в план грузопотока;
- 5) если свободного места нет, начинаются переговоры по разбору конфликта и поиску его разрешения путем перемещения непосредственно конфликтующих

грузов между полетами ТК, а также тех, кто вовлекается в конфликты далее, причем используются протоколы разрешения конфликтов, связанные с обменами грузов между полетами ТК, вытеснением грузов на другой полет ТК или из грузопотока, а также, при необходимости, со сдвигами времени полетов ТК;

б) порядок активации агентов зависит от приоритетов типов грузов и ситуации, складывающейся в ПВ-сети;

7) каждый агент на этапе разбора конфликтов для улучшения планов делает попытку улучшить свое размещение для повышения удовлетворенности;

8) работа метода в любом из протоколов завершается, когда ни один агент более не может улучшить ситуацию, решение несущественно улучшается в пределах заданного порога, или закончилось время для планирования.

Получаемая ПВ-сеть представляет собой пример самоорганизующейся МАС, формирующей планы доставки грузов, а также адаптирующей свое поведение под действием событий, возникающих в реальном времени.

Таким образом, в создаваемой МАС предлагается все множество заявок, грузов, ТК и полетов ТК, бортовых систем, модулей и портов станции, членов экипажа представлять ПВ-сетью, которая образует собой самоорганизующиеся планы грузопотока РС МКС. Возникновение любого нового события запускает адаптивную перестройку связей агентов, которая заканчивается нахождением баланса интересов агентов, когда ни один агент не может более улучшить ситуацию. После этого предложенное решение выдается пользователям на согласование, доработку и окончательное утверждение, что требует создания единого информационно-коммуникационного пространства для поддержки интерактивного он-лайн взаимодействия команд проектантов и кураторов.

Для поиска согласованных решений агенты, взаимодействуя между собой, используют специальные протоколы обмена сообщениями.

2.3.6 Протокол взаимодействия агентов для построения программы полета и грузопотока РС МКС

Переговоры агентов между собой являются важнейшим способом формирования и согласования принимаемых ими решений. В ходе переговоров

агенты координируют свои действия и договариваются о совершении сделок. В рассматриваемом случае модифицированный метод сопряженных взаимодействий для построения грузопотока дает представление о структуре протоколов, используемых для переговоров агентов и поиска согласованных решений. В ходе переговоров предложение принимается, если только обе стороны согласны.

Переговоры агентов состоят из актов коммуникаций следующих типов: Запрос на предоставление услуги (размещение груза), Ответ по возможности предоставить услугу с оценкой цены (стоимости размещения), Ответ отказ с мотивировкой, Подтверждение заключить контракт, Встречное предложение, Дополнительное предложение, Предложение разорвать контракт, Подтверждение, что контракт выполнен и т.д.

Важно отметить, что при приходе новой заявки на доставку груза переговоры могут приводить к тому, что старые грузы, ранее размещенные на ТК, будут уступать свои позиции новому грузу, но это будет только в том случае иметь место, если новый груз компенсирует ухудшение положения ранее размещенным грузам, т.е. для общего решения в целом это будет глобально выгодным, поскольку сумма всех улучшений будет больше суммы всех ухудшений.

Когда приходит новая заявка на доставку груза, и его агент пытается «растолкать» на лучшем для себя полете ТК другие грузы и они, в свою очередь, «расталкивают» другие грузы на других ТК, базовая сцена не меняется полностью, а меняется сцена-штрих, в которой определяется разница по локальным показателям агентов и глобальному системы. Таким образом, в ходе переговоров глобальный показатель системы пересчитывается адаптивно и лишь частично, без полного пересчета и перебора всех возможных вариантов, что и позволяет оценить влияние события на все показатели.

Протокол взаимодействия агентов для изменения текущего плана грузопотока при размещении нового груза на свободный полет ТК и последующей стадии разрешения конфликтов в случае отсутствия свободного требуемого полета ТК, а также дальнейшего улучшения показателей общего плана размещения грузов представлен на рис. 2.16.

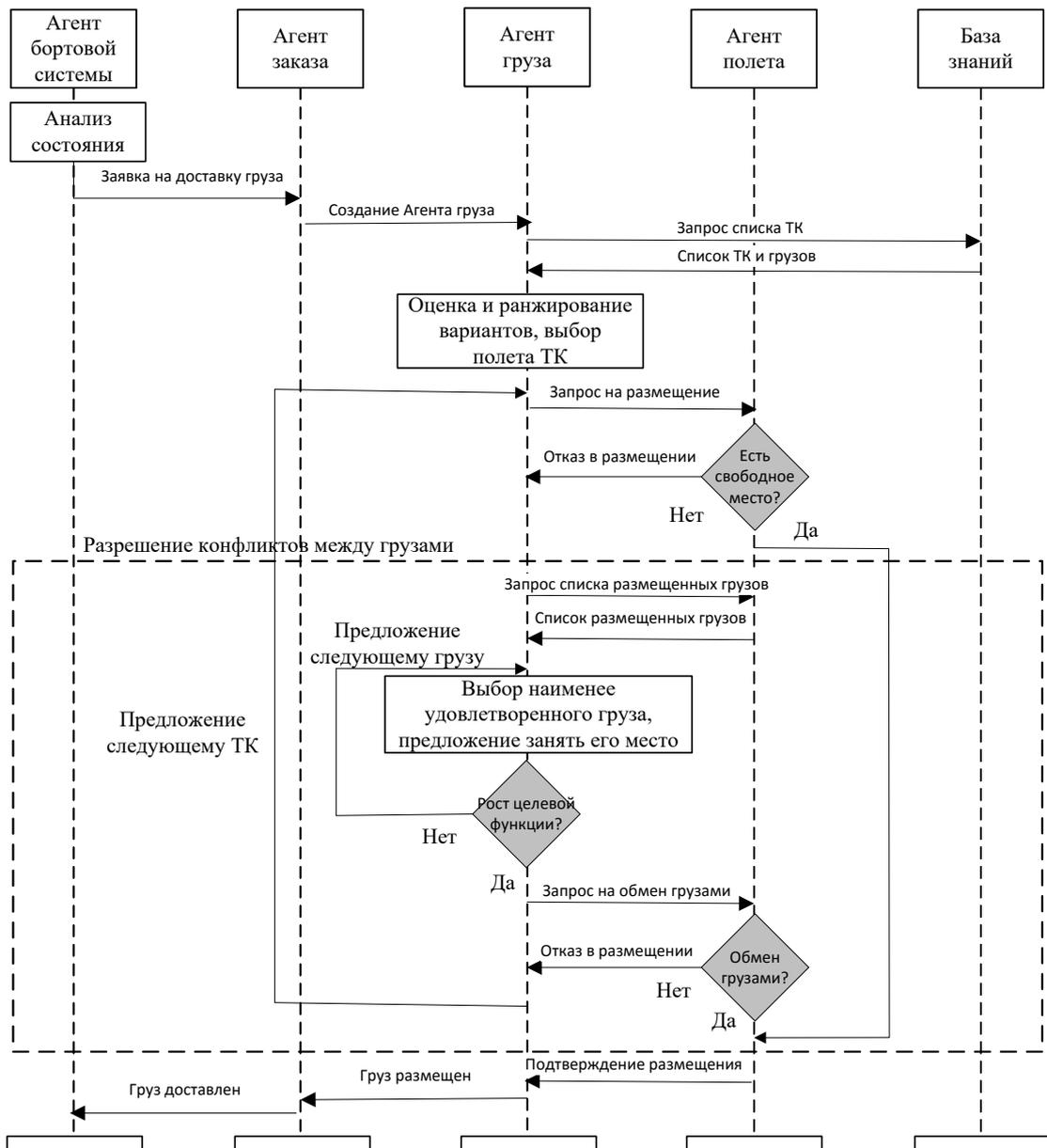


Рисунок 2.16 – Фрагмент протокола взаимодействия агентов

Подробный пример работы модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока с упрощенной постановкой задачи для простоты восприятия рассмотрен в Приложении А.

Важным достоинством разработанного модифицированного метода сопряженных взаимодействия для построения грузопотока РС МКС является возможность онтологической настройки индивидуальных параметров агентов и особенностей планирования. Применение онтологического подхода для управления грузопотоком описано в следующем разделе.

2.4 Онтология управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования

2.4.1 Основные понятия и особенности применения онтологий для описания предметной области

Знания о предметной области имеют ключевое значение для принятия решений агентами при управлении ресурсами.

Один из возможных подходов для создания универсальной МАС, легко настраиваемой под особенности различных предметных областей, связан с созданием баз знаний на основе онтологий, представленных семантическими сетями понятий и отношений предметной области [130, 131].

Понятие «онтология» получило активное развитие в последнее время в связи с развитием направления семантического Интернета (Semantic Web), целью которого является представление информации о содержании Интернет-страниц в виде, пригодном для компьютерной обработки. В настоящее время страницы «не знают», что именно в них содержится, что делает смысловой поиск очень ограниченным и тем более не дает возможности программам рассуждать о содержимом или поддерживать диалог с пользователем.

База знаний содержит знания о предметной области, классы понятий и отношений, а также факты, касающиеся экземпляров этих понятий и отношений, необходимые агентам для выработки, принятия и согласования решений. Онтология – часть базы знаний, содержащая сеть понятий. Классы объектов – это узлы, а отношения – связи между ними, вместе со свойствами, атрибутами и сценариями содержат все знания, требуемые для работы МАС.

Цели создания онтологий разнообразны и могут включать следующие: нормативная – унификация понятий и отношений предметной области; формирование электронного «толкового словаря» предметной области; автоматические рассуждения на основе знаний предметной области; автоматический контроль правильности входных данных; поддержка деятельности по накоплению, разделению и повторному использованию знаний предметной области (предприятия); построение самообучающихся МАС за счет того, что

знания отделены от программного кода; интеграция междисциплинарных знаний различных пользователей.

Для создания модели представления знаний, изначально рассчитанной на описание процессов (действий) пользователей, была предложена концептуальная модель мира предметной области, базирующаяся на идеях Аристотеля.

Предлагаемая базовая модель мира позволяет описывать не только декларативные знания о предметной области, понятия и сущности «мира», но и процедурные знания, деятельную компоненту, представляющую сценарии действий над объектами, выражающими законы мира, свойства и функции объектов, а также действия субъекта над объектами мира. Кроме того, модель мира всегда предполагает наличие некоторой модели пространства и времени, в рамках которой существуют и взаимодействуют все объекты мира.

Мета-онтология содержит определения ключевых понятия и является общей для всех предметных миров (физических и абстрактных) – для данной модели она включает следующие понятия [116]: «объекты» – сущности, характеризующиеся свойствами; «свойства» – отражают способность объектов вступать во взаимодействия; «процессы» – цепочки действий по изменению состояний объектов; «отношения» – позволяют связывать объекты и конструировать сложные объекты из простых; «атрибуты» – характеризуют состояния объектов.

Конечной целью создания и использования онтологии является обеспечение поддержки деятельности по накоплению, разделению и повторному использованию знаний рассматриваемой предметной области.

Таким образом, онтология является основой для построения концептуальных моделей сложных технических объектов и моделей ситуаций, задаваемых на вход виртуального мира МАС, и используется для настройки критериев, предпочтений и ограничений, на основе которых осуществляется принятие решений при планировании.

Далее проведем обзор существующих инструментальных средств для построения онтологий и баз знаний.

2.4.2 Обзор инструментальных средств для построения онтологий

С помощью современных инструментов инженерии онтологий можно строить базы знаний. Эти инструментальные средства выполняют поддержку документирования, импорта и экспорта онтологий разных форматов и языков, графического редактирования, управления библиотеками онтологий и т.д. Наиболее популярными инструментами являются [132]:

1. Protégé – локальная Java программа, предназначенная для построения (создания, редактирования и просмотра) онтологических моделей прикладной области. Protégé включает редактор онтологий, позволяющий проектировать онтологии, разворачивая иерархическую структуру абстрактных или конкретных классов и слотов. Структура онтологии аналогична иерархической структуре каталога. Первые версии Protégé основывались на фреймовой модели представления знания ОКВС (Open Knowledge Base Connectivity), в основе последних современных версий Protégé лежат семантические сети.

2. OntoEdit – автономное Java-приложение, которое выполняет проверку, просмотр, кодирование и модификацию онтологий. К достоинствам инструмента можно отнести удобство использования, разработку онтологии под руководством методологии с помощью процесса логического вывода, разработку аксиом, структуру, расширяемую посредством плагинов, хорошую документацию.

3. OilEd – автономный графический редактор онтологий. Инструмент основан на языке OIL (OSEK Implementation Language), в перспективе – адаптация для OWL (Web Ontology Language), который сочетает в себе фреймовую структуру и выразительность дескриптивной логики с сервисами рассуждения, что обеспечивает понятный и интуитивный стиль интерфейса пользователя, а также преимущества поддержки рассуждений (обнаружение логически противоречивых классов и скрытых отношений подкласса). Из недостатков можно выделить отсутствие поддержки экземпляров.

4. WebOnto – для моделирования онтологий использует язык OCML (Operational Conceptual Modeling Language). В WebOnto пользователь может графически создавать структуры, включая классы с множественным

наследованием. Инструмент проверяет вновь вводимые данные с помощью контроля целостности кода OSM. Инструмент имеет ряд полезных возможностей: сохранение структурных диаграмм, отдельный просмотр отношений, классов, правил, совместную работу нескольких пользователей над онтологией, использование диаграмм, функций передачи и приёма и др.

Несмотря на описанные выше преимущества различных существующих программных инструментов для работы с онтологиями, все они обладают одним серьезным недостатком: ни один из них не позволяет использовать «модель мира», которая может позволять строить и исполнять различные предметные миры деятельности на основе мета-онтологии «модели Аристотеля». Данная модель предлагается как наиболее адекватная для описания сложных разнородных предметных областей, поэтому был разработан подход к построению онтологий предметных областей на основе модели мира Аристотеля и новый инструмент, реализующий данный подход и позволяющий создавать онтологии деятельности, используя основные понятия «модели Аристотеля», а также методы и алгоритмы визуализации данных, упрощающие работу и восприятие создаваемой онтологии.

Для реализации необходимых особенностей при создании и управлении базами знаний, используемых в мультиагентной системе поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС, был разработан конструктор онтологий, моделей и сцен, реализующий предлагаемую модель мира.

2.4.3 Конструктор онтологий, моделей и сцен

Для создания онтологии управления грузопотоком РС МКС предлагается использовать конструктор онтологий, моделей и сцен (конструктор онтологий), который по сути является конструктором виртуальных миров, позволяющим пользователям построить модель предметной области и концептуальную модель РС МКС, описать исходную ситуацию, создать ручную или автоматически сценарий действий или рассуждений и исполнить его по шагам, моделируя поведение агентов для достижения результатов.

Конструктор онтологий представляет собой комплекс инструментальных средств для управления онтологиями, моделями, сценами и агентами, на основе которых строятся интеллектуальные системы управления ресурсами.

В конструкторе онтологий для удобства построения различных элементов концептуальной модели выделяются три уровня описания предметной области: «онтология» – «модель» – «ситуация (сцена)» [116]:

- онтология – описывает понятия и отношения (подобно толковому словарю), необходимые для описания знаний в любой предметной области, на основе онтологии в дальнейшем строится модель деятельности;

- модель – описывает устойчивые конфигурации объектов, упрощающие создание формализованных описаний сцен в конкретных ситуациях, например, не следует каждый раз описывать конфигурацию МКС, достаточно сохранять эти сведения в модели для дальнейшего использования;

- ситуация (сцена) – описывает экземпляры понятий и отношений в заданный момент времени (набор фактов), сцена подобна мгновенной «фотографии» ситуации в заданный момент времени.

Конструктор онтологий предоставляет следующие основные функциональные возможности для работы с онтологией, моделью и сценой:

- проектирование онтологии в виде семантических сетей, создание онтологии, специфицируя понятия (классы) и устанавливая связи между ними;

- описание сценариев действий помимо описания декларативной части;

- при выборе любого понятия получение его параметров и всех связей, добавление нового свойства или установление нового отношения;

- при выборе объекта получение атрибутов и всего списка действий над ним;

- при выборе действия получение всего списка объектов, над которыми оно может выполняться, и набора изменяемых им атрибутов;

- задание в дескрипторе сценария действия цели, кто именно может являться субъектом действия, какие знания и инструменты применяются при его реализации, каковы условия этого применения и результаты действия;

- создание сцены, набора экземпляров классов и отношений, описывающих некоторую ситуацию в мире и работа с ними. Каждый из экземпляров набора связан с некоторым понятием онтологии отношением вид-род;

- осуществление навигации по семантическим сетям онтологий и сцен (получение связанных сущностей, проверка наличия пути и т.д.), при этом функции по навигации доступны как разработчикам с помощью программного интерфейса приложения (API), так и в методах понятий;

- хранение онтологии и сцены в реляционной базе данных, либо в XML хранилище, импорт/экспорт онтологий в XML.

Возможности созданного конструктора онтологий позволяют описывать предметную область не только программисту или инженеру по знаниям, но и любому рядовому пользователю, не являющемуся программистом.

МАС поддержки принятия решения проектируется способной искать решение в рамках описанной в конструкторе онтологий модели предметной области. Рассмотрим далее применение данного подхода построения предметных онтологий деятельности для управления грузопотоком РС МКС.

2.4.4 Применение онтологии для управления грузопотоком РС МКС

Для управления работой агентов при построении грузопотока РС МКС знания предметной области были формализованы в онтологии, которая предназначена для учета индивидуальных особенностей кораблей и грузов.

Онтология управления грузопотоком является средством связи между специалистами различных групп управления, специалистами и системами различных групп управления. Применение онтологий, описывающих сложную систему управления в целом, способствует повышению уровня оперативности, согласованности и эффективности принимаемых решений. Онтология позволяет накапливать, структурировать, обрабатывать и использовать знания, выступая в роли библиотеки, где знания представлены в единой форме, становятся доступными специалистам различных групп управления и можно найти не только необходимую информацию, но и ее источник, экономя трудозатраты на поиск.

Формализованное представление знаний при управлении МКС в форме онтологий предоставляет следующие возможности: приведение терминологии различных групп специалистов управления полетом, инженеров и экипажа МКС к единой системе понятий для обеспечения единого толкования и взаимопонимания между различными специалистами; использование онтологии в качестве универсальной «энциклопедии» РС МКС, интегрирующей знания специалистов различных групп управления; моделирование различных ситуаций, возникающих при управлении полетом РС МКС, например, используемых для поддержки принятия решений; создание на основе общей онтологии МАС, не требующей при введении новых фактов и изменений в предметной области полного перепрограммирования; освоение специалистами новой информации с помощью онтологии для увеличения уровня их квалификации и профессиональной подготовки; выявление недостающих логических связей при построении онтологии; поддержка согласованной работы и координации планов в реальном времени, оптимизация ресурсов и взаимодействие подсистем групп управления.

В основе построения МАС лежит онтология мира МКС (концептуальная модель МКС), которая описывает различные виды знаний: возможный структурный состав МКС и КА (бортовые системы и элементы, комплекс целевых нагрузок); возможные функциональные связи между подсистемами МКС; возможное пространственное размещение устройств и узлов; правила полета, полетные процедуры и бортовые инструкции; действия космонавтов, специалистов ЦУП, проектантов и кураторов; возможные действия с устройствами, ресурсами, инструментами и материалами для проведения обслуживания и парирования нештатных ситуации; подготовку и проведение НПИ; организационную структуру организации; программу полета и грузопоток; другие важные зависимости для принятия решений.

На основе онтологии управления грузопотоком РС МКС могут быть описаны сведения о модулях и бортовых системах МКС, полетах ТК, грузов и космонавтах, а также об операциях и другие сведения (рис. 2.17).

Использование онтологии позволяет, например, ввести понятие нового типа ТК Dragon в ходе работы системы (без перепрограммирования), описав через соответствующий класс объекта параметры ТК, а через специальное отношение – к какому порту может стыковаться ТК, без дополнительного перепрограммирования МАС.

Рассмотрим далее отдельные элементы онтологии управления грузопотоком РС МКС, в частности онтологию конфигурации КА и онтологию построения грузопотока и их применения для планирования, в результате которого формируется программы полета и грузопоток РС МКС.

2.4.5 Онтология конфигурации космических аппаратов

Все возможные конфигурации МКС и ТК с состояниями объектов (физическая структура, бортовые системы, оборудование и т.д.) описываются в онтологии конфигурации КА. В онтологию вносятся базовые концепты, описывающие предметную область, например, объекты – «корабль», «люк», «отсек», «космонавт», «груз»; отношения – «стыкует», «входит в»; свойства – «имеет объем», «может гореть»; процессы – «перемещение», «разгрузка» и т.д. Фрагмент онтологии конфигурации МКС в качестве объектов содержит МКС и ее основные составные модули. Все модули связаны с МКС логическим отношением «Входит в», а между собой – отношением «Стыкуется с» (рис. 2.18).

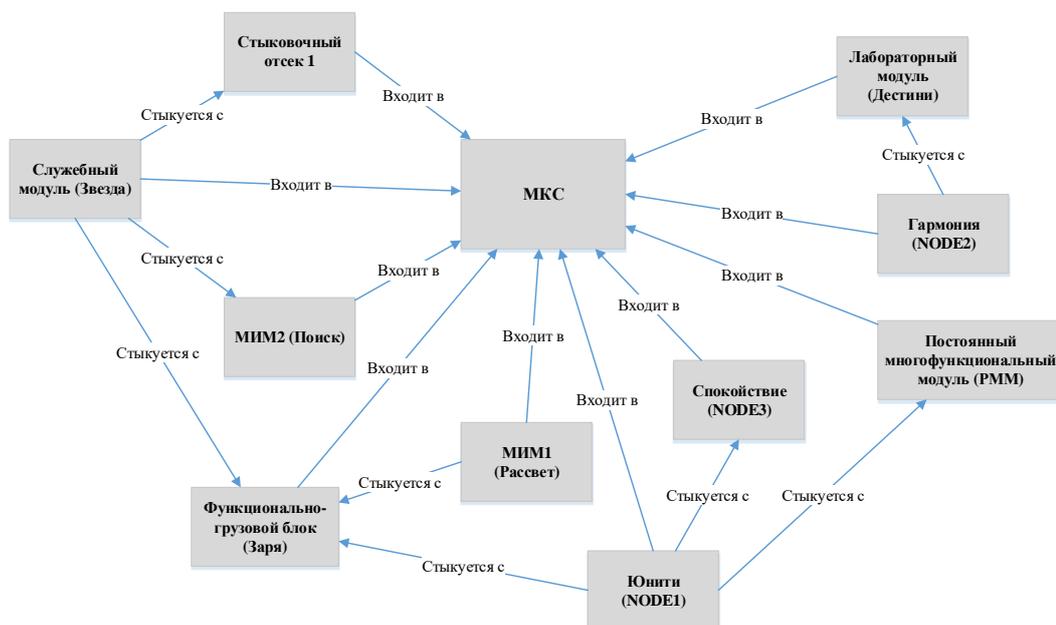


Рисунок 2.18 – Фрагмент онтологии конфигурации МКС

Онтология конфигурации КА формирует базис для описания предметной области планирования и содержит основные концепты, отношения между ними и атрибуты. Онтология конфигурации КА содержит классы концептов, а экземпляры объектов ссылаются на родительские концепты и наследуют от них все имеющиеся атрибуты и отношения. Выделены следующие основные классы концептов [133]:

– Экспедиция – концепт, определяющий условия начала новой экспедиции на МКС. Данный концепт связан отношениями «Зависит» с типами ТК, способными к транспортировке космонавтов, например, ТПК «Союз».

– Экипаж – концепт, связанный отношениями «Состоит из» с концептами класса «Космонавт».

– Космонавт – класс концептов для описания космонавтов и астронавтов, имеющих отношения с концептами «Страна» и «Организация».

– Операции космонавтов РС – концепты категорий операций космонавтов, учитываемых при расчёте рабочего времени экипажа, включая операции при стыковке ТК, внекорабельной деятельности (ВнеКД) и др.

– Тип ВнеКД – концепты различных типов ВнеКД, в зависимости от точки выхода космонавтов на внешнюю поверхность МКС.

– Этап конфигурации МКС – концепты различных этапов сборки, на каждом из которых МКС имела различную конфигурацию.

– Полёт – концепты для различных типов полётов ТК: полётов со стыковкой к МКС, либо автономных полётов без стыковки.

– Операции – категории полётных операций РС МКС, включает такие концепты как «Стыковка», «Отстыковка», «ВнеКД», «Коррекция орбиты» и др. Каждый концепт обладает различным набором отношений, так, например, концепт «Перестыковка» имеет отношения «От» и «К» с концептом «Порт МКС», а концепт «ВнеКД» связан отношениями «Требует» и «Зависит» с концептом «Космонавт».

– Сегмент МКС – концепты «РС» и «АС» описывают разграничение сфер ответственности между обслуживающими МКС странами. Сегменты связаны отношениями «Состоит из» с концептами модулей МКС.

– Модуль – описывает концепты различных модулей МКС, таких как служебный модуль и функционально-грузовой блок. Модули связаны отношениями «Имеет» с концептами класса «Порт МКС».

– Порт МКС – концепты стыковочных портов модулей МКС. Порты обладают атрибутами «Дата стыковки» и «Порядок», которые характеризуют даты и этапы сборки конфигурации МКС.

– Бак – отношение с данным концептом характеризует наличие у ТК баков для доставки жидких грузов. Концепт обладает атрибутами «Вместимость» и «Использовать для утилизации» (значение данного атрибута определяет, могут ли при планировании утилизации на указанном ТК утилизироваться жидкие отходы).

– Отсек – концепты, описывающие отсеки для сухих грузов различных типов ТК. Аналогично бакам для жидких грузов, концепты отсеков обладают атрибутами «Вместимость» и «Использовать для утилизации».

– Двигатель – класс концептов двигателей МКС и пристыкованных к станции ТК, участвующих в операциях стыковки, отстыковки и коррекции орбиты.

– Транспортный корабль – основные концепты, отношения и значения атрибутов которых определяют условия планирования.

Рассмотрим подробнее атрибуты и отношения концепта «Транспортный корабль», экземпляры (отдельные ТК) которого играют основную роль при формировании планов. Отношения «Баки» и «Отсеки» связывают экземпляр ТК с экземплярами отсеков и баков, характеризуя возможности ТК по доставке, спуску и утилизации сухих и жидких грузов. Количество космонавтов на борту ТК указывается атрибутом «Количество человек для перевозки».

О возможности использования ТК для различных операций свидетельствуют атрибуты вида «Использовать для построения плана доставки», «Использовать для утилизации» и т.п. Максимальная и допустимая вместимость топлива и полезной нагрузки характеризуется атрибутами «Полезный груз», «Максимальный объём топлива в рамках полезного груза», «Минимальный объём топлива» и «Минимальный запас топлива для выполнения манёвров». Атрибут «Очередность

использования бака ТК» указывает, в каком порядке выполняется расход воды и топлива из баков при наличии нескольких пристыкованных ТК.

2.4.6 Использование онтологии конфигурации космических аппаратов при планировании программы полета

В процессе согласования программы полета агент порта предоставляет агентам стыковок, порождаемых агентами модулей МКС, информацию о свободных интервалах времени для стыковки на портах или информацию о том, какой ТК занял интересующий их интервал времени. Концепты типов ТК имеют отношения «Лучше стыковать» и «Хуже стыковать» со стыковочными портами, определяющие возможность и приоритеты стыковок к различным портам МКС. Агент полета ТК предоставляет агентам стыковок интервалы времени, которые они могут занять. При этом учитываются атрибуты минимальных интервалов времени между стартами, стыковками и отстыковками ТК, как на одном, так и на нескольких стыковочных портах. Агент полета ТК создает и контролирует агентов своих стыковок и устанавливает для них правила планирования на основании значений атрибутов – интервалов времени между полётами ТК (для стартов, стыковок и отстыковок). Также учитываются атрибуты «Количество дней полёта до стыковки» для всех типов ТК и «Допустимые месяцы для старта» для ТПК.

Использование онтологии позволяет пользователям системы самостоятельно указывать и модифицировать приоритеты планирования, без необходимости доработки и модификации системы, путём изменения значений атрибутов и отношений. Так, в большинстве случаев ТПК «Союз» стыкуются к портам модулей МКС МИМ1 и МИМ2, а ТПК «Прогресс» – к портам модулей МКС СО1 и СМ, однако при отсутствии места на предпочитаемых портах допускается использовать менее приоритетные. В онтологии концепт ТПК «Союз» имеет отношения «Лучше стыковать» с портами модулей МКС МИМ1 и МИМ2 и «Хуже стыковать» с портами модулей МКС СМ и СО1. Ситуация для концепта ТПК «Прогресс» обратная, т.е. имеются отношения «Лучше стыковать» с портами модулей МКС СМ и СО1, и «Хуже стыковать» с портами модулей МКС МИМ1 и МИМ2.

Рассмотрим пример появления нового ТК «Dragon», ранее не описанного в онтологии. Поскольку «Dragon» является подклассом концепта «Транспортный корабль», то он наследует все его значения атрибутов с условиями планирования, такими как «Минимальный интервал между стартами» и «Минимальный интервал между стыковками на одном порту». Созданием нового отношения «Лучше стыковать» с концептом «Американский порт (Nadir)» для нового типа ТК задаются условия планирования, после чего экземпляры нового ТК будут планироваться в соответствии с указанными пользователем требованиями.

2.4.7 Онтология построения грузопотока

Задачу планирования доставок на борт МКС грузов можно свести к ПВ-сети, где возможностями является набор полётов ТК к РС МКС с фиксированными датами, а потребностями – грузы с набором различных параметров и предпочтений. При формировании ПВ-сети посредством онтологии, полёты представляются в виде экземпляров класса «Транспортный корабль», имеющих свойство «Дата старта», а грузы описываются онтологией построения грузопотока. Помимо основных атрибутов, таких как масса и габариты, интерес при планировании представляют следующие атрибуты и отношения концепта груза:

- Ресурс – атрибут с численным значением гарантированного срока работы ресурса. Планировщик будет стремиться доставить запасной ресурс на ближайшем полёте ТК перед истечением срока годности уже имеющихся на борту ресурсов.

- Доставки для ВнеКД – атрибут грузов, расходуемых при проведении ВнеКД. Планировщик будет планировать такие грузы на ближайший полёт ТК перед осуществлением очередного ВнеКД.

- Минимальный остаток – атрибут количества дней, в течение которых станция должна быть обеспечена грузом в случае пропущенного цикла доставки. При планировании доставок расходуемых грузов, планировщик будет учитывать, что величина текущего запаса на борту МКС ни в какой момент не должна оказаться меньше минимального остатка.

- Норма расхода, кг на человека в сутки – атрибут, значение которого указывается только для расходуемых грузов. Планировщик учитывает нормы расхода при определении доставок для поддержания минимального остатка.
- Приоритет – численный атрибут, показывающий приоритетность груза при планировании, по умолчанию равен приоритету родительской бортовой системы.
- Регулярные доставки на ТГК – атрибут, показывающий минимальное обязательное количество единиц груза, доставляемых на ТГК «Прогресс».
- Регулярные доставки на ТПК – атрибут, показывающий минимальное обязательное количество единиц груза, доставляемых на ТПК «Союз».
- Резервный – атрибут для грузов, используемых при нештатных ситуациях, учитываемых планировщиком в зависимости от имеющего запаса на борту МКС.
- Предпочитаемый тип ТК – отношение с концептом класса «Транспортный корабль», на котором предпочтительна доставка груза. При отсутствии такого отношения планировщик не будет делать различий между типами ТК при планировании груза. При наличии отношения планировщик сначала пытается запланировать груз на предпочтительном ТК с наиболее выгодной датой старта, затем на других ТК того же типа, и только в последнюю очередь на иных типах ТК.
- Отношения «Груз-укладка» и «Груз-вложение» между двумя или более грузами свидетельствуют о наличии между ними пространственной связи. Грузом-укладкой считается груз, который имеет массу и сложную внутреннюю структуру, при планировании грузопотока учитывается масса самой укладки, а не грузов в её составе. Грузом-вложением считается груз, который входит в состав груза-укладки, при этом масса груза-вложения не учитывается при планировании грузопотока. В составе груза-укладки может находиться несколько разных грузов-вложений.

2.4.8 Использование онтологии построения грузопотока при распределении грузов по полетам транспортных кораблей

Начальными условиями для построения грузопотока является планируемый период с набором полётов ТК. При формировании грузопотока, значения атрибутов «Регулярные доставки на ТГК» и «Регулярные доставки на ТПК» определяют число единиц груза, в обязательном порядке планирующееся на ТК каждого типа.

Для прочих грузов адаптивное планирование выполняется посредством взаимодействий агентов грузов и улучшений ими своей текущей позиции.

Рассмотрим появление нового типа ТК – концепта ТК «Прогресс МС», у которого отсутствуют отношения «Предпочитаемый тип ТК» с грузами онтологии построения грузопотока. По этой причине планировщик первоначально будет стремиться игнорировать ТК этого типа, планируя на них доставки в самую последнюю очередь. Изменить такое поведение посредством расширения онтологии возможно за счёт переноса в онтологию конфигурации КА данного концепта с верхнего уровня иерархии типов ТК на уровень дочернего элемента для уже существующего ТК «Прогресс».

В этом случае для грузов с отношениями «Предпочитаемый тип ТК» с концептом ТК «Прогресс» будут распространяться те же правила планирования на новый концепт ТК «Прогресс МС». Для тех грузов, условиям доставки которых удовлетворяет только новая модификация ТК, следует создать отношения «Предпочитаемый тип ТК» напрямую с ТК «Прогресс МС», минуя его родительский концепт. Такие грузы будут стремиться распределиться только на ТК соответствующего типа, не допуская перераспределения на другие полёты ТК.

2.5 Исследование эффективности модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока

2.5.1 Исследование зависимости времени вычислений на размещение грузов на транспортных кораблях от количества грузов

Для оценки эффективности и практической применимости модифицированного метода сопряженных взаимодействий для планирования грузопотока РС МКС и производительности модуля планирования поблочного грузопотока МАС поддержки принятия решения было проведено экспериментальное исследование зависимости времени вычислений на размещение грузов на ТК от количества грузов.

Эксперимент проводился для четырех ТК «Прогресс» (№425 58Р, №428 60Р, №429 61Р, №431 62Р) с ограничением вместимости по грузоподъемности

2500 кг и для четырех ТГК «Союз» (№716 42S, №717 43S, №718 44S, №719 45S) с ограничением вместимости по грузоподъемности 100 кг. Количество грузов для распределения по ТГК и ТПК задавалось от 50 до 10 000 грузов (как максимальное количество грузов, доставляемое на РС МКС за планируемый период). Масса всех грузов задавалась в справочнике типов грузов, а требования к количеству и срокам доставки на МКС грузов рассчитывались на основе данных из системы IMS.

Необходимо было распределить грузы по четырем ТГК и четырем ТПК таким образом, чтобы найти согласованный баланс интересов между всеми грузами и ТК.

Было проведено 7 серий экспериментов, где задавалось 50, 100, 500, 1 000, 2 500, 5 000 и 10 000 грузов и проводились замеры времени планирования.

Эксперименты проводились для модифицированного метода сопряженных взаимодействий в МАС поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС под управлением операционной системы Microsoft Windows 10, установленных на рабочей станции с процессором Intel i7-3770 с частотой 3.4 ГГц и 4-мя ГБ оперативной памяти.

В качестве результатов измерений фиксировалось время работы метода и результаты распределения грузов по ТГК и ТПК для проверки проектантами адекватности полученных результатов.

Общая масса распределенных по ТК 10 000 грузов представлена в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Результат суммарной массы 10 000 грузов распределениях по ТГК и ТПК

| Тип груза | №425 58P | №716 42S | №428 60P | №717 43S | №718 44S | №429 61P | №719 45S | №431 62P |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Вода | 400,00 | 0,00 | 400,00 | 0,00 | 0,00 | 400,00 | 0,00 | 400,00 |
| Топливо | 388,00 | 0,00 | 400,00 | 0,00 | 0,00 | 400,00 | 0,00 | 400,00 |
| Газ | 112,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 88,00 |
| Сухие грузы | 1600,00 | 99,99 | 1599,99 | 100,00 | 85,93 | 1599,54 | 21,43 | 518,01 |
| Всего грузов | 2500,00 | 99,99 | 2399,99 | 100,00 | 85,93 | 2399,54 | 21,43 | 1406,01 |

Аналогичный вид, но с меньшим количеством распределенных грузов и их общей массой, имеют результаты для 5, 50, 100, 500, 1 000, 2 500 и 5 000 грузов.

Фрагмент практического результата работы системы для проектантов по распределению 10 000 грузов на 4 ТГК и 4 ТПК представлен на рис. 2.19.

| Наименование | Децимальный номер | Масса | №425 58P | №716 42S | №428 60P | №717 43S | №718 44S | №429 61P | №719 45S | №431 62P |
|---|-------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| СМО - средства медицинского обеспечения | | | | | | | | | | |
| СПИДН - средства профилактики неблагоприятного действия невосмости | | | | | | | | | | |
| Брюки | A11.000.01 | 0,35 | 12 | | 12 | | | 11 | | |
| Костюм "Пингвин-3" | КН-9030-400 | 3,00 | | | | 6 | 3 | | 3 | |
| Ботинки полетные | КН-9030-500 | 0,60 | | | | 6 | 3 | | 3 | |
| Костюм электростимуляции | A11.000.00 | 3,00 | | | | | | 8 | | |
| СОМП - средства оказания медицинской помощи | | | | | | | | | | |
| Укладка с пищевыми добавками | Xr4.160.684 | 0,70 | | | | | | 4 | | |
| Медукладка | Xr4.160.682-00 | 0,70 | | | | | | 20 | | |
| МКО - медицинский контроль и обследование | | | | | | | | | | |
| УСИ "Бета-08" | 5A2.893.586-01 | 0,30 | | | | | | 1 | | |
| СРК - система радиационного контроля | | | | | | | | | | |
| Анализатор импульсов (АИ) | Er2.809.149 | 3,30 | | | | | | 1 | | |
| Дозиметр ДВ-8 | Er2.804.005 | 0,25 | | | | | | 4 | | |
| Блок коммутации и питания БКП | Er2.068.006 | 1,90 | | | | | | 1 | | |
| УС и КЧА - уборка станции и контроль чистоты атмосферы | | | | | | | | | | |
| Салфетки санитарные для поверхностей | Xr4.160.003 | 1,20 | | | | | | 20 | | |
| СОП - средства обеспечения питанием | | | | | | | | | | |
| Контейнер с рационами питания | 17КС.260Ю 3200-0 | 5,00 | 58 | | 58 | | | 58 | | 57 |
| Салфетки для СПП | Xr4.160.603-10 | 0,35 | 26 | | 26 | | | 26 | | |
| Пакеты для сбора крошек | 11Ф615.8717-0A15 | 0,03 | 6 | | 10 | | | 77 | | 28 |
| Набор свежих продуктов | 11223344556677 | 15,00 | 1 | | 1 | | | 1 | | 1 |
| Резиновые жгуты | H59-040-1 | 0,01 | 1 | | | | | 820 | | |
| Электроподогреватель | 17КС.260Ю 2000-0 | 6,50 | 2 | | | | | | | |
| СМО ССГО - средства санитарно-гигиенического обеспечения | | | | | | | | | | |
| Вкладыш к спальному мешку | СПМ-9061-60 | 0,30 | | | 8 | | | 8 | | |
| Укладка "Водные процедуры" | Xr4.160.699 | 0,60 | | | | | | 14 | | |
| СЛГ (салфетки влажные) | Xr4.160.603 | 1,05 | | | 33 | | | 111 | | |
| Спальный мешок СМ | 170-9061-00 | 2,00 | | 1 | | 5 | 3 | | 3 | |
| СЛГ -Д (салфетки сухие) | Xr4.160.603-02 | 0,40 | | | | | | 23 | | |
| СЛГ -Д (полотенца сухие) | Xr4.160.603-06 | 0,45 | | | 50 | | | 24 | | |
| СЛГ -Д (полотенца сухие -М) | Xr4.160.603-07 | 0,45 | | | 102 | | | 49 | | |
| СЛГ (салфетки для полости рта) | Xr4.160.603-11 | 0,70 | | | 12 | | | 5 | | |
| Набор личной гигиены "Комфорт-3М" | Xr2.945.606 | 1,60 | | | | 4 | 1 | | | |
| Вкладыш к спальному мешку | 170-9061-60 | 0,30 | | | 8 | | | 8 | | |
| Белье "Камелия А" | A08.000.01 | 0,50 | | | 44 | | | 20 | | |

Рисунок 2.19 – Фрагмент результата работы системы по планированию
поблочного грузопотока на 4 ТК и 4 ТК

В каждой из семи серий экспериментов проводилось 5 измерений на одном и том же множестве входных данных и параметров, после чего были вычислены средние значения времени работы метода, результаты представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты замера времени вычислений на размещение грузов по ТК и ТК

| Количество грузов, шт. | 50 | 100 | 500 | 1 000 | 2 500 | 5 000 | 10 000 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|--------|
| Время работы метода, сек | 0,5 | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 7 | 24 |

На основании полученных данных в ходе эксперимента построена зависимость времени вычислений на размещение грузов на ТК и ТК от количества грузов (рис. 2.20).

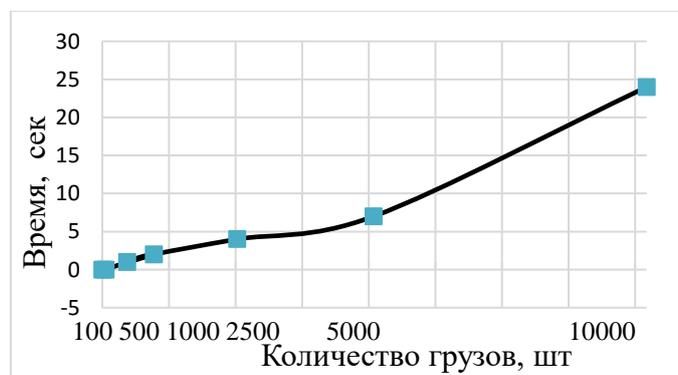


Рисунок 2.20 – Зависимость времени вычислений на размещение грузов от количества грузов

Результаты испытаний показали, что модифицированный метод сопряженных взаимодействий для рассмотренного приложения в реальных условиях задачи планирования грузопотока на РС МКС имеет близкую к линейной зависимость времени вычислений от числа грузов, что позволяет находить за допустимое время приемлемые по качеству решения.

За счет того, что в модифицированном методе сопряженных взаимодействий решение заново не строится получено значительное ускорение вычислений. Кроме того, модифицированный метод сопряженных взаимодействий позволяет легко подстраиваться под изменяющиеся условия задачи (появляются новые типы грузов, изменяются критерии, вводятся новые ограничения и т.п.) и не требует, как в классических методах, создание новой модели для каждого нового случая, что на практике трудоемко и практически невыполнимо.

У модифицированного метода сопряженных взаимодействий отсутствует преждевременная сходимость, а корректность его функционирования и адекватность получаемых результатов подтверждается сравнением с результатами ручного планирования операторами-планировщиками.

Полученные результаты экспериментов свидетельствует о практической применимости модифицированного метода сопряженных взаимодействий для решения поставленной задачи, обеспечивая при этом удобный интерактивный режим доводки плана грузопотока.

2.5.2 Исследование влияния фазы разрешения конфликтов на качество результатов

Во второй серии экспериментов на том же наборе данных сравнивались фаза первоначального распределения грузов по свободным ТК с последующей фазой разрешения конфликтов для улучшения показателей модифицированного метода сопряженных взаимодействий, фаза разрешения конфликтов показал почти 20% улучшение плана над первоначальным размещением, использующим распределение грузов по свободным ТК на основе данных системы IMS (рис. 2.21).

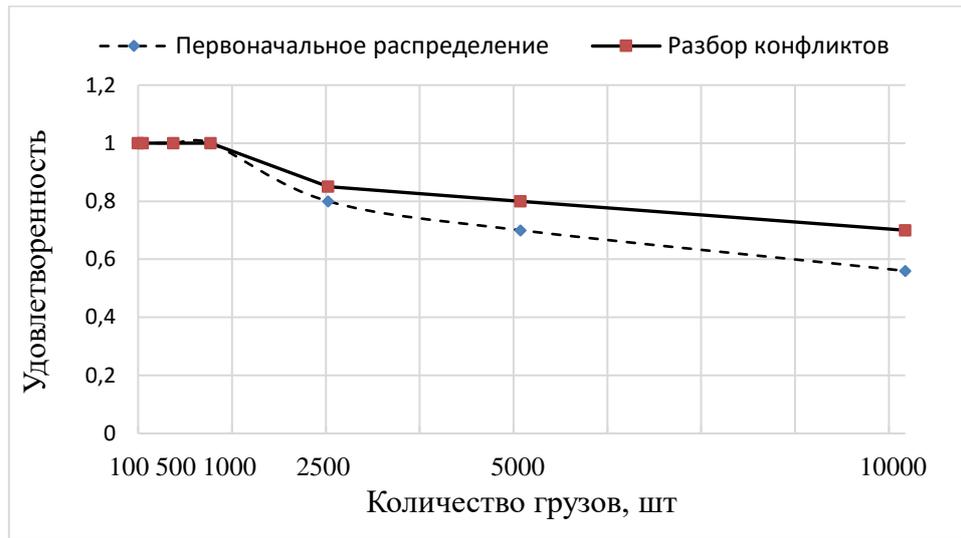


Рисунок 2.21 – Результаты экспериментальных исследований влияния фазы разрешения конфликтов на качество результатов

Была построена модель для решения поставленной задачи с помощью симплекс-метода, реализованного в Microsoft Excel, которая не давала в итоге приемлемых по качеству результатов для практического использования.

Эксперименты показали, что применение модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока на основе МАТ, базирующегося на принципах самоорганизации и эволюции, показали свое преимущество, и подтвердили свою работоспособность и эффективность для решения задач управления грузопотоком РС МКС, обеспечивая оперативность и гибкость при перестроении планов по событиям в реальном времени.

Исходя из результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что для решения на практике рассматриваемой задачи модифицированный метод сопряженных взаимодействий для управления грузопотоком РС МКС имеет важные преимущества и является предпочтительным, обеспечивая предъявляемые требования к управлению грузопотоком РС МКС.

За счет представления задачи в форме, близкой к естественной, логика принятия решений МАС становится более понятной как для программистов, так и пользователей, что позволяет встраивать большее число эвристик без увеличения сложности кода и уменьшает общее время разработки МАС, а также делает результаты МАС доступными и прозрачными для понимания пользователями.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Рассмотрена возможность применимости МАТ для управления сложными системами, какой является управление грузопотоком РС МКС.

2. Формализована постановка задачи построения программы полета и грузопотока РС МКС, отличающаяся учетом влияния множества индивидуальных особенностей (предпочтений, правил и ограничений) модулей и бортовых систем МКС, полетов ТК, грузов и экипажа. Задача планирования сформулирована как задача максимизации удовлетворенности всех участников этого процесса.

3. В развитие модели ПВ-сети управления грузопотоком и модификации метода сопряженных взаимодействий предложены новые классы агентов, учитывающие индивидуальные особенности подсистем сложного технического объекта, ТС, грузов и команды (экипажа), а также присущие им новые протоколы переговоров для достижения баланса интересов, повышающих качество решения поставленной задачи.

4. Построены на основе базовых классов специализированные агенты предметной области управления грузопотоком РС МКС (агенты модулей и бортовых систем станции, агенты ТК и полетов ТК, агенты заказов на грузы и грузов, агенты экипажа, агенты проектантов и кураторов) для поиска баланса интересов в реальном времени при построении программы полета и грузопотока РС МКС.

5. Для модифицированного метода сопряженных взаимодействий предложен способ построения функций удовлетворенности агентов для оценки результатов планирования и дальнейшего разрешения конфликтов, последовательно улучшающего результаты на каждой итерации.

6. Разработана общая схема работы модифицированного метода сопряженных взаимодействий для управления грузопотоком РС МКС, а также протоколы переговоров агентов. Получаемая ПВ-сеть представляет собой пример самоорганизующейся системы, формирующей расписания ресурсов, а также адаптирующей свое поведение под действием событий, возникающих в реальном времени.

7. Разработан пример работы модифицированного метода сопряженных взаимодействий, демонстрирующий возможность разрешения конфликтов при распределении грузов по полетам ТГК.

8. Для формализации моделей ситуаций разработана онтология управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования, позволяющая учитывать индивидуальные особенности подсистем сложного технического объекта, ТС, грузов и экипажа, а также вводить отношения и новые классы объектов, влияющих на перепланирование, в ходе эксплуатации сложного технического объекта без перепрограммирования.

9. Для оценки эффективности и практической применимости модифицированного метода сопряженных взаимодействий для построения грузопотока РС МКС было проведено экспериментальное исследование зависимости времени вычислений на размещение грузов на ТК от количества грузов, а также влияние фазы разрешения конфликтов на качество результатов распределения грузов, на основании которых сделан вывод о целесообразности использования модифицированного метода сопряженных взаимодействий для управления грузопотоком РС МКС для решения поставленной задачи и его практической применимости.

3 АРХИТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ

3.1 Основные принципы разработки мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС

Для реализации предложенных моделей, методов и алгоритмов была разработана архитектура мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС (МАС «Грузопоток») [134].

Работа ПВ-сети в МАС «Грузопоток» должна обеспечить реализацию полного цикла управления ресурсами, представленного на рис. 3.1.

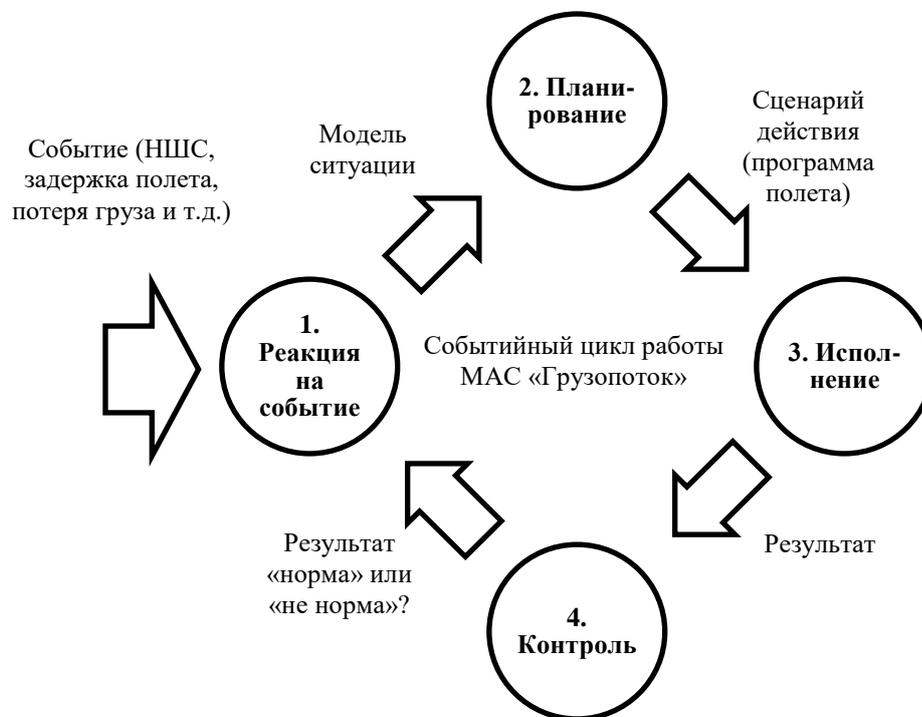


Рисунок 3.1 – Полный цикл управления ресурсами

Полный цикл управления ресурсами в МАС «Грузопоток»:

– реакция на событие – предполагает определенную политику обработки событий, часть которых может автоматически поступать на обработку, а часть – требует участия пользователя;

– планирование – распределение и формирование расписания использования ресурсов, где решается задача, какие ресурсы следует использовать для отработки заказов. На этом же этапе происходит оптимизация, пока есть время и может

включать моделирование и прогнозирование развития ситуации. Также происходит согласование решений, предполагает взаимодействие с пользователем, который может утвердить предлагаемое системой решение, отменить или скорректировать решение, ввести собственное встречное предложение;

- исполнение – непосредственная реализация принятых решений на этапе планирования и вырабатываемых сценариев действий;

- контроль – анализ результатов реализации планов, после чего осуществляется перепланирование в случае расхождения плана и факта – автоматически или пользователем запускается цепочка изменений планов.

Данный полный цикл управления ресурсами обеспечивает поддержку процесса автономного функционирования МАС «Грузопоток».

Основные требования, предъявляемые к созданию МАС «Грузопоток»:

- 1) МАС «Грузопоток» создается как автономная система, способная реагировать на события, планировать действия и контролировать их исполнение;

- 2) МАС «Грузопоток» строится как самоорганизующаяся система на основе МАТ и баз знаний, показывающая преимущества адаптивного планирования;

- 3) в результате оперативно, гибко и эффективно формируется и перепланируется программа полета и план грузопотока РС МКС;

- 4) работа по событиям позволяет повысить безопасность и надежность эксплуатации МКС.

3.2 Назначение, цели и задачи создания МАС «Грузопоток»

МАС «Грузопоток» в первую очередь предназначена для:

- организации коллективной работы проектантов, кураторов и специалистов ЦУП при согласовании программы полета и плана грузопотока МКС в рамках единого информационного пространства;

- анализа программы полета и плана грузопотока с целью оптимизации и поиска возможных альтернативных вариантов;

- моделирования различных ситуаций и быстрой (оперативной) проработки разных вариантов программы полета и плана грузопотока в случае необходимости.

Основной целью создания МАС «Грузопоток» является поддержка согласованного принятия решений, обеспечивающая:

- повышение надежности обеспечения жизнедеятельности станции;
- повышение эффективности управления грузооборотом РС МКС;
- повышение качества принимаемых решений при планировании;
- обеспечение согласованного и гибкого построения программы полета и грузопотока РС МКС с учетом основных ограничений и предпочтений всех участников этого процесса;

- обеспечение оперативности и быстроты реакции на непредвиденные события и изменения в ситуации на станции;

- усиление контроля исполнения плана по подготовке грузов к доставке для исключения непредвиденных ситуаций, приводящих к необходимости перепланирования всего грузопотока;

- обеспечение принятия экономически целесообразных решений по планированию грузопотока с учетом высокой стоимости доставки грузов и их хранения на МКС, а также необходимости поддержания жизнедеятельности МКС;

- обеспечение открытости для добавления новых типов грузов;

- обеспечение индивидуального подхода к каждому заказу и ресурсу МКС;

- уменьшение сложности и трудоемкости работы проектантов (операторов);

- обеспечение удобства для пользователя;

- обеспечение высокой производительности;

- снижение зависимости процесса управления от человеческого фактора;

- обеспечение надежности, соответствующей уровню требований к системам, применяемым в космической технике.

Использование МАС «Грузопоток» обеспечивает решение следующих задач:

- автоматическое формирование вариантов программы полета и грузопотока на основе принятых норм и требований к ресурсам МКС;

- обеспечение автоматизированного расчета ресурсов (СОЖ, рационов питания, воды, газа, топлива и времени экипажа);

- автоматическое корректирование программы полета и грузопотока в связи с внешними и внутренними событиями, включая изменения приоритетов доставки различных видов грузов, предпочтений и ограничений;
- управление пользователем процессом построения или корректировки программы полета и грузопотока в ручном и автоматическом режимах;
- проведение параллельного анализа нескольких вариантов программы полета и грузопотока в целях оптимизации;
- контролирование процессов подготовки программы полета и грузопотока в реальном времени;
- обеспечение интеграции и взаимодействия с имеющимися автоматизированными системами и базами данных РКК «Энергия», обеспечение импорта и экспорта информации;
- формирование требуемой отчетной документации по итогам эксплуатации и использования материальных ресурсов РС МКС.

Основные варианты (сценарии) использования МАС «Грузопоток» (рис. 3.2).

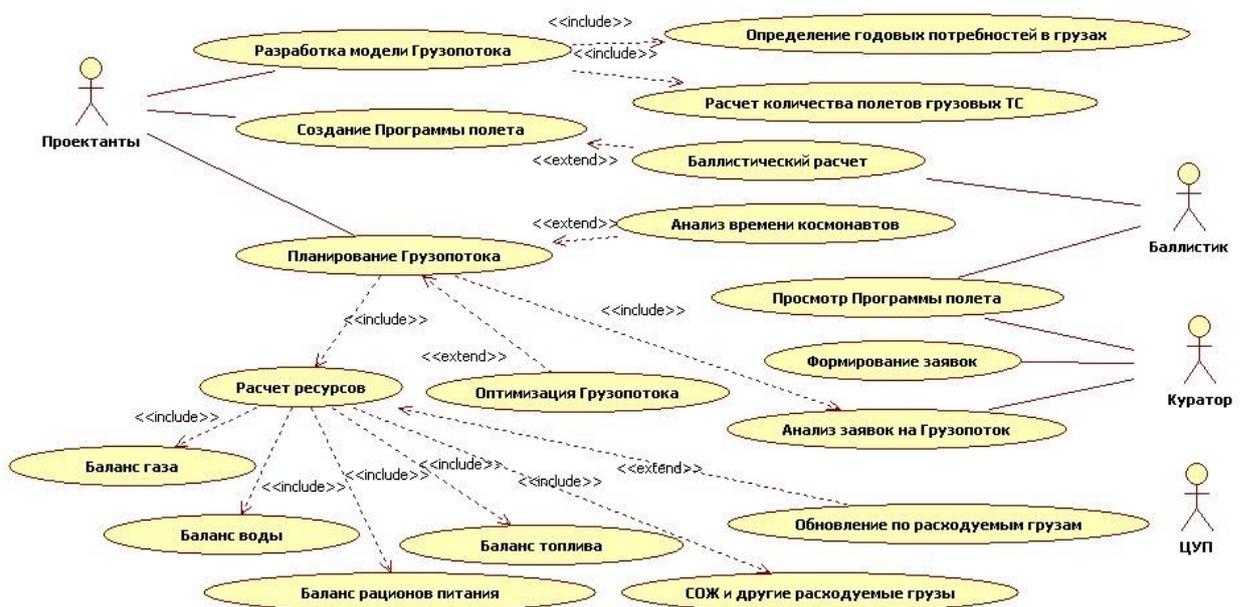


Рисунок 3.2 – UML диаграмма вариантов использования МАС «Грузопоток»

МАС «Грузопоток» позволила автоматизировать существующий трудоемкий процесс интерактивного построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС, осуществляемый до внедрения МАС «Грузопоток» практически вручную на уровне возможностей Excel-таблиц и диаграмм.

3.3 Основные функциональные возможности МАС «Грузопоток»

Для решения поставленных целей и задач МАС «Грузопоток» обеспечивает следующие основные функциональные возможности.

1. Ввод исходных данных для работы системы, описание, редактирование и ведение онтологии и сцен «мира МКС»: по программе полета – типы ТК, сроки полетов, порты МКС; по грузопотоку – типы грузов, правила планирования доставки топлива, воды, газообразных грузов, сухих грузов и рационов питания; по взаимосвязям сцен программы полета – модель и план грузопотока.

2. Ведение и редактирование программы полета, модели и плана грузопотока с поддержкой базовой и альтернативных версий.

3. Поддержка версионности программ полета и грузопотока.

4. Расчет балансов расходуемых грузов, топлива, воды, газа, рационов питания и времени экипажа с построением отчетов в графической форме и передачей результатов расчета в подсистему планирования грузопотока.

5. Адаптивное динамическое планирование программы полета и грузопотока: построение модели грузопотока и определение количества требуемых ТК; построение программы полета; планирование поблочного грузопотока с учётом срочности, предъявляемых требований и возможности корректировки в реальном времени; анализ грузопотока и подготовка вариантов его оптимизации в интерактивном режиме; работа с возникающими проблемами грузопотока с поддержкой поиска возможного их разрешения; использование экономических параметров транспортировки грузов для выбора наиболее оптимального варианта.

6. Планирование размещения на МКС, возврата и утилизации грузов.

7. Обеспечение взаимодействия проектантов с кураторами, баллистиками и специалистами ЦУП: сбор и планирование заявок на доставку грузов и взаимодействие с кураторами; обновление планов по факту и взаимодействие с ЦУП; обработка событий (перенос старта, задержка при доставке груза, и др.) и адаптивное перепланирование с возможностью ручной корректировки; контроль всех этапов выполнения заявок и учёт запланированных или отложенных грузов.

8. Управление логикой действий агентов при принятии решений: настройка критериев, предпочтений и ограничений для разных типов и конкретных экземпляров агентов; настройка «микроэкономики» агентов для поиска компромиссов при принятии решений; визуализация лога переговоров агентов.

9. Визуализация результатов построение программы полета и грузопотока.

10. Формирование сводных отчётов по использованию ресурсов за определенный период времени.

11. Сохранение и восстановление информации при сбоях.

12. Поддержка различных прав доступа пользователей к информации и функциональным возможностям МАС «Грузопоток».

13. Импорт и экспорт в MS Excel.

С точки зрения функционального деления в МАС «Грузопоток» реализовано деление на подсистемы, реализующих отдельную функциональность, например, планирование программы полета, планирование грузопотока, планирование размещения, возврата и утилизации грузов, расчет баланса ресурсов.

3.4 Архитектура МАС «Грузопоток»

Ввиду особенности согласованного планирования программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС МАС «Грузопоток» разрабатывалась как набор отдельных модулей планирования, которые также могут осуществлять согласование решений через протоколы взаимодействий. Модули планирования, осуществляя согласованные взаимодействия, объединяют свои сервисы для учета индивидуальных требований пользователей. При этом событие в одном из модулей планирования может повлиять на расчеты в других модулях. Для обеспечения согласованного взаимодействия и адаптивности принятия решений каждый модуль планирования разрабатывался на основе мультиагентной платформы, которая была применена несколько лет назад и доказала свою эффективность в области планирования грузоперевозок и производственных ресурсов.

Данный подход позволяет разрабатывать модульные, легко перестраиваемые и способные к быстрому и гибкому реагированию на события МАС. Помимо

способности реагировать на внезапные непредвиденные изменения, разрабатываемая МАС «Грузопоток» обладает простотой в использовании и обслуживании. Предлагаемая архитектура направлена на модульное построение моделей разнообразного поведения агентов, их способностей и самоанализа, а также на улучшение работы агентов благодаря использованию онтологии.

В архитектуре МАС «Грузопоток» каждый планировщик организован как отдельный модуль, планирование в котором осуществляется агентами, и имеет свой пользовательский интерфейс (рис. 3.3).

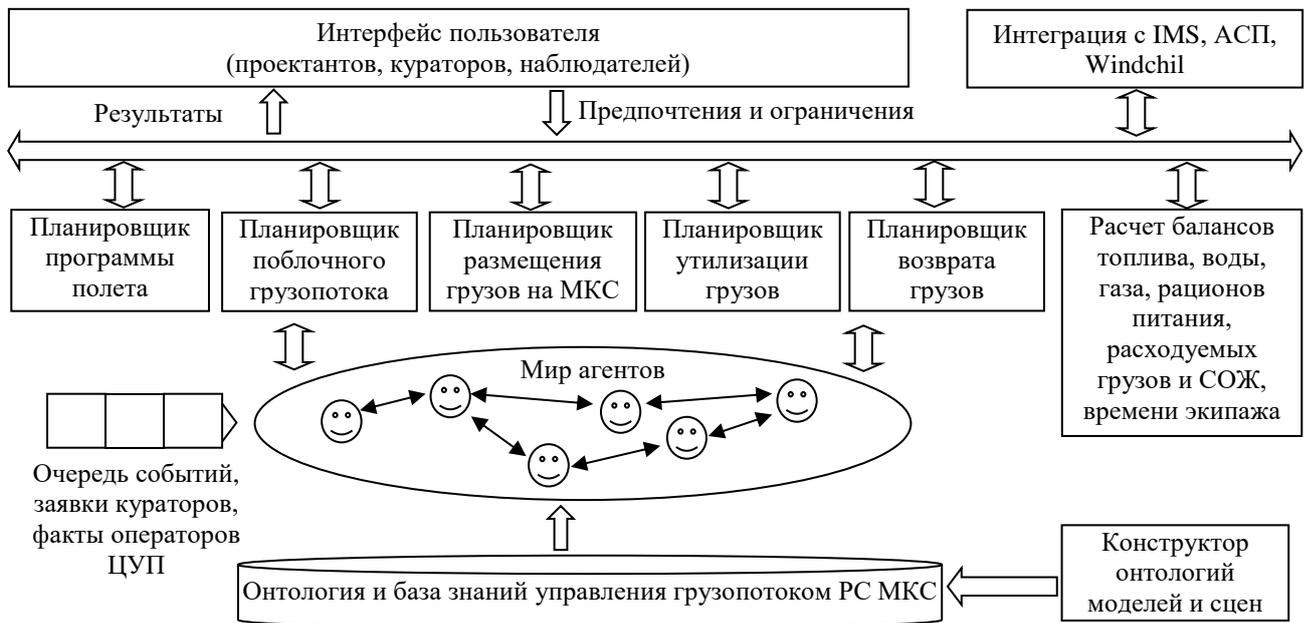


Рисунок 3.3 – Архитектура МАС «Грузопоток»

Разработанная МАС «Грузопоток» представляет собой набор отдельных мультиагентных модулей планирования: программы полетов; поблочного грузопотока; размещения грузов на станции; возврата грузов; утилизации грузов; расчета ресурсов для прогнозирования расходов топлива, воды, продуктов питания и прочих расходуемых ресурсов на станции; расчета времени экипажа (нормативы времени экипажа на служебные и целевые полетные операции).

Среди общих компонентов архитектуры МАС «Грузопоток» выделены справочники (космонавтов, ТК, грузов и др.), редактор онтологии (программы полета, грузопотока, ресурсов, операций, расходов топлива, баков топлива и воды, времени экипажа, утилизации, размещения грузов), интерфейс пользователя.

МАС «Грузопоток» построена в трехзвенной архитектуре, в которой база знаний и модули планирования располагаются на отдельном сервере, а автоматизированные рабочие места (АРМы) пользователей устанавливаются на персональных компьютерах. Данные, накапливаемые в ходе работы МАС «Грузопоток», сохраняются в общедоступном хранилище данных. Сервер приложений, являющийся центральным компонентом, обеспечивает взаимодействие всех подсистем, производит обработку событий и управляет правами доступа пользователей.

В процессе управления грузопотоком РС МКС в МАС «Грузопоток» возникают различные события, обрабатываемые модулями планирования в реальном времени, приводящие к адаптивной перестройке планов.

3.5 Виртуальный мир модулей планирования

Виртуальный мир модулей планирования построен на основе рассмотренной выше концепции ПВ-сети управления грузопотоком и новых классов агентов.

Например, в модуле планирования программы полетов есть агенты ТК, агенты экспедиций и агенты космонавтов, в то время как в модуле планирования поблочного грузопотока есть агенты грузов и агенты полетов ТК. Некоторые классы агентов могут существовать в двух или более виртуальных мирах, имея разные цели, но обеспечивая взаимодействие между модулями планирования.

В частности, агент полета ТК присутствует как в модуле планирования программы полета, так и в модуле планирования поблочного грузопотока. Если из-за задержки подготовки ТК начало полета откладывается, агент этого полета ТК, присутствующий в виртуальном мире программы полета, поменяет свой план, т.е. даты запуска, стыковки и расстыковки. А так как он задействован как в программе полетов, так и в грузопотоке, то его сообщение об изменениях в плане предупредит агентов грузов в модуле планирования поблочного грузопотока о задержке их полета ТК и даст им возможность успеть «перепрыгнуть» на другой полет ТК, если это требуется. И наоборот, если объем некоторых грузов уменьшается, то коэффициент загрузки полета ТК может стать слишком низким, что будет тотчас же отражено ростом неудовлетворенности агента полета ТК. Этот агент будет

пытаться сдвинуть свой полет ТК на более позднее время в программе полета, чтобы стать более эффективным и привлекательным для других агентов грузов.

Рассмотрим более подробно пример работы пользователей и их взаимодействие между собой и агентами в МАС «Грузопоток»:

1) пусть от куратора, отвечающего за функционирование бортовой системы станции, поступает новый запрос на доставку заданного груза в определенное время – по этому событию создается новый агент груза (потребность);

2) новый агент груза взаимодействует с агентами полетов ТК, которые уже имеются в системе, чтобы найти свое наилучшее размещение;

3) если подходящего полета ТК нет, то инициируется совместно с агентами полетов ТК осуществить сдвиг уже имеющихся или создание нового полета ТК;

4) если на выбранном полете ТК достаточно свободного пространства, и данный груз умещается по массе и размерам, новый груз включается в график;

5) в противном случае, агент груза пытается вытеснить уже размещенные ранее грузы, которые имеют меньшую важность или больший резерв по времени;

б) в этих целях агент груза отправляет выбранным агентам запрос уменьшить свои объемы и массы или переместиться на другие полеты ТК, с учетом неуменьшаемого установленного количества ресурса доступного на станции;

7) из полученных в ответ вариантов делается попытка найти наилучшую конфигурацию, что, возможно, вызовет еще несколько взаимодействий и итераций для поиска уступок, и более гармоничного решения конфликтов;

8) если роста ценности решения больше не наблюдается, то фиксируется «динамический останов» (МАС «Грузопоток» продолжает работать, но изменений плана больше не происходит), и решение выдается пользователю;

9) пользователь может вручную переместить грузы на другие полеты ТК, если необходимо, «заморозить» часть грузов от изменения размещений и т.д.

В процессе переговоров агентов может развиваться вспыхивающая «цепная реакция» перестановок, которая будет захватывать и менять принятые ранее решения, поскольку часть грузов после размещения всегда остается не полностью

удовлетворенной и ждет возможности «перепрыгнуть» на другой полет ТК или перейти на другой полет ТК при первом же случае.

3.6 Описание использования МАС «Грузопоток» для адаптивного перепланирования на примере потери ТК «Прогресс М-27М»

Рассмотрим процесс адаптивного перепланирования на примере аварийной ситуации и потери ТК «Прогресс М-27М» [135, 136].

28 апреля 2015 г. при запуске с космодрома Байконур ТК «Прогресс М-27М» произошло нештатное отделение третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2.1а». В результате ТК «Прогресс М-27М» оказался на расстоянии около 30 километров от расчётной орбиты выведения, что привело к невозможности стыковки с МКС и в конечном итоге к его потере. Это был второй случай потери ТК, первый случай аварии ТК «Прогресс М-12М» был в 2011 г. От наземных специалистов потребовалось пересмотреть все без исключения планы снабжения РС МКС. Адаптивная корректировка планов проводилась с использованием МАС «Грузопоток», в которой изменение в каждом из планов приводило к каскадному интерактивному согласованию всех смежных планов (рис. 3.4).

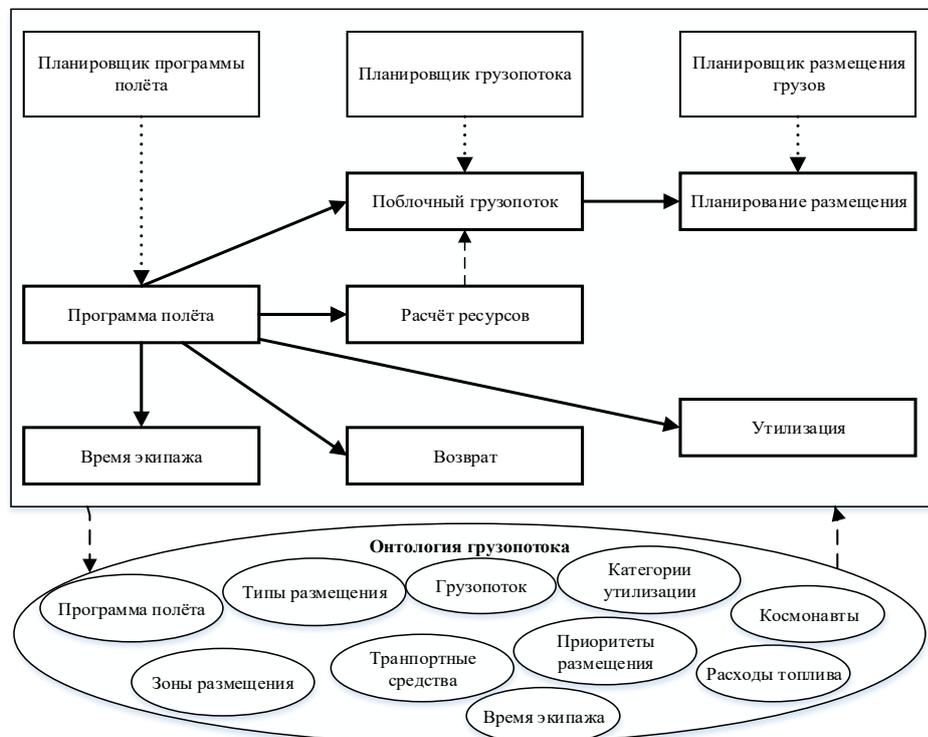


Рисунок 3.4 – Общая схема планирования в МАС «Грузопоток»

Изменения в программе полета. Результатом работы модуля «Программа полета» является программа полета с расписанием стартов, стыковок и отстыковок ТК по портам РС МКС на год. В процессе планирования программы полета агент порта предоставляет агентам полета ТК информацию о том, свободен ли порт в интересующий временной интервал, и если занят, то кем. Агент полета ТК создает и контролирует агентов своих стыковок и устанавливает для них временной интервал для занятия порта.

Кроме этого, при планировании программы полета учитываются требования по максимальному использованию ресурсов ТК, данные баллистики, а также учитывается планирование перестыковок ТК с одного порта на другой (рис. 3.5).

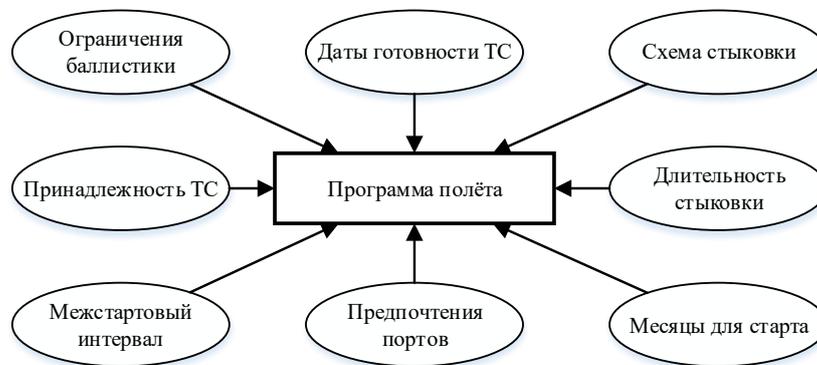


Рисунок 3.5 – Ограничения планирования программы полёта

Потеря ТК «Прогресс М-27М» привела к следующим изменениям в программе полета: 1) старт ТК «Союз ТМА-17М» с экипажем экспедиции 44/45 до выяснения причин аварии ТК «Прогресс М-27М» был перенесён с 26 мая 2015 г. на 27 июля 2015 г.; 2) в связи с задержкой прибытия очередного экипажа, пребывание на МКС экипажа экспедиции 42/43 было продлено путём переноса даты отстыковки ТК «Союз ТМА-15М» с 12 мая 2015 г. на 11 июня 2015 г.; 3) для восполнения для экипажа утраченных при потере ТК «Прогресс М-27М» грузов, следующий по очередности запуск ТК «Прогресс М-28М» был перенесён с 6 августа 2015 г. на 3 июля 2015 г.; 4) для поддержания общего числа запланированных доставок грузов на РС МКС в количестве четырёх ТК в год, запуск ТК «Прогресс М-29М» был перенесён с начала 2016 г. на последний квартал 2015 г.

Даты прочих полётов ТК к РС МКС также подверглись корректировкам для соблюдения необходимой длительности стыковок и интервалов между ними.

Расчет расходуемых ресурсов. Изменения в программе полёта и сроках пребывания на станции экипажа повлекли необходимость перерасчёта требуемого количества расходуемых ресурсов. Для этих целей в МАС «Грузопоток» используется модуль «Расчёт ресурсов» с отдельным учётом балансов топлива, питьевой воды, продуктов питания и прочих расходуемых грузов.

Баланс топлива учитывает доставки топлива на ТГК и расходы на динамические операции, а также необходимость поддержания минимального запаса в баках станции. Расчёт баланса топлива происходит в несколько стадий. Вначале на основе предварительной модели плана доставок и известного числа полётов ТК на РС МКС в год формируется стратегический баланс топлива сроком на несколько лет, который впоследствии регулярно корректируется. Далее на основе полученных из программы полёта дат стыковок и отстыковок и плана коррекций орбиты МКС формируется тактический баланс топлива сроком на один год. Тактический баланс учитывает не только количество доставляемого и расходуемого топлива, но и распределение топлива по бакам станции и пристыкованным ТГК, а также зависимость величины расходов на каждую операцию в зависимости от текущей конфигурации МКС. Также ведётся посуточный учёт фактических расходов и запасов топлива, используемый для корректировки тактического годового баланса, который в свою очередь используется для уточнения долгосрочной стратегии, обеспечивая соблюдение преемственности на всех этапах планирования. Главной задачей при расчёте баланса топлива является обеспечение наличия запаса на пропущенный цикл доставки на случай нештатных и аварийных ситуаций, по этой причине потеря ТГК «Прогресс М-27М» не повлекла угрозы срыва реализации плана полета. Однако израсходованный запас топлива потребовалось восполнить, для этого в балансе топлива предусмотрено распределение доставок по ТГК с последующей передачей данных в модуль планирования поблочного грузопотока.

Баланс питьевой воды учитывает доставки и потребление питьевой воды экипажем РС МКС, а также предназначен для поддержания запаса на пропущенный цикл в случае нештатных и аварийных ситуаций. Баланс учитывает запасы, размещённые как в баках станции, так и в ёмкостях для воды (ЕДВ), количество членов экипажа станции и их индивидуальные нормы потребления. Учёт фактических значений посуточного расхода позволяет повысить точность будущих прогнозов, а необходимые объёмы для поддержания запаса, передаются в модуль планирования поблочного грузопотока.

Расчёт продуктов питания и прочих сухих расходуемых грузов также учитывает даты доставок на ТК и индивидуальные нормы потребления целью поддержания необходимого запаса на пропущенный цикл по каждому из более чем 30 наименований. При планировании доставок ресурсных грузов учитывается их текущий запас на РС МКС согласно актуальным данным системы IMS.

На основе известных дат запусков ТК, количества членов экипажа на борту, величины запаса на пропущенный цикл доставки и норм расхода, в МАС «Грузопоток» автоматически был актуализован план доставок расходуемых ресурсов в поблочном грузопотоке, обеспечивающий как восполнение запаса расходуемых грузов, так и поддержание его в пределах охватываемого периода.

Планирование поблочного грузопотока. Помимо расходуемых грузов, требовалось также актуализировать план доставок расходных материалов, запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП), служебного оборудования и НА для проведения КЭ. Для этих целей в системе используется модуль «Планирование грузопотока». Задача решается в два этапа: сначала формируется упрощённая модель грузопотока на несколько лет, оперирующая категориями грузов и точностью до десятков килограмм, далее, после утверждения программы полёта, производится формирование детального поблочного грузопотока для всех полётов ТК каждого года с учётом дат их запусков.

В связи с потерей ТК «Прогресс М-27М», набор грузов для ТК «Прогресс М-28М» и последующих запусков в 2015 г. потребовалось радикально пересмотреть. МАС «Грузопоток» позволила осуществить перенос полного состава

грузов с потерянного ТК на последующие полёты ТК, однако данное действие привело к превышению доступных объёмов и потребовало вытеснение грузов с низкими приоритетами на более поздние полеты ТК. Задача была решена итерационно мультиагентным адаптивным модулем планирования.

Изначально у всех грузов в онтологии управления грузопотока должны быть заданы приоритет, масса единицы и временной диапазон доставки (рис. 3.6). На первом бесконфликтном шаге планирования агенты грузов сортируются по убыванию удельного приоритета на единицу массы. Это даёт возможность агенту полета ТК выбрать наиболее подходящие и в то же время легкие грузы. Затем агент полета ТК отбирает грузы из оставшегося списка до полного насыщения по массе. Список полетов ТК уменьшается на один, и процесс повторяется для всех полетов ТК, перед каждой итерацией выполняя поиск агентов грузов с наибольшей функцией удовлетворенности.

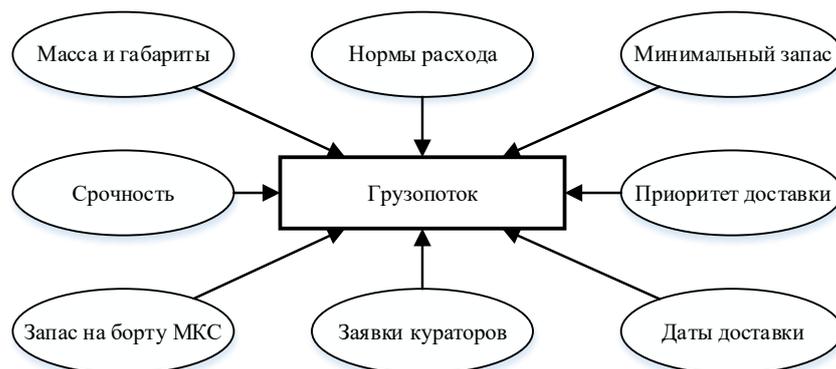


Рисунок 3.6 – Характеристики грузов для планирования грузопотока

Затем выполняется непрерывная проактивная фаза планирования для улучшения удовлетворенности агентов грузов. Первым начинает процесс улучшения агент груза с наименьшим значением функции удовлетворённости, затем следующий и т.д. В некоторый момент проактивной фазы складывается ситуация, когда никто из агентов грузов уже не может улучшить общую функцию удовлетворенности, что означает нахождение баланса интересов и достижение системой локально устойчивого равновесия.

Планирование размещения грузов. Для нового состава грузов ТК «Прогресс М-28М» и последующих полётов ТК потребовалось пересмотреть план их размещения на станции. Для размещения сформированного в результате

планирования поблочного грузопотока набора грузов по зонам хранения РС МКС, в МАС «Грузопоток» используется модуль «Планирование размещения». Основная задача заключается в размещении как можно большего объема грузов в отведенных для хранения зонах, не превысив при этом доступные для размещения объемы. Для хранения прочих грузов временно используются объемы пристыкованных ТК.

При планировании долгосрочной стратегии размещения грузов на станции, на основании тенденций по количеству доставляемых грузов различных категорий и располагаемых свободных объемов, проводится прогнозирование потребностей в дополнительных свободных объемах сроком на несколько лет. Детальный план размещения с указанием конкретной зоны хранения для каждой единицы доставляемого груза формируется отдельно для каждого полёта ТК к РС МКС после утверждения поблочного грузопотока и передаётся экипажу в виде рекомендаций. В процессе автоматического планирования размещения используются данные из системы IMS, а также из онтологии, описывающей условия и ограничения планирования (рис. 3.7).

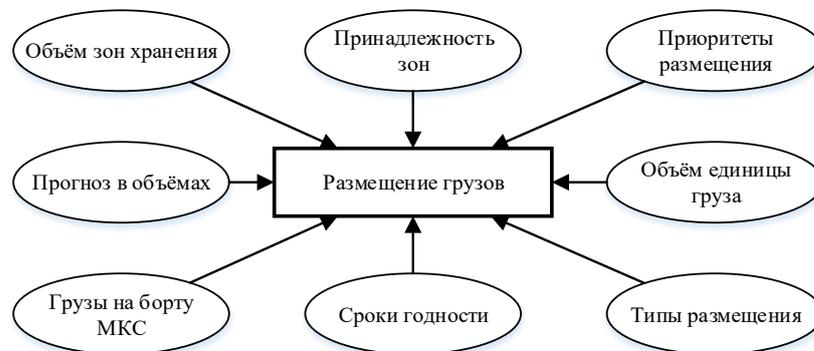


Рисунок 3.7 – Условия для планирования размещения

В ходе планирования модуль планирования пытается разместить грузы в имеющиеся свободные объемы согласно указанным приоритетным зонам. Если груз не удастся разместить в приоритетных зонах, то он может быть размещён в любую зону хранения, имеющую достаточный свободный объём. Грузы, размещённые пользователем вручную, при планировании не затрагиваются.

При определении свободных объемов в зоне также учитываются сроки годности уже имеющихся в ней грузов. Если дата стыковки нового ТК позже даты истечения срока годности единицы груза, то такой груз подлежит утилизации на

предыдущем ТГК, а освободившийся объём может быть использован для размещения новых грузов.

Планирование утилизации грузов. При отстыковке ТГК «Прогресс М-27М» и его затоплении планировалось на нем также утилизировать более 2000 кг отходов, включая сухие и жидкие грузы. Изменения в планах потребовало пересмотреть план утилизации грузов (рис. 3.8).

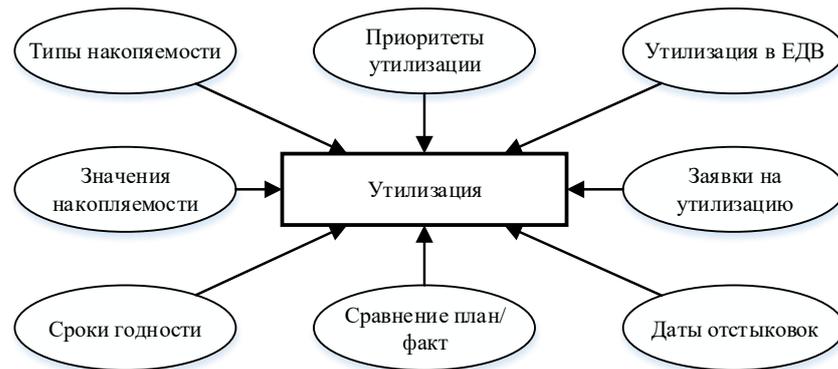


Рисунок 3.8 – Исходные данные для формирования плана утилизации

Формирование плана утилизации в МАС «Грузопоток» происходит в два этапа. Сначала формируется модель утилизации отходов сроком на год, в которой на основе дат отстыковок ТГК и расчётных норм накопления проверяется возможность утилизации отходов и формируется предварительное распределение категорий отходов по ТГК. Затем, на основании заявок кураторов, формируется детальный перечень подлежащих утилизации грузов для каждого ТГК, на основе которого составляются рекомендации для экипажа. Утилизация жидких отходов планируется как в баки отстыковываемых ТГК, так и в ЕДВ.

Потеря ТГК «Прогресс М-27М» привела к возрастанию общего объёма отходов на станции, а запланированные к утилизации на нем грузы, потребовалось перераспределить на ТГК «Прогресс М-26М», который в свою очередь не смог в свой занятый отходами объём вместить все грузы. При этом объём накапливаемых отходов на станции возрос, и потребовалось время на его выравнивание посредством распределения грузов для утилизации на последующие ТГК.

Прочие аспекты планирования. Задача планирования возврата грузов на Землю аналогична задаче планирования поблочного грузопотока с той разницей, что для этих целей используются только ТПК «Союз». Поскольку масса полезной

нагрузки в спускаемой капсуле не превышает 100 кг, а номенклатура спускаемых грузов включает только результаты выполнения КЭ и личные предметы экипажа, то планирование возврата грузов занимает меньше времени по сравнению с задачей согласования грузопотока. Потеря ТГК «Прогресс М-27М» не внесла существенных корректив в набор спускаемых грузов для ТПК «Союз ТМА-15М».

Планирование рабочего времени экипажа осуществляется в несколько стадий. На первом этапе на основе дат экспедиций и состава экипажа из программы полета выполняется предварительный расчёт затрат времени экипажа по нормативным категориям. В дальнейшем оперативное планирование полетных операций формируется специалистами ЦУП на основе различных правил, требований и предпочтений. Поскольку планы полетных операций формируются и пересматриваются каждый день, потеря ТГК «Прогресс М-27М» не оказала на них критического влияния на долгосрочный горизонт.

Проведение экипажем сеансов КЭ в рамках реализации программы НПИ зависит от множества факторов, таких как готовность НА и их доставка на борт станции, наличие необходимых резервов по времени экипажа и электроэнергии для выполнения сеансов, особенностей проведения КЭ и индивидуальных предпочтений экипажа. Среди утерянных на ТГК «Прогресс М-27М» грузов находилось оборудование для проведения ряда запланированных к выполнению КЭ в экспедицию 44/45, большая часть которых (около 80%) представляла собой расходные материалы и смогла быть оперативно восполнена на следующем ТГК «Прогресс М-28М». По ряду КЭ для их проведения было принято решение о продлении срока использования, имеющихся на борту НА и служебного оборудования, и лишь в 10% случаев потребовалось отложить проведение КЭ на период изготовления и доставки новой НА для замены утраченных изделий.

Использование МАС «Грузопоток» позволило упростить процесс планирования, добавило возможность создания нескольких версий планов с различными исходными параметрами и быстрого сравнения их между собой. Полученные от специалистов «РКК «Энергия» оценки показывают, что МАС «Грузопоток» положительно зарекомендовала себя как при штатной работе, так и

при необходимости срочного согласования и корректировки планов при возникновении нештатных и аварийных ситуаций.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Определены основные требования к разработке МАС «Грузопоток», которая должна поддерживать полный цикл управления ресурсами: реакцию на события, планирование, исполнение, контроль и анализ.

2. Определены назначение, цели и задачи создания и использования МАС «Грузопоток», разработаны основные функциональные возможности.

3. Разработана архитектура МАС «Грузопоток», которая построена как набор отдельных модулей планирования (программы полетов, поблочного грузопотока, размещения грузов на МКС, возврата грузов и их утилизации, расчета ресурсов для прогноза расхода топлива, воды, продуктов питания и прочих расходуемых ресурсов на МКС и расчета времени экипажа), которые также могут осуществлять согласование решений через протоколы взаимодействий. При этом событие в одном из модулей планирования может повлиять на расчеты в других модулях.

4. Дано описание виртуального мира модулей планирования, где в процессе переговоров агентов может развиваться вспыхивающая «цепная реакция» перестановок, которая будет захватывать и менять принятые ранее решения.

5. Приведено описание применения МАС «Грузопоток» для адаптивного перепланирования программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС на примере потери ТГК «Прогресс М-27М».

4 РЕАЛИЗАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОМ РС МКС

4.1 Группы пользователей МАС «Грузопоток» и их функции

Основными пользователями МАС «Грузопоток» являются: проектанты, кураторы, наблюдатели, системный администратор и ответственные исполнители.

Для каждой роли пользователей определены функции, которые могут корректироваться и дополняться в процессе эксплуатации МАС «Грузопоток» (табл. 4.1). Подробное описание функций по каждой из ролей приведено в соответствующих инструкциях и руководствах пользователей.

Таблица 4.1 – Роли пользователей и их функции

| Роли и подразделения | Функции |
|---|---|
| Проектанты – отдел проектантов | <ul style="list-style-type: none"> – Расчет модели грузопотока. – Создание программы полета. – Планирование поблочного грузопотока. – Проведение анализа программы полета и грузопотока, поиск вариантов перепланирования и обоснование изменений в плане грузопотока. – Формирование отчетов и извещений об изменениях. – Расчет ресурсов (топлива, воды, питания и пр.). – Планирование размещения грузов на станции. – Планирование возврата и утилизации грузов. – Разрешает доступ куратору к программе полета и грузопотоку. – Выпуск извещений на изменение. |
| Кураторы – отделы кураторов | <ul style="list-style-type: none"> – Доступ на чтение к программе полета и грузопотоку. – Формирование заявок на доставку грузов. – Формирование заявок на возврат и утилизацию грузов. – Редактирование онтологии грузопотока в зоне своей ответственности. – Расчет ресурсов (только воды и контейнеров питания). |
| Наблюдатели – руководители и специалисты подразделений | <ul style="list-style-type: none"> – Просмотр утвержденных программы полета и грузопотоков без возможности редактирования. – Формирование отчетов. |
| Системный администратор – обеспечивающая служба | <ul style="list-style-type: none"> – Обеспечение функционирования МАС «Грузопоток». – Развертывание новых версий МАС «Грузопоток» по заявке проектантов. – Управление учетными записями пользователей, предоставлении им полномочий (ролей) на доступ к данным по запросу проектантов. – Ведение справочника организационной структуры РКК «Энергия». – Назначение куратора ответственным за бортовые системы станции. |

Разграничение ответственности между пользователями МАС «Грузопоток»:

– проектанты – отвечают за разработку программы полета и планирование грузопотока на основании заявок, поступающих от кураторов;

– кураторы – отвечают за доставку на станцию, возврат и утилизацию конкретных грузов и курируемых бортовых систем станции, могут просматривать и вносить изменения только в те системы и подсистемы поблочного грузопотока, за грузы которых они отвечают;

– наблюдатели – разрешен только просмотр утвержденных планов, программ полета и грузопотоков без возможности редактирования;

– системный администратор – разрешены операции по добавлению, редактированию и удалению пользователей системы, назначению пользователю роли путем её выбора из набора ролей, predeterminedенных в МАС «Грузопоток», ведению справочника организационной структуры РКК «Энергия»;

– ответственные исполнители по подсистемам – разрешены операции по просмотру в режиме чтения онтологии поблочного грузопотока, а также закрепление за кураторами прав доступа к конкретным подсистемам и грузам онтологии поблочного грузопотока (зоны ответственности).

4.2 Процессы использования МАС «Грузопоток»

Определены один основной процесс и два поддерживающих процесса использования МАС «Грузопоток» пользователями. Основной процесс «Построение программы полета, поблочного грузопотока и расчета ресурсов РС МКС» обеспечивает решение основных задач МАС «Грузопоток». Поддерживающий процесс «Заполнять и поддерживать в актуальном состоянии онтологии» обеспечивает обновление сведений для процесса создания программы полета и грузопотока РС МКС, поскольку актуальные данные онтологии являются основой для корректного планирования грузопотока на станцию. Поддерживающий процесс «Использовать механизм заявок» необходим для обеспечения взаимодействия проектантов и кураторов.

Подпроцессами основного процесса «Построение программы полета, поблочного грузопотока и расчета ресурсов РС МКС» являются следующие (соответствуют подсистемам МАС «Грузопоток»): расчет модели грузопотока, построение программы полета, планирование поблочного грузопотока, стратегическое и тактическое планирование доставок и расхода топлива,

планирование доставок воды, рационов питания и других СОЖ, планирование времени экипажа, планирование размещения возврата и утилизации грузов.

Подпроцессами поддерживающего процесса «Заполнять и поддерживать в актуальном состоянии онтологии» являются заполнение и поддержание в актуальном состоянии онтологий программы полета, поблочного грузопотока, зон размещения грузов, приоритетов размещения грузов по зонам хранения станции, типов операций, расходов топлива на динамические операции, баков для топлива и воды на станции, времени экипажа, утилизации грузов.

Подпроцессами поддерживающего процесса «Использовать механизм заявок» являются: просмотр утвержденной версии программы полета и утвержденной версии поблочного грузопотока, формирование куратором заявок на доставку, возврат или утилизацию груза, удовлетворение или отклонение проектантом заявки куратора.

4.3 Основные модули МАС «Грузопоток»

МАС «Грузопоток» [137] состоит из взаимосвязанных модулей [138], каждый из которых обеспечивает формирование и контроль реализации планов по одному из аспектов снабжения и поддержки станции.

Модуль «Программа полета» представляет план распределения по датам стартов полетов ТК и их стыковок к портам станции. Допускается проводить ручную коррекцию дат стартов, стыковок и отстыковок ТК и менять порт стыковки при необходимости. Также имеется возможность указывать информацию об участниках экспедиций и задачах выполнения ВнеКД, что позволяет всем заинтересованным специалистам в рамках рабочего места «Наблюдатель» видеть всю необходимую информацию по программе полета. Модуль позволяет осуществлять автоматическое планирование программы полёта, а также выполнять моделирование планов для различных ситуаций.

Модуль «Время экипажа» предназначен для расчёта времени по основным категориям операций экипажа на станции для каждой экспедиции. Расчёты осуществляются с привязкой к программе полёта, что позволяет своевременно учитывать вносимые изменения в план полётов.

Модуль «Поблочный грузопоток» представляет детальную информацию о доставляемых на станцию грузах с разбивкой по полётам ТК. Модуль позволяет формировать грузопоток в автоматическом режиме с учётом большого количества разнообразных критериев.

Модуль «Размещение» предназначен для планирования размещения доставляемых на станцию грузов в зоны хранения модулей РС МКС. При планировании используются фактические данные о текущем размещении грузов на борту для определения занятых и свободных объёмов в модулях РС МКС. На основе данных о свободных объёмах, с учётом истечения срока годности грузов и приоритетных зон размещения грузов осуществляется автоматическое распределение доставляемых грузов по зонам хранения станции.

Модуль «Возврат» предоставляет детальную информацию о возвращаемых со станции на Землю грузах с разбивкой по полётам ТПК.

Модуль «Утилизация» предназначен для формирования детальных наборов отходов для утилизации со станции на ТГК.

Модуль «Расчёт ресурсов» предназначен для прогнозирования расходов топлива, воды, продуктов питания и прочих расходуемых ресурсов на станции в зависимости от полетных операций, количества экипажа, а также доставок грузов и прочих ресурсов на РС МКС.

Модуль «Онтология» предназначен для описания МКС посредством набора онтологий, используемых при планировании. Так, например, при размещении грузов используется информация о конфигурации станции (объёмы зон хранения РС МКС), сведения о доставляемых грузах (масса, габариты, признаки вложенности), о приоритетах размещения грузов по зонам хранения РС МКС.

4.4 Автоматизированные рабочие места МАС «Грузопоток»

В МАС «Грузопоток» предусмотрены АРМы проектантов, кураторов, специалистов ЦУП, наблюдателей, менеджеров и администратора. Каждый АРМ представляет собой клиентское приложение, которое в интерактивном режиме обеспечивает взаимодействие с пользователем (рис. 4.1).

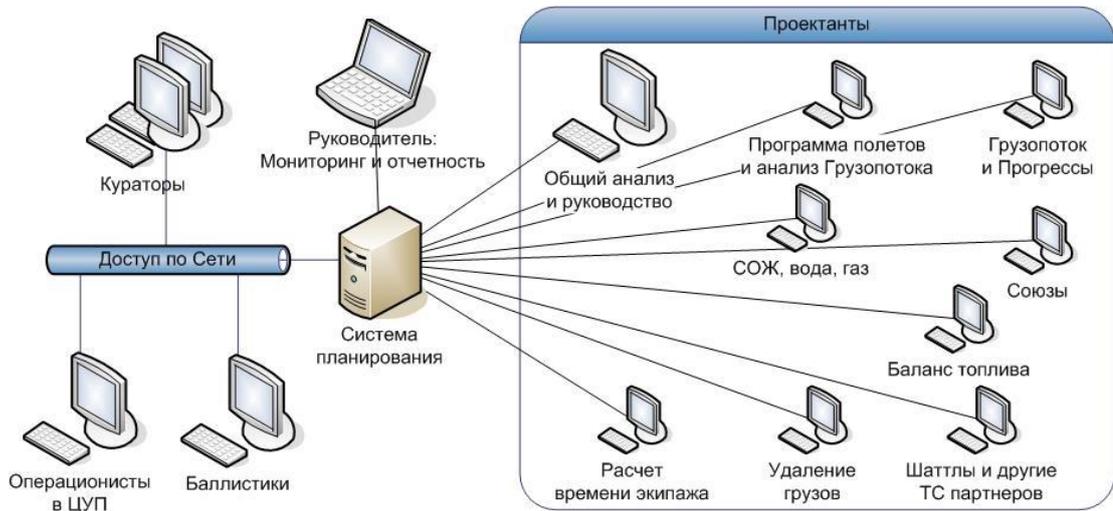


Рисунок 4.1 – Взаимодействие основных пользователей по планированию и согласованию программы полета и грузопотока

АРМ проектантов отвечает за различные модули планирования и обеспечивают построение планов программы полетов, грузопотока, размещения, возврата и утилизации грузов. АРМ проектантов также предоставляет возможность обрабатывать входящие задачи, проводить расчёты, принудительно распределять грузы по полетам ТК в критических случаях, отмечать прогресс выполнения, инициировать перепланирование, задавать предпочтения и выполнять другие функции для согласования решений, редактировать справочные данные системы. АРМ проектанта включает в себя: подсистему расчета модели грузопотока; подсистему построения программы полета; подсистему планирования поблочного грузопотока; подсистему стратегического и тактического планирования доставок и расходов топлива; подсистему планирования доставок воды, рационов питания и других средств жизнеобеспечения экипажа; подсистему планирования возврата и утилизации грузов; подсистему планирования размещения грузов; подсистему планирования времени экипажа; подсистему редактирования онтологии грузопотока.

АРМ кураторов предназначен, в первую очередь, для просмотра программы грузопотока и формирования заявок. При создании заявки куратор получает возможность просматривать различные варианты планирования заявки и выбирать лучший из них. Также куратор может получать контекстно-зависимую помощь. АРМ куратора включает в себя: подсистему построения программы полета (только

чтение); подсистему редактирования онтологии грузопотока (чтение и редактирование); подсистему планирования поблочного грузопотока (только чтение); подсистему формирования заявок на грузопоток, возврат и утилизацию.

АРМ специалистов ЦУП является источником данных о фактическом исполнении плана грузопотока, сообщая сведения о фактическом расходовании грузов, топлива и воды на МКС.

АРМ наблюдателя включает только просмотр утвержденных планов, программ полета и грузопотока без возможности редактирования.

АРМ менеджера предоставляет возможность задавать управляющие параметры и просматривать результаты планирования. Для отображения программы полета с взаимозависимостью полетов ТК во времени используется специализированная диаграмма Ганта. Для отображения поблочного грузопотока планов размещения, возврата и утилизации грузов используются специализированные таблицы, результаты расчета ресурсов РС МКС предоставляются через специализированные графики и диаграммы. АРМ менеджера по системам включает в себя: подсистему редактирования онтологии грузопотока (только для назначения зоны ответственности кураторов, входящих в подразделение ответственного исполнителя согласно существующей организационной структуре).

АРМ системного администратора включает в себя: подсистему администрирования (редактирование учетных записей пользователей, присваивание пользователю роли); подсистему ведения справочника организационной структуры РКК «Энергия».

Ниже представлены примеры основных экранов разработанной МАС «Грузопоток» (рис. 4.2-4.6). Можно создавать и сравнивать различные версии программы полета, под каждую ее версию строить планы грузопотока, размещения, возврата и утилизации грузов. Разработанные планы становятся доступными для согласования и уточнения кураторами.

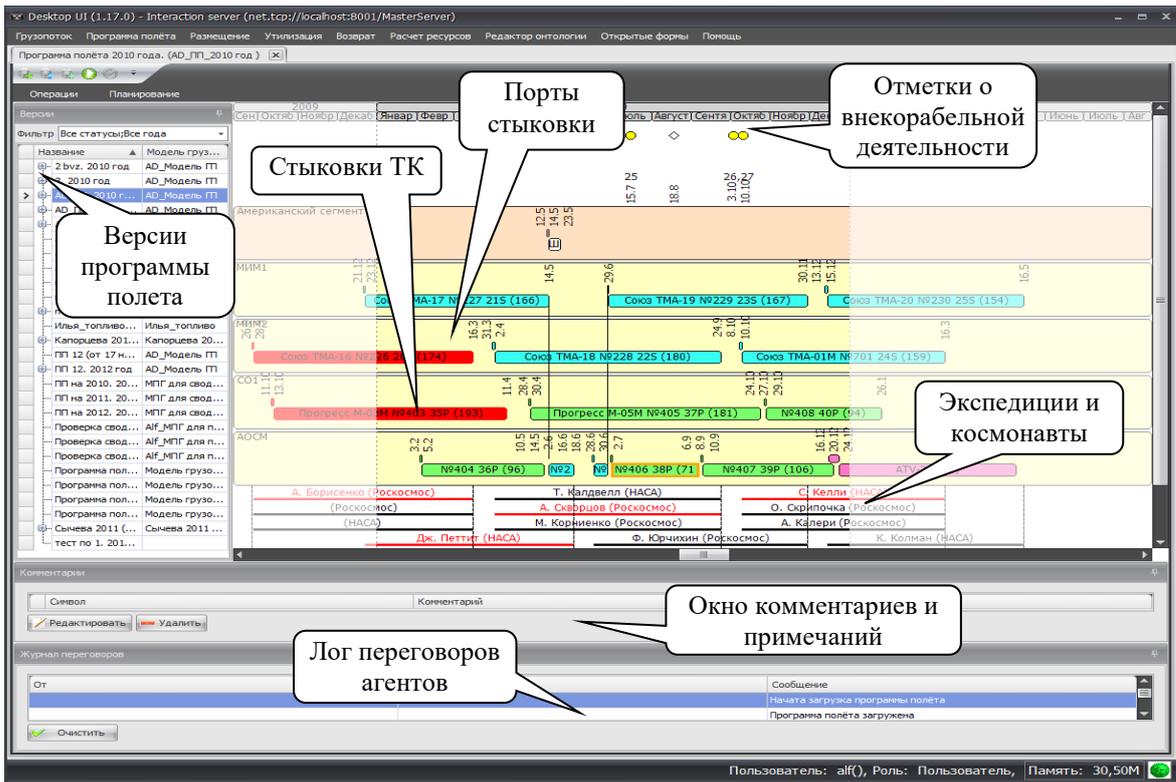


Рисунок 4.2 – Интерактивный редактор программы полета

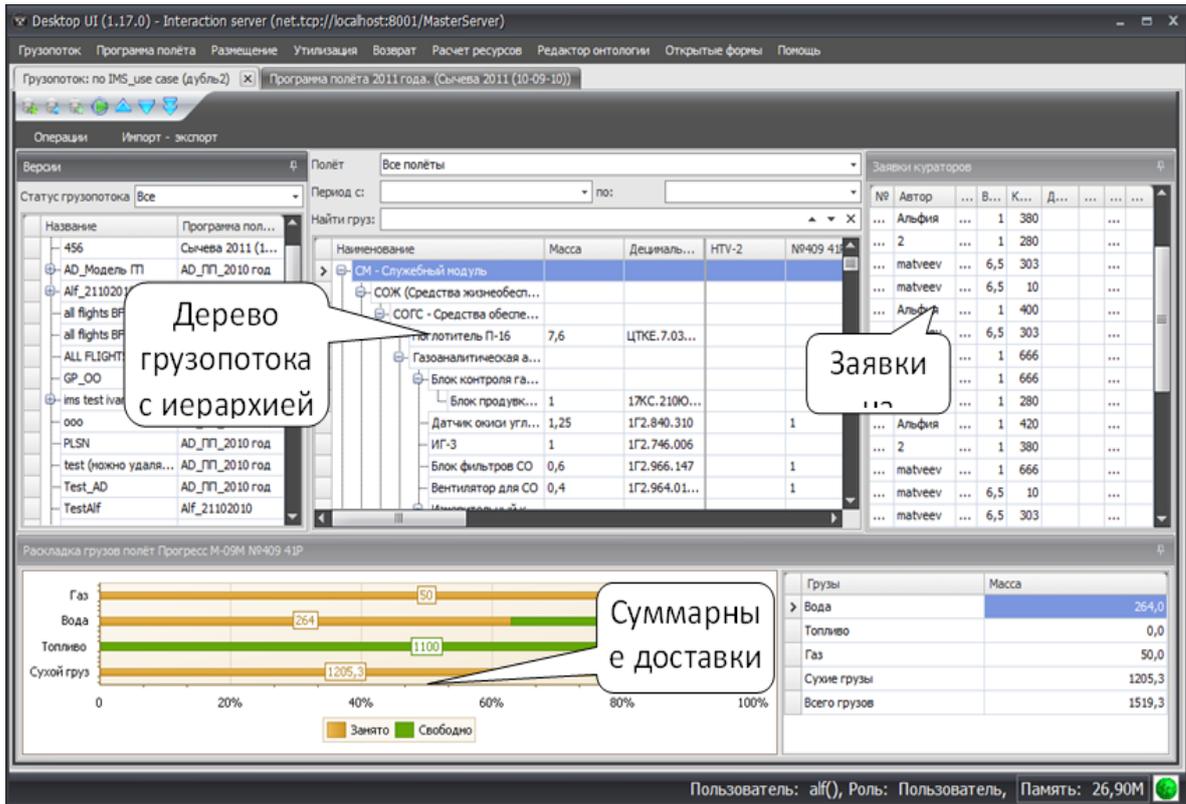


Рисунок 4.3 – Интерактивный редактор поблочного грузопотока

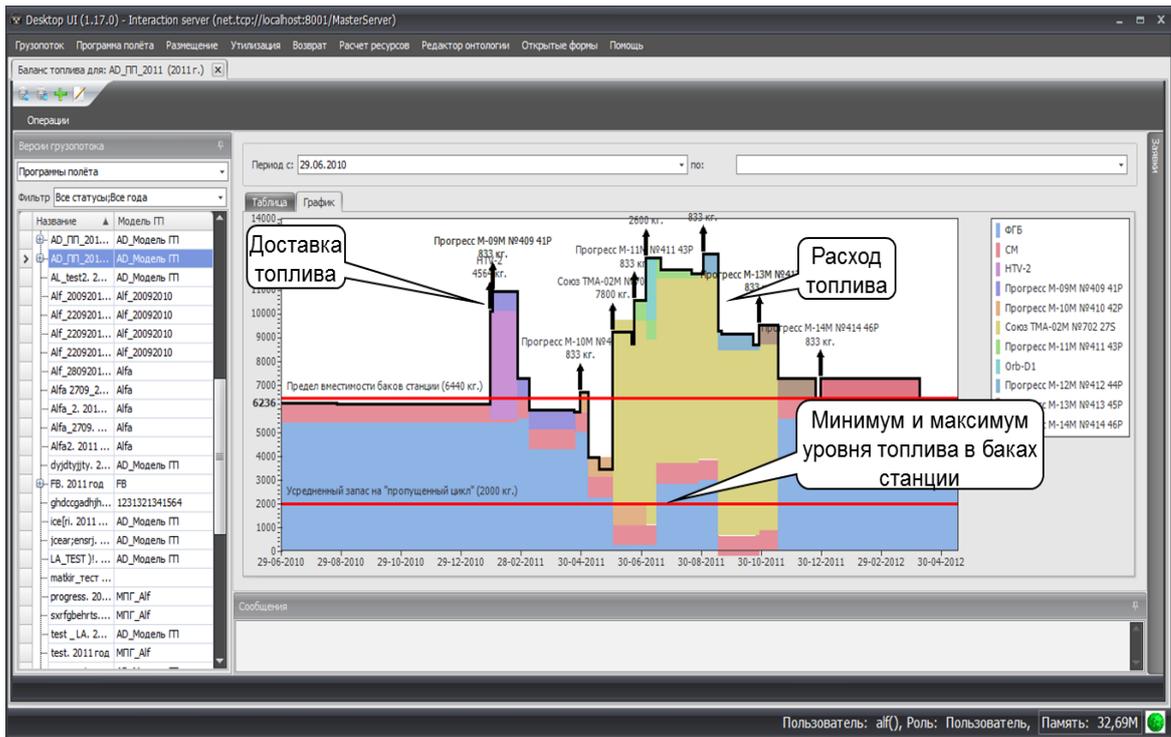


Рисунок 4.4 – Интерактивный расчет ресурсов МКС. Баланс (расход и доставка) топлива

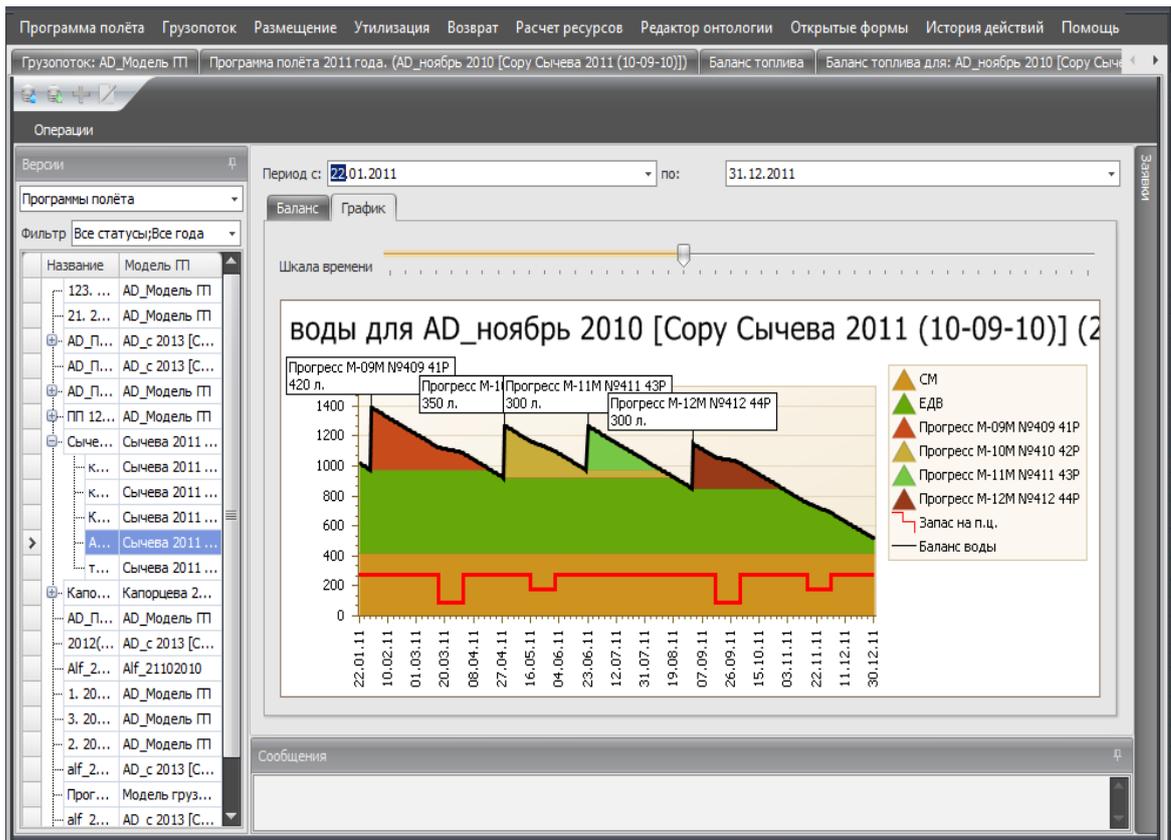


Рисунок 4.5 – Интерактивный расчет ресурсов МКС. Баланс (расход и доставка) воды

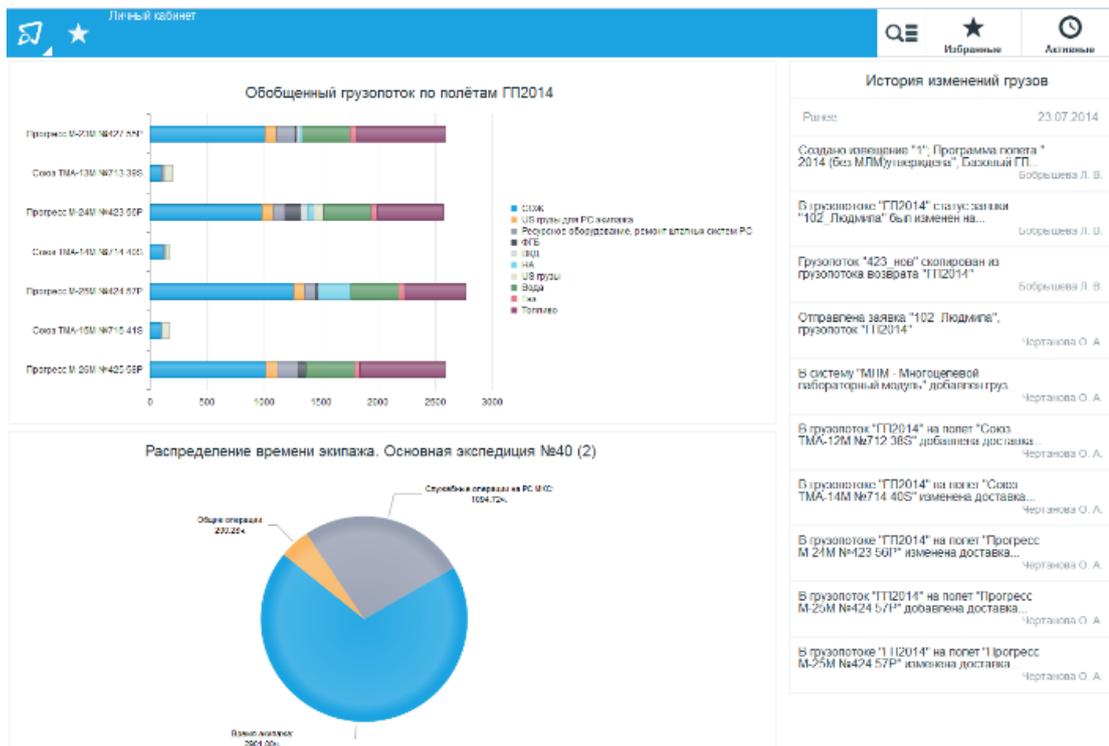


Рисунок 4.6 – Персональный бизнес-радар руководителя (веб-версия)

МАС «Грузопоток» обеспечивает для пользователя построение различных отчетов и предоставляет бизнес-радары с основными показателями эффективности.

4.5 Интеграция МАС «Грузопоток» в информационную среду РКК «Энергия»

МАС «Грузопоток» интегрирована с системой управления инвентаризацией МКС (IMS – Inventory Management System), автоматизированной системой планирования (АСП РС МКС), PLM/PDM/PM-системой Windchill, которая пришла на смену проектной базе данных (ПБД) и другими, что позволяет поддержать единую информационную среду управления грузопотоком.

IMS (Inventory Management System) – это система управления инвентаризацией МКС, которая отвечает за текущее размещение грузов на станции. Из системы IMS поступают данные о текущем размещении грузов на станции, используется для периодического обновления информации о запасах грузов на станции и местах их хранения.

Автоматизированная система планирования (АСП РС МКС) [139] – это система управления полетными операциями космонавтов на станции. С АСП РС МКС интеграция осуществлена в обе стороны, по запросу пользователей

передаются в АСП РС МКС данные по программе полета и планируемых затратах времени экипажа, обратно из АСП РС МКС передаются данные о фактических затратах времени экипажа, временах стартов, стыковок, расстыковок и т.п.

Windchill – PLM/PDM/PM-система корпорации. Используется для получения актуальной информации о модулях и системах, подсистемах и блоках. Пришла на смену проектной базе данных (ПБД).

Для доступа к данным IMS был реализован веб-сервис с сигнатурой *List<IMSRecord> GetIMS (DateTime Date)*, возвращающий пустой список в случае, если параметр «Date» больше, чем дата последнего обновления в МАС «Грузопоток» перечня данных из системы IMS, и возвращающий полный перечень данных полученных в ходе последнего обновления МАС «Грузопоток» данных из IMS, в случае, если дата такого обновления больше параметра «Date».

Обмен данными между МАС «Грузопоток» и АСП РС МКС осуществляется через веб-службу EnergyService. Обмен данными инициируется по запросу пользователя АСП РС МКС. Для передачи данных был использован веб-сервис Windows Communication Foundation (WCF), используемый для обмена данными между приложениями, входящими в состав .NET Framework.

Для интеграции с ПБД на стороне ПБД создан запрос View для возвращения необходимых данных, при этом при обращении к ПБД происходит единоразовая (в рамках одного добавления груза) выборка всех данных, в дальнейшем клиент работает с уже загруженными данными. Для интеграции с Windchill также созданы соответствующие запросы для получения необходимой актуальной информации.

4.6 Результаты и оценка эффективности внедрения МАС «Грузопоток»

На сегодняшний день МАС «Грузопоток» разработана, внедрена и находится в штатной эксплуатации в РКК «Энергия», где обеспечивает одновременную и согласованную работу 8 основных проектантов, более 120 кураторов грузов и других управленцев [140]. Около 200 пользователей ежедневно используют МАС «Грузопоток» в своей работе. В число основных пользователей МАС «Грузопоток» входят: руководство отделений, проектные подразделения, кураторы подсистем

станции, сотрудники отделов оперативного планирования, а также ряд сотрудников других отделов корпорации.

Внедрение МАС «Грузопоток» обеспечило следующие результаты:

1. Введенные данные по грузам и структуре РС МКС используются повторно, что привело к росту производительности труда участников процесса планирования.

2. Автоматизированы все основные рутинные операции, что снижает трудоемкость планирования.

3. Поддерживается полный цикл формирования планов по снабжению РС МКС: от составления программы полета до создания плана утилизации грузов.

4. МАС «Грузопоток» интегрирована в информационное пространство РКК «Энергия»: фактические данные о размещении грузов на МКС передаются из IMS, поблочный состав изделия передается из Windchill, данные о программе полета передаются в АСП РС МКС и в автоматизированную систему организации оперативных работ (АС ООР).

5. Впервые появилась возможность формировать резервные планы на случай возможных нештатных ситуаций, при возникновении которых возможно произвести перепланирование в кратчайшие сроки.

6. Появилась возможность на основании имеющихся фактических данных и сформированного плана прогнозировать расход на станции воды, топлива, продуктов питания и прочих расходуемых ресурсов. Стало возможным учитывать необходимые для поддержания штатного запаса ресурсов грузы в плане доставки заблаговременно, а также планировать изменение потребностей в случае различных событий (потеря или задержка ТГК, задержка ТПК с доставкой нового экипажа, внеплановое ВнеКД и др.).

7. Ввиду особой значимости программы полёта для формирования прочих планов (время экипажа, топливо, вода, пища и т.д.), своевременная актуализация изменений в программе полёта позволяет экономить время при планировании поблочного грузопотока, расчёта ресурсов и утилизации.

8. Автоматическое создание программы полёта позволило минимизировать количество человеческих ошибок по сравнению с ручным составлением.

9. Благодаря работе проектантов и кураторов в одном информационном пространстве, значительно улучшилось качество выпускаемой документации. Ранее исходные данные от кураторов, предоставляемые в больших количествах, зачастую отличались. Данный род ошибок удалось свести практически к нулю.

10. Ведение нормативно-справочной информации, в том числе, статистики по различным версиям планов, и возможность просмотра действительных версий и факта (утилизации грузов, расходов топлива, запасов воды и др.) прошедших лет позволило упростить доступ к данным и их наглядность, что в свою очередь снизило уровень человеческих ошибок.

11. Возможность быстрого доступа к утверждённой программе полёта сотрудников всех подразделений позволила сократить затраты времени на взаимодействие между отделами.

12. Непрерывный мониторинг сводной таблицы годового грузопотока (обобщенный грузопоток по полетам) позволяет постоянно контролировать суммарную массу грузов в части дефицита или профицита на корабле.

13. Улучшился контроль за излишним или недостающим оборудованием на борту станции за счёт отображения актуальной информации из IMS по фактическому расположению хранящегося на МКС оборудования, сравнению этой информации с требуемым запасом и требованием по пропущенному циклу для расходоуемого оборудования. Поскольку стоимость доставки на МКС одного килограмма груза может достигать 25 тысяч долларов, данное улучшение позволило получить существенный экономический эффект.

14. Новые функциональные возможности по быстрому формированию модели утилизации грузов позволяют проводить расчет в части накопления отходов на МКС и планирования их утилизации, в том числе, на ТК партнерских организаций, а также готовить аналитические справки для подготовки протоколов по балансу вкладов для руководства и специалистов ЦУП.

15. Автоматизация планирования размещения доставляемых грузов на РС МКС позволила провести радикальные изменения в процессе размещения грузов:

– МАС «Грузопоток» автоматически формирует из текущего грузопотока состав грузов для размещения для текущего ТК (ранее состав грузов для ТК определялся вручную для каждой из множества позиций грузопотока);

– появилась возможность анализа доступности размещения грузов посредством автоматического расчёта свободных объемов в зонах хранения модулей РС МКС с учетом фактических данных из IMS, а также прогнозирования потребностей в свободных объёмах в будущем;

– при планировании размещения учитывается информация об окончании сроков использования уже хранящихся на борту изделий, что позволило использовать объемы этих грузов для размещения вновь доставляемых, а также выдавать соответствующие рекомендации по размещению грузов экипажу;

– функциональные возможности МАС «Грузопоток» повысили информативность и консистентность данных между различными подсистемами за счет возможности переопределения габаритов грузов с сохранением этих данных во всех последующих отчетах IMS, используемых для расчета объемов хранения, что повысило качество и эффективность расчетов.

С целью оценки эффективности результатов внедрения МАС «Грузопоток» были проведены тестовые замеры и анкетирование руководителей, проектантов и кураторов РКК «Энергия», которые показывают, что формирование грузопотока теперь выполняется примерно в 8 раз быстрее; среднее количество корректно размещенных грузов на ТК составляет около 95% от исходного множества по сравнению с Excel планированием; фиксируется существенное сокращение времени работы команды на подготовку планов – общая экономия времени по сравнению с «ручным» планированием по результатам использования системы в течение двух лет составила около 2094 часов или в среднем 262 рабочих дня в год.

Применение МАС «Грузопоток» позволило получить важные преимущества, которые могут быть выражены в числовых показателях (рис. 4.7):

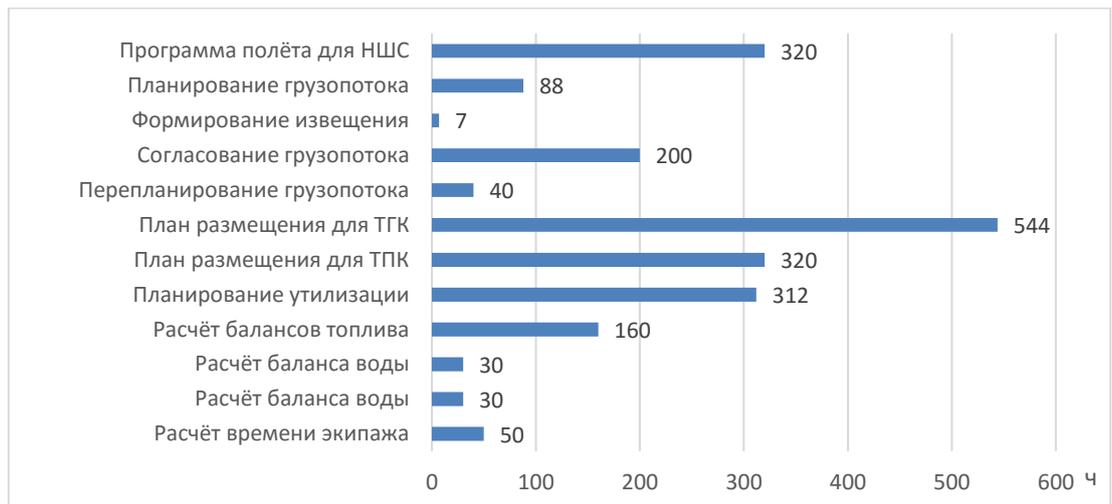


Рисунок 4.7 – Экономии времени сотрудников по видам деятельности

1. Стало возможным автоматическое создание первой версии годового грузопотока с учетом актуальных данных по хранящимся на станции грузам и расчета по нормам потребления ресурсов. Время на создание первой версии грузопотока, анализ, принятие заявок от кураторов и согласование снизилось с 352 часов в год (176 часов – создание, анализ и принятие заявок в бумажном виде и 176 часов – согласование) до 264 часов (8 часов – создание, 80 часов – принятие заявок, 176 часов – согласование), составив общую экономию 88 часов в год.

2. Извещения об изменениях программы полёта и грузопотока формируются и рассылаются в автоматическом режиме. Срок создания одного извещения сократился с 8 часов до 1 часа при том, что каждый месяц рассылаются десятки извещений.

3. Постоянно доступные для кураторов и наблюдателей актуальные данные грузопотока не требуют пересоздания грузопотока с учетом изменений и повторной отправки всем пользователям. Экономия времени составила 50 часов для каждого ТК «Прогресс» или 200 часов в год.

4. Возможность автоматического перепланирования грузопотока в случае нештатных ситуаций, связанных с потерей корабля, позволяет сэкономить до 40 часов, что особо критично в случае возникновения подобной нештатной ситуации.

5. Время формирования резервной программы полёта на случай нештатных ситуаций с учётом расчета ресурсов сократилось на 320 часов в год.

6. Время на составление планов размещения снизилось с 264 часов до 128 часов, составив экономию до 136 часов для каждого ТК «Прогресс», т.е. до 544 часов в год, и 80 часов для каждого ТК «Союз», или 320 часов в год.

7. Возможность автоматического сравнения предоставляемых специалистами ЦУП фактических отчётов об утилизации грузов с данными IMS и их проверки на наличие дублирования грузов сократило время работы на 78 часов для одного ТК «Прогресс» или 312 часов в год.

8. За счёт использования сведений из программы полета при формировании планов баланса топлива, воды, пищи и расчета времени экипажа, экономия времени при расчетах составила от 10% до 15% для каждого модуля планирования: экономия при расчете тактического баланса топлива для годичной программы полёта – 160 часов в год; экономия при расчёте баланса воды – 30 часов в год; экономия при расчёте баланса пищи – 30 часов в год; экономия при расчёте времени экипажа – 50 часов в год.

Высвободившееся время высококвалифицированных специалистов стало возможно использовать для формирования резервных версий программ полёта и прочих планов на случай возникновения различных нештатных ситуаций (перенос даты запуска, потеря ТК «Прогресс», повреждение стыковочного отсека станции и др.), что ранее было труднореализуемо ввиду высокой трудоёмкости процесса. Таким образом, заранее закладываются сценарии действий на случай непредвиденных ситуаций, позволяющих избежать излишней спешки и ошибок при срочном составлении нового плана в условиях нештатных ситуаций.

По оценкам экспертов и специалистов РКК «Энергия», МАС «Грузопоток» обеспечивает более высокое качество и оперативность построения планов по сравнению с системой Consolidated Planning System, разработанной в NASA.

Ключевым результатом внедрения МАС «Грузопоток» для повышения надежности и безопасности эксплуатации МКС является возможность автоматизированного построения и ведения планов грузопотока, а также моделирования различных вариантов расписания ТК и грузов, что уменьшает трудоемкость планирования. Кроме того, эффектом внедрения является

сокращение времени на согласование решений между заинтересованными участниками. Эти возможности помогают свести к минимуму возможные риски при эксплуатации РС МКС и заранее быть готовыми к возникновению непредвиденных событий.

4.7 Перспективы развития МАС «Грузопоток»

Созданная в ходе реализации проекта МАС «Грузопоток» является уникальной в своём роде, обеспечивая адаптивное планирование по непредвиденным событиям в сочетании с контролем исполнения планов, где отличающиеся от запланированных фактические результаты также приводят к изменению и уточнению актуальных версий планов в реальном времени.

В перспективе развития МАС «Грузопоток» более тесная интеграция с другими системами и разработка сетевых механизмов взаимодействия различных корпоративных систем РКК «Энергия» для согласованного формирования и корректировки планов различных подразделений предприятия.

Другие направления развития МАС «Грузопоток»:

1. Перевод версии рабочее место «Наблюдатель» на web-платформу, что позволит всем сотрудникам, своевременно получать актуальную информацию о последних изменениях в утверждённых к реализации версиях планов.

2. Доступ к МАС «Грузопоток» через мобильные устройства предоставляет руководству возможность постоянно находиться в курсе последних изменений планов из любого места без предварительной установки клиентской части.

3. Создание личного кабинета и бизнес-радар для руководства позволяет проводить анализ ситуации и получать опережающие прогнозы для раннего выявления и разрешения потенциальных проблем.

4. Локализация рабочего места «Наблюдатель» позволит оперативно уведомлять сотрудников зарубежных партнёрских организаций об утверждённых и согласованных изменениях планов и программ полета на РС МКС.

5. Отображение полной информации о жизненном цикле груза: макет изделия, различные версии изделия на стадии разработки, конструкторская документация, дата доставки на борт станции, история размещения на борту МКС

и использования в НПИ, наработка и ресурсопотребление, текущее местоположение единицы груза и планируемые сроки его утилизации.

7. Интеграция с системой управления ресурсами РС МКС позволит учитывать потребности НА в ресурсах МКС при проведении КЭ и повысит качество использования ресурсов станции в процессе эксплуатации.

8. Интеграция с МАС формирования и реализации программ НПИ на РС МКС позволит более подробно указывать условия доставки и спуска грузов, задействованных в проведении на борту станции КЭ, и способствовать повышению количества успешно проведённых сеансов КЭ за период каждой экспедиции.

9. Управление на основе знаний – в основу всех интегрируемых систем закладывается распределённая база знаний. Наличие регулярно обновляемого хранилища на основе онтологий, позволит использовать как традиционные справочники статичных данных, так и сложные логические зависимости между объектами, состояние которых может влиять на конечный результат планирования.

10. Развитие механизмов согласования решений за счет учета и поиска баланса интересов новых агентов (важность груза, себестоимость доставки, важность и стадия выполнения КЭ, ресурсопотребление, надёжность и др.). При этом многокритериальное планирование может быть гомеостатическим: система может ситуативно «оптимизировать» план под ряд противоречивых критериев (чем хуже по критерию ситуация – тем важнее добиться улучшения).

11. Интеллектуальное реагирование на события – используя интеграцию с другими системами, подсистема планирования сможет отслеживать сообщения о приходящих событиях и их влияние на текущий план, после чего выдавать уведомления в случае необходимости перепланирования.

12. Развитие в части умного Интернета вещей в рамках концепции INDUSTRY 4.0.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Разработана и реализована МАС «Грузопоток» для РКК «Энергия», включая основные модули, базы данных и интерфейсы АРМов пользователей.

3. В МАС «Грузопоток» предусмотрены АРМы проектантов, кураторов, специалистов ЦУП, наблюдателей, менеджеров и администратора. Каждый АРМ представляет собой клиентское приложение, которое в интерактивном режиме обеспечивает взаимодействие с пользователем.

4. МАС «Грузопоток» интегрирована с системой управления инвентаризацией МКС IMS (Inventory Management System), автоматизированной системой планирования АСП РС МКС, PLM/PDM/PM-системой Windchill.

5. МАС «Грузопоток» внедрена в штатную эксплуатацию в РКК «Энергия», обеспечивает согласованную работу 8 проектантов и более 120 кураторов грузов.

6. Проведена оценка эффективности результатов внедрения МАС «Грузопоток», которая показала, что формирование грузопотока теперь выполняется примерно в 8 раз быстрее; среднее количество корректно размещенных грузов на ТК составляет около 95% от исходного множества по сравнению с Excel планированием; фиксируется существенное сокращение времени работы команды на подготовку планов – общая экономия времени по сравнению с «ручным» планированием по результатам использования МАС «Грузопоток» в течение двух лет, составила в среднем 262 рабочих дня в год.

7. Показаны перспективы развития МАС «Грузопоток» на основе разработки сетцентрических механизмов взаимодействия различных корпоративных систем РКК «Энергия» для согласованного формирования и корректировки планов различных подразделений предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Выявлены концептуальные и системные особенности процесса управления грузопотоком РС МКС как сложного технического объекта рассматриваемого типа.

2. Проведен анализ существующих методов и средств управления грузопотоком и показаны присущие им ограничения, затрудняющие адаптивное построение согласованных планов по событиям в реальном времени.

3. Формализована постановка задачи построения плана грузопотока МКС как поиска согласованного баланса интересов участников с учетом присущих им индивидуальных особенностей.

4. Развита модель ПВ-сети управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования и разработан модифицированный метод сопряженных взаимодействий, позволяющий находить решение по грузопотоку в балансе интересов агентов подсистем эксплуатируемого объекта, ТС, грузов и команды специалистов.

5. Предложена онтология управления грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования, реализованная для построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС, позволяющая учитывать индивидуальные особенности участников при планировании.

6. Разработана архитектура мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком сложных технических объектов.

7. Разработана модель данных, алгоритмы метода и программные средства мультиагентной системы поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС.

8. Разработанная система внедрена в РКК «Энергия» и интегрирована с корпоративными системами IMS, АСП РС МКС, Windchill, обеспечивая повышение оперативности, гибкости и эффективности процесса управления грузопотоком.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АРМ – автоматизированное рабочее место.
- АС – Американский сегмент.
- БД – база данных.
- БЗ – база знаний.
- ВнеКД – внекорабельная деятельность.
- КА – космический аппарат.
- КЭ – космический эксперимент.
- ЛПР – лицо, принимающее решения.
- МАС – мультиагентная система.
- МАС «Грузопоток» – мультиагентная система поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС (интерактивная мультиагентная система построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции).
- МАТ – мультиагентные технологии.
- МКС – Международная космическая станция.
- НА – научная аппаратура.
- НПИ – научно-прикладные исследования.
- ПАО «РКК «Энергия» – Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва».
- ПВ-сеть – сеть потребностей и возможностей.
- РС – Российский сегмент.
- РС МКС – Российский сегмент Международной космической станции.
- СОЖ – система обеспечения жизнедеятельности.
- ТГК – транспортный грузовой корабль.
- ТК – транспортный корабль.
- ТПК – транспортный пилотируемый корабль.
- ТС – транспортное средство.
- IMS (Inventory Management System) – система управления инвентаризацией МКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев, В. А. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, Е. И. Жук // Пилотируемые полеты в космос. – 2011. – № 1 (1). – С. 27-37.
2. Соловьев, В. А. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов (продолжение) / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, Е. И. Жук // Пилотируемые полеты в космос. – 2011. – № 2 (2). – С. 30-36.
3. Соловьев, В. А. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов (продолжение) / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, Е. И. Жук // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1 (3). – С. 16-27.
4. Соловьев, В. А. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов (продолжение) / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, Е. И. Жук // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 2 (4). – С. 44-51.
5. Соловьев, В. А. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов (окончание) / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, Е. И. Жук // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 3 (5). – С. 25-33.
6. Соловьев, В. А. Управление космическими полетами: учебное пособие: в 2 ч. / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Любинский; под общ. ред. Л. Н. Лысенко. – Ч. 1. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 476 с.
7. Соловьев, В. А. Управление космическими полетами: учебное пособие: в 2 ч. / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Любинский; под общ. ред. Л. Н. Лысенко. – Ч. 2. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 426 с.
8. Bellman, R. Mathematical aspects of scheduling theory / R. Bellman // Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics. – 1956. – Vol. 4. – pp. 168–205.
9. Канторович, Л. В. Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков / Л. В. Канторович, М. К. Гавурин // Проблемы повышения

эффективности работы транспорта. – М.: Л.: Издательство АН СССР. – 1949. – С. 110-138.

10. Конвей, Р. В. Теория расписаний / Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. – М.: Наука, 1975. – 360 с.

11. Бурков, В. Н. Введение в теорию управления организационными системами / В. Н. Бурков, Н. А. Коргин, Д. А. Новиков; под ред. чл.-корр. РАН Д. А. Новикова. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.

12. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков // Физматлит, 2012. – 3-е изд. – 604 с.

13. Лазарев, А. А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А. А. Лазарев, Е. Р. Гафаров. – М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 2011. – 222 с.

14. Шмелев, В. В. Динамические задачи календарного планирования / В. В. Шмелев // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 1. – С. 121-25.

15. Пригожин, И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.

16. Хакен, Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М.: Мир, 1985. – 424 с.

17. Rzevski, G. Managing Complexity / G. Rzevski, P. Skobelev. – WIT Press, March 2014. – 216 p.

18. Wooldridge, M. An Introduction to Multiagent Systems / M. Wooldridge. – Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd, 2002. – 348 p.

19. Граничин, О. Н. Распределение ресурсов в контексте мультиагентных систем / Н. В. Мальковский, О. Н. Граничин, К. С. Амелин // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16-19 июня 2014 г. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 9003-9013.

20. Городецкий, В. И. Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов // Новости искусств. интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 64-116.

21. de Weck, O. Matrix Methods for Optimal Manifesting of Multinode Space Exploration Systems / Paul T. Grogan, Afreen Siddiqi, Olivier L. de Weck // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2011. – Vol. 48, No. 4. – pp. 679-690.

22. de Weck, O. Multi-stakeholder Gaming and Simulation Environment for a Future Resource Economy in Space / Paul T. Grogan, Olivier L. de Weck // Global Space Exploration Conference, May 2012. – pp. 1-12. –<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=DD86D28B59D2DD2C4BFB37FA227B3662?doi=10.1.1.310.7544&rep=rep1&type=pdf>.

23. Новиков, Д. А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития / Д. А. Новиков. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с.

24. Виттих, В. А. Введение в теорию интересубъективного управления / В. А. Виттих // Самара: СНЦ РАН. – 2013. – 64 с.

25. Виттих, В. А. Проблемы эвергетики / В. А. Виттих // Проблемы управления. – 2014. – № 4. – С. 69-71.

26. Виттих, В. А. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах / В. А. Виттих, П. О. Скобелев // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 177-185.

27. Виттих, В. А. Метод сопряжённых взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени / В. А. Виттих, П. О. Скобелев // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 78-87.

28. Лахин, О. И. Корпоративная распределенная онтология для управления Российским сегментом Международной космической станции / Т. Г. Вакурина, О. И. Лахин, Ю. С. Юрыгина, Е. В. Симонова, Д. Н. Коршиков, А. И. Носкова // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 30 июня – 03 июля 2014 г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 435-443.

29. Лахин, О. И. Особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока Российского сегмента Международной космической станции

/ О. И. Лахин // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». – 2015. – № 3 (47). – С. 32–46.

30. Диязитдинова, А. Р. Концепция мультиагентной системы интерактивного построения программы полета и планирования грузопотока международной космической станции / А. Р. Диязитдинова, А. В. Иващенко, Е. В. Симонова, П. О. Скобелев, М. В. Сычева, И. И. Хамиц, А. В. Царев // Труды XII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 23 – 25 июня 2010 г. – 2010. – С. 686-694.

31. Лахин, О. И. Анализ событий адаптивного планирования грузопотока Российского сегмента Международной космической станции / О. И. Лахин // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6 (79). – С. 19–27.

32. Голенко, Д. И. Статические модели в управлении производством / Д. И. Голенко. – М.: Статистика, 1973. – 368 с.

33. Кузин, Б. И. Математические модели в оперативном управлении и организации дискретного производства / Б. И. Кузин, Л. Ю. Норинский. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 233 с.

34. Танаев, В. С. Введение в теорию расписаний / В. С. Танаев, В. В. Шкурба. – М.: Наука, 1975. – 256 с.

35. Мут, Дж. Ф. Календарное планирование / Дж. Ф. Мут, Дж. Л. Томпсон; пер. с англ. А. И. Гомана; под ред. В. В. Головинский. – М.: Прогресс, 1966. – 466 с.

36. Коробкин, А. Д. Оптимизация производственного планирования на предприятии / А. Д. Коробкин, Н. Б. Мироносецкий. – Новосибирск.: Наука, 1976. – 335 с.

37. Евтушенко, Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Ю. Г. Евтушенко. – М.: Наука, 1982. – 196 с.

38. Левнер, Е. В. Задача сетевого планирования в постановке "точно вовремя" и потоковый алгоритм ее решения / Е. В. Левнер, А. С. Немировский // Численные методы оптимизации и анализа. – Новосибирск.: Сиб. энерг. ин-т., 1992. – С. 18-53.

39. Boudoukh, T. Scheduling jobshops with some identical or similar jobs / T. Boudoukh, M. Penn, G. Weiss // Journal of Scheduling, 2001. – Vol. 4. – pp. 177-199.

40. Красовский, Д. В. Некоторые алгоритмы составления многопроцессорных расписаний с использованием параллельных вычислений / Д. В. Красовский, М. Г. Фуругян. – М.: ВЦ РАН, 2006. – 27 с.
41. Сергиенко, И. В. Задачи дискретной оптимизации. Проблемы, методы решения, исследования / И. В. Сергиенко, В. П. Шило. – Киев: НАУКОВА ДУМКА, 2003. – 263 с.
42. Финкельштейн, Ю. Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования / Ю. Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1976. – 264 с.
43. Емеличев, В. А. Дискретная оптимизация. Последовательные схемы решения / В. А. Емеличев // Кибернетика. – 1971. – № 6. – С. 109-121.
44. Красс, М. С. Математика для экономистов / М. С. Красс, Б. П. Чупрынов. – СПб.: Питер, 2008. – 464 с.
45. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: «Наука», 1965. – 458 с.
46. Лежнев, А. В. Динамическое программирование в экономических задачах: учебное пособие / А. В. Лежнев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 176 с.
47. Буркова, И. В. Метод дихотомического программирования в задачах управления проектами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / Буркова Ирина Владимировна. – М., 2003. – 103 с.
48. Бурков, В. Н. Метод сетевого программирования / В. Н. Бурков, И. В. Буркова, М. В. Попок, Т. И. Овчинникова // Проблемы управления. – 2005. – № 3. – С. 23-29.
49. Бурков, В. Н. Метод сетевого программирования в задачах управления проектами / В. Н. Бурков, И. В. Буркова // Управление большими системами: сборник трудов. – 2010. – Выпуск 30-1. – С. 40-61.
50. Баркалов, С. А. Математические основы управления проектами / С. А. Баркалов, В. И. Воропаев, Г. И. Секлетова и др. Под ред. В.Н. Буркова. – М.: Высш. шк., 2005. – 423 с.

51. Mu'alem, A. W. Utilization, predictability, workloads, and user runtime estimates in scheduling the IBM SP2 with backfilling / A. W. Mu'alem, D. G. Feitelson // *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions*. – № 12 (6), 2001. – pp. 529-543.
52. Nemhauser, G. L. Branch-and-bound and Parallel Computation: a Historical Note / G. L. Nemhauser, E. A. Pruul, R. A. Rushmeier // *Oper. Res. Let.*, 1988. – № 7. – pp. 65-69.
53. Land, A. H. An automatic method of solving discrete programming problems / A. H. Land, A. G. Doig // *Econometrica*. – Vol. 28 (1960). – pp. 497-520.
54. Little, J. D. C. An algorithm for the traveling salesman problem / J. D. C. Little, K. G. Murty, D. W. Sweeney, C. Karel / *Operations Research*. – Vol. 11 (1963). – pp. 972-989.
55. Метод ветвей и границ [Электронный ресурс]. М.: Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, 2006-2013. Режим доступа: http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/UFLP/uflp_bb.html.
56. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М.: Физматлит, 1958. – 336 с.
57. Хэмди, А. Таха. Введение в исследование операций / Хэмди А. Таха, 7-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
58. Канторович, Л. В. Математические методы организации планирования производства / Л. В. Канторович. – Л.: Издание Ленинградского государственного университета, 1939. – 67 с.
59. Пономаренко, В. С. Методы и модели планирования ресурсов в GRID-системах. Монография / В. С. Пономаренко, С. В. Листровой, С. В. Минухин, С. В. Знахур. – Х.: ВД «ИНЖЕК», 2008. – 408 с.
60. Акулич, И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах / И. Л. Акулич. – М.: Высшая школа, 1986. – 319 с.
61. Симплексный метод решения ЗЛП [Электронный ресурс]. М.: Новый семестр, 2006-2016. Режим доступа: <http://math.semestr.ru/simplex/simplex.php>.

62. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М.: МЦНМО, 1999. – 960 с.
63. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
64. Романовский, И. В. Алгоритмы решения экстремальных задач / И. В. Романовский. – М.: Наука, 1977. – 352 с.
65. Сергиенко, И. В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / И. В. Сергиенко. – Киев: Наук. думка, 1988. – 472 с.
66. Березовский, Б. А. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты / Б. А. Березовский [и др.]. – М.: Наука, 1989. – 128 с.
67. Burke, E. K. A University Timetabling System Based on Graph Coloring and Constraint Manipulation / E. K. Burke, D. G. Elliman, R. F. Weare // Journal of Research on Computing in Education. – 1993. – Vol. 27. – pp. 1-18.
68. Vos, S. Meta-heuristics: The State of the Art / S. Vos; In A. Nareyek (Ed.), Local Search for Planning and Scheduling, Volume 2148 of Lecture Notes in Artificial Intelligence. – Springer-Verlag, Berlin, 2001. – pp. 1-23.
69. Moccus, J. Application of Bayesian Approach to Numerical Methods of Global and Stochastic Optimization / J. Moccus // Global Optimization. – 1994. – Vol. 4. – pp. 347-356.
70. Akkoyunly, E. A. A Linear Algorithm for Computing the Optimum University Timetable / E.A. Akkoyunly // The Computer Journal. – 1973. – Vol. 16. – pp. 347-350.
71. Messmer, B.T. Efficient graph matching algorithms for preprocessed model graph / B.T. Messmer. – Switzerland: University of Bern, 1995. – 162 p.
72. Michalewicz, Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs (3rd Edn.) / Z. Michalewicz. – New York, Springer-Verlag, 1996. – 387 p.
73. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы: Учебное пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – 2-е изд. – М: Физматлит, 2006. – 320 с.
74. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы = Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte / Д. Рутковская,

М. Пилиньский, Л. Рутковский. – 2-е изд. – М: Горячая линия-Телеком, 2008. – 452 с.

75. Metropolis, N. Equation of State Calculations by Fast Computer Machines / N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, E. Teller // J. Chemical Physics. – 6 June. 1953. – 21. – pp. 1087-1092.

76. Kirkpatrick, S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, Jr. C. D. Gelatt, M. P. Vecchi // Science. – 1983. – 220. – pp. 671-680.

77. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.

78. Назаров, А. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А. В. Назаров, А. И. Лоскутов. – СПб.: Наука и техника, 2003. – 384 с.

79. Штовба, С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – М.: Изд-во Радиотехника, 2004. – № 4 (4). – С. 70-75.

80. Кажаров, А. А. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма / А. А. Кажаров, В. М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4 (81). – С. 7-12.

81. Кажаров, А. А. Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач / А. А. Кажаров, В. М. Курейчик // Известия РАН. Теории и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 32-45.

82. Shopova, E. G. BASIC – A genetic algorithm for engineering problems solution / E. G. Shopova, N. G. Vaklieva-Bancheva // Computers & Chemical Engineering. – 2006. – Vol. 30. – pp. 1293-1309.

83. Бычков, И. В. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов / И. В. Бычков [и др.] // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – №2/8. – С. 34-43.

84. Орловский, Н. М. Применение метода ветвей и границ и генетических алгоритмов к задаче планирования действий экипажа / С. П. Воробьев, Н. М. Орловский // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 6. – С. 19-27.

85. Ingber, L. Optimization of Trading Physics Models of Markets / L. Ingber, R. P. Mondescu // IEEE Trans. Neural Networks. – 2001. – № 12 (4). – pp. 776-790.
86. Yao, X. Call Routing by Simulated Annealing / X. Yao // International Journal of Electronics. – Oct. 1995. – № 79(4). – pp. 379-387.
87. Forman, M. C. Simulated Annealing for Optimisation and Characterisation of Quantisation Parameters in Integral 3D Image Compression / M. C. Forman, A. Aggoun, M. McCormick // The Institute of Mathematics and its Applications. Horwood. – 2000. – pp. 393-413.
88. Загидуллин, Р. Р. MES-системы, как они есть, или эволюция систем планирования производства / Р. Р. Загидуллин, Е. Б. Фролов // Станочный парк. – Спб.: ООО «СтанВерс», 2008. – № 10 (55). – С. 31-37.
89. Обзор решений для компаний СМБ [Электронный ресурс]. Москва, 2016. Режим доступа: <http://go.sap.com/cis/solution/sme-business-software.html>.
90. 1С: Предприятие 8 [Электронный ресурс]. Москва, 2016. Режим доступа: <http://v8.1c.ru/>.
91. Набор приложений Oracle E-Business Suite [Электронный ресурс]. Москва, 2016. Режим доступа: <http://www.oracle.com/ru/products/applications/ebusiness/overview/index.html>.
92. Основные модули ERP-системы компании BAAN IV [Электронный ресурс]. М.: Бизнес-сеть "Kinetics", 2005-2016. Режим доступа: <http://www.erp-online.ru/software/baan/>.
93. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5/ Ю. Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
94. Ивашкин, Ю. А. Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3: Учебное пособие / Ю. А. Ивашкин. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 350 с.
95. Hornstein, Rhoda S. The Consolidated Planning and Scheduling System for Space Transportation and Space Station operations – Successful development experience / Rhoda S. Hornstein, John K. Willoughby, Jo A. Gardner, Gerald L. Shinkle // 44th

International Astronautical Congress IAF, Graz, Oct 01, 1993. – Austria, Graz, 1993. – pp. 16-22.

96. Uhlig, T. Spacecraft Operations / T. Uhlig, F. Sellmaier, M. Schmidhuber. – Springer Vienna, 2015. – 425 p.

97. Petcu, A. DPOP: A scalable method for multiagent constraint optimization / A. Petcu, B. Faltings // Proc. of the 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'05). – 2005. – pp. 266-271.

98. Bowring, E. Multiply-Constrained DCOP for Distributed Planning and Scheduling / E. Bowring, M. Tambe, M. Yokoo. // In AAMAS, 2006. – Available from: http://teamcore.usc.edu/papers/2006/ss_01.pdf.

99. Pearce, J. Solving multiagent networks using distributed constraint optimization / J. Pearce, M. Tambe, R. Maheswaran // AI Magazine, 2008. – 29 (3). – pp. 47-62.

100. Meisels, A. Distributed Search by Constrained Agents / A. Meisels. – Springer London, 2008. – 216 p.

101. Mertens, K. CSAA: A distributed ant algorithm framework for constraint satisfaction / K. Mertens, T. Holvoet // Proc. of the 17th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference. – 2004. – pp. 764-769.

102. Modi, P. J. ADOPT: Asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees / P. J. Modi, W. Shen, M. Tambe, M. Yokoo // Artificial Intelligence Journal. – 2005. – 161 (1-2). – pp. 149-180.

103. Lau, H. A Multi-Agent Approach for Solving Optimization Problems involving Expensive Resources / H. Lau, H. Wang // Proc. of ACM Symposium on Applied Computing. – 2005. – pp. 79-83.

104. Le, Tiep. Solving Distributed Constraint Optimization Problems Using Logic Programming / Tiep Le, Tran Cao Son, Enrico Pontelli, William Yeoh // Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2015. – pp. 1174-1181.

105. Bessiere, C. The Asynchronous Backtracking Family / C. Bessiere, I. Brito, A. Maestre, P. Meseguer // Technical Report, LIRMM-CNRS, Montpellier, France, March 2003. – Available from: <http://www.lirmm.fr/~bessiere/stock/tr-abt.pdf>.

106. Trelea, I. C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection / I. C. Trelea // *Information Processing Letters*. – 2003. – 85. – pp. 317-325.

107. Mailler, R. Using cooperative mediation to solve distributed constraint satisfaction problems / R. Mailler, V. Lesser // *Proc. of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'2004)*. – NY: IEEE Computer Society. – 2004. – pp. 446-453.

108. Petcu, A. A class of Algorithms for Distributed Constraint Optimization / A. Petcu. – IOS Press, 2009. – 277 p.

109. Yokoo, M. Distributed Constraint Satisfaction: Foundation of Cooperation in Multi-agent Systems / M. Yokoo. – Springer. – 2001. – 143 p.

110. Rzevski, G. A practical Methodology for Managing Complexity / G. Rzevski // *Emergence: Complexity & Organization – An International Transdisciplinary Journal of Complex Social Systems*. – 2011. – Vol. 13, Nos. 1-2. – pp. 38-56.

111. Lakhin, O. Managing Aircraft Lifecycle Complexity / G. Rzevski, J. Knezevic, P. Skobelev, N. Borgest, O. Lakhin // *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*. – 2016. – WIT Press. – Vol. 11 (2016), is. 2. – pp. 77-87.

112. Скобелев, П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем / П. О. Скобелев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2010. – № 12. – С.33-46.

113. Skobelev, P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application / P. Skobelev // *Proc. of the 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011)*. – France, Toulouse, Springer, 2011. – pp. 5-14.

114. Skobelev, P. Bio-Inspired Multi-Agent Technology for Industrial Applications / P. Skobelev; In Dr. Faisal Alkhateeb (Ed.), *Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications*. – InTech., Austria, 2011. – pp. 495-535.

115. Bonabeau, E. Swarm Smarts. What computers are learning from them? / E. Bonabeau, G. Theraulaz // *Scientific American*. – 2000. – Vol. 282. – N 3. – pp. 54-61.
116. Скобелев, П. О. Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятием в реальном времени / П. О. Скобелев // *Онтология проектирования*. – 2012. – №1(3). – С. 26–48.
117. Leitao, P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents / P. Leitao, P. Vrba // *Proc. of 5th International Conf. on Holonic and Multi-Agent systems in Manufacturing, France, Toulouse, 2011.* – Springer. Berlin. – pp. 15-28.
118. Лахин, О. И. Мультиагентные технологии в интеллектуальных аэрокосмических системах / В. А. Соловьев, Г. А. Ржевский, П. О. Скобелев, О. И. Лахин // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2016. – № 1(18). – С. 63-77.
119. Лахин, О. И. Концепция создания автоматизированной системы управления пилотируемыми космическими полетами на принципах сетцентрического управления, баз знаний и мультиагентных технологий / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, П. О. Скобелев, О. И. Лахин // *Труды XVIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»*, Самара, 20 – 25 сентября 2016 г. – Самара: ОФОРТ, 2016. – С. 123-131.
120. Фрадков, А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры / А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
121. Фрадков, А. Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи / Б. Р. Андриевский, А. С. Матвеев, А. Л. Фрадков // *Автоматика и телемеханика*. – 2010. № 4. – С. 34-99.
122. Лахин, О. И. Онтология Российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях / Т. Г. Вакурина, В. В. Котеля, О. И. Лахин, М. М. Матюшин, П. О. Скобелев // *Материалы IV Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» OSTIS-2014*, 20 – 22 февраля 2014 г. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 221-226.

123. Скобелев, П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П. О. Скобелев // Автометрия. – 2002. – № 6, Т. 38. – С. 45-61.

124. Андреев, В. В. Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений / В. В. Андреев, С. В. Батищев, В. А. Виттих, К. В. Ивкушкин, И. А. Минаков, Г. А. Ржевский, А. В. Сафронов, П. О. Скобелев // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2003. – № 1. – С. 126-137.

125. Скобелев, П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01 / Скобелев Петр Олегович: СамГТУ. – М.: РГБ, 2003. – 418 с.

126. Lakhin, O. I. Approach to the solution of aerospace product lifecycle management problem based on network-centric principles / P. O. Skobelev, O. I. Lakhin, A.S. Polnikov, E. V. Simonova // V. Marik, J.I. et al. (Eds.): Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2015), September 2-4, 2015, Valencia, Spain. – HoloMas 2015, LNAI 9266. – Springer International Publishing, Switzerland, 2015. – pp. 169-178.

127. Lakhin, O. Approach to developing prototype intelligent system for support of providing safety and reliability of Progress Vehicle at the operation stage / I. Iurygina, E. Skoryupina, O. Lakhin, N. Mishurova // Proceedings of the 28th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering (CAINE 2015), October 12 – 14, 2015. – San Diego, California, USA. – pp. 103-108.

128. Лахин, О. И. Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентной технологии / О. И. Лахин, И. В. Майоров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 12. – С. 847–852.

129. Lakhin, O. Complex Adaptive Logistics for The International Space Station / G. Rzevski, V. Soloviev, P. Skobelev, O. Lakhin // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. – 2016. – WIT Press. – Vol. 11 (2016), is. 3. – pp. 459-472.

130. Лахин, О. И. Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в

сложных информационно-аналитических системах / М. М. Матюшин, Т. Г. Вакурина, В. В. Котеля, П. О. Скобелев, О. И. Лахин, С. С. Кожевников, Е. В. Симонова, А. И. Носкова // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №2(69). – С. 9-17.

131. Лахин, О. И. Методы представления знаний для решения задач моделирования / Д. Н. Коршиков, О. И. Лахин, А. И. Носкова, Ю. С. Юрыгина // Материалы V Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» OSTIS-2015, 19 – 21 февраля 2015 г. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 425-428.

132. Овдей, О. М. Обзор инструментов инженерии онтологий / О. М. Овдей, Г. Ю. Проскудина // Электронные библиотеки. – 2004. – Т. 7, вып. 4. – С. 3-19.

133. Лахин, О. И. Особенности построения онтологии для адаптивного планирования программы полета и грузопотока Российского сегмента Международной космической станции / О. И. Лахин, А. С. Полников, К. В. Редькина // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» OSTIS-2016, 18 – 20 февраля 2016 г. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 493-496.

134. Лахин, О. И. Особенности реализации интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции / О. И. Лахин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 42-46.

135. Лахин, О. И. Особенности адаптивного планирования грузопотока к Российскому сегменту Международной космической станции и обратно в случае нештатных ситуаций / О. И. Лахин, А. С. Полников, К. В. Редькина // Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 1 (86). – С. 12-19.

136. Лахин, О. И. Применение мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС при потере ТГК «Прогресс М-27М» / О. И. Лахин, А. С. Полников, К. В. Редькина // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в

космос», Звездный городок, 10 – 12 ноября 2015 г. – Звездный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 2015. – С. 115-116.

137. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610854. Интерактивная мультиагентная система построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции / В. В. Кузьмин, А. С. Полников, А. В. Перваков, А. Л. Новиков, П. О. Скобелев, Е. Е. Попова, В. П. Карбовничий, О. И. Лахин, О. С. Полиновская, К. В. Редькина, И. К. Анисимов. – Заявка № 2014619838. – Дата поступления 01 октября 2014 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20 января 2015 г.

138. Лахин, О. И. Интерактивная мультиагентная система построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции / О. И. Лахин, А. С. Полников, К. В. Редькина // Сборник статей VI Научно-технической конференции молодых учёных и специалистов Центра управления полетами, г. Королев, 07 – 09 апреля 2016 г. – Королев: ЦНИИмаш, 2016. – С. 320-329.

139. Лахин, О. И. Подход к адаптивному планированию полетных операций Российского сегмента Международной космической станции на основе мультиагентных технологий / В. И. Станиловская, А. М. Беляев, О. И. Лахин, А. И. Носкова, Д. Н. Иванова // Труды XVII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 22 – 25 июня 2015г. – Самара: СНЦ РАН, 2015. – С. 147-157.

140. Лахин, О. И. Практические результаты внедрения интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов российского сегмента МКС / А. Г. Бидеев, Н. В. Горбова, В. В. Кузьмин, Г. Н. Капорцева, О. И. Лахин, А. Л. Новиков, А. С. Полников, Е. В. Симонова, П. О. Скобелев, М. В. Сычева, Н. В. Успенская, И. И. Хамиц // Космическая техника и технологии. – 2016. – № 2 (13). – С. 62-70.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА СОПРЯЖЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРУЗОПОТОКА

Предположим, что имеется девять грузов ($\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_9$), которые необходимо доставить на МКС.

Для упрощения расчетов и восприятия примем, что все грузы имеют одинаковую массу равную 1 и одинаковую стоимость равную 1.

Грузы необходимо распределить на трех полетах ТГК (Π_1, Π_2, Π_3). Для упрощения расчетов и восприятия примем, что полеты ТГК имеют одинаковую емкость равную 3, то есть могут вместить по три груза на каждом полете ТГК.

Грузы друг от друга отличаются только диапазонами времени необходимой доставки, а полеты ТГК имеют одинаковую длительность и также характеризуются диапазонами – временем начала и окончания полета ТГК (рис. А.1).

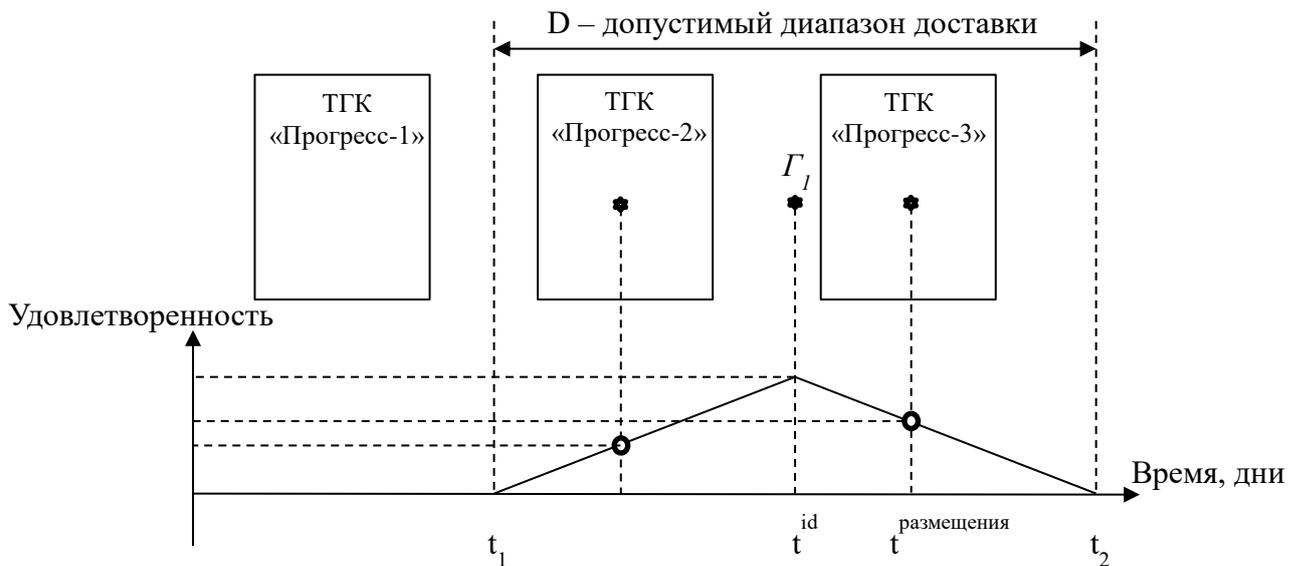


Рисунок А.1 – График изменения удовлетворенности от размещения груза

Функция удовлетворенности агентов грузов опишем формулой:

$$y(\Gamma_i) = 1 - \frac{|t^{id} - t|}{\frac{D}{2}},$$

где $y(\Gamma_i)$ – значение удовлетворенности груза i ; Γ_i – размещенный на ТГК груз i ; t^{id} – идеальное время доставки груза; t – текущее запланированное время доставки груза; D – допустимый диапазон доставки груза.

Суммарная функция удовлетворенности всех грузов определяется по следующей формуле и максимизируется:

$$Y = \sum_{i=1}^9 y(\Gamma_i) \rightarrow \max,$$

где Y – суммарная функция удовлетворенности всех грузов; Γ_i – размещенный на ТГК груз i ; $y(\Gamma_i)$ – значение удовлетворенности груза i .

Первоначальное распределение грузов по полетам ТГК осуществим случайным образом и нумерацию оставим по порядку, а диапазоны необходимой доставки грузов для простоты сделаем у семи грузов равной длины (табл. А.1).

При этом наилучшим распределением грузов являлась бы следующая ситуация: грузы $\Gamma_1, \Gamma_5, \Gamma_6$ и Γ_8 должны быть размещены на полете Π_1 ; грузы Γ_3 и Γ_4 – на полете Π_3 ; груз Γ_2 – на полете Π_2 ; груз Γ_9 – в районе полета Π_2 ; груз Γ_7 – на любом полете. Таким образом в связи с ограниченной вместимостью полетов ТГК и невозможностью достичь наилучшего размещения для всех грузов возникнут конфликты между грузами, что позволяет грузам быть достаточно активными и образовывать длинные цепочки перестановок. Данная постановка задачи позволяет рассмотреть различные варианты переговоров.

Таблица А.1 – Первоначальное случайное размещение грузов по полетам ТГК

| Полет Π_1 4 | Полет Π_2 10 | Полет Π_3 16 |
|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Γ_1 [2; 6] 4 | Γ_4 [14; 18] 16 | Γ_7 [0; 20] 10 |
| Γ_2 [8; 12] 10 | Γ_5 [2; 6] 4 | Γ_8 [2; 6] 4 |
| Γ_3 [14; 18] 16 | Γ_6 [2; 6] 4 | Γ_9 [4; 10] 7 |

В квадратных скобках (табл. А.1) около грузов ($\Gamma_1, \dots, \Gamma_2, \dots, \Gamma_9$) указаны границы допустимого окна размещения грузов D , а число после интервала, которое определяется как середина диапазона окна размещения груза, является идеальным размещением груза X^{id} . Число после полетов (Π_1, Π_2, Π_3) является центром диапазона полета ТГК и является текущим запланированным временем размещения груза X .

Создаем агентов грузов, где каждый агент вычисляет свою функцию удовлетворенности в зависимости от своего текущего размещения на полете ТГК. В начальном состоянии удовлетворенность $y(\Gamma_i)$ каждого агента груза указана в табл. А.2.

Таблица А.2 – Значения функции удовлетворенности после первоначального размещения

| Полет П ₁ | Полет П ₂ | Полет П ₃ |
|-------------------------------------|---|--|
| $y(\Gamma_1) = 1 - 0,5*(4-4) = 1$ | $y(\Gamma_4) = 1 - 0,5*(16 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_7) = 1 - 0,2*(10 - 16) = -0,2$ |
| $y(\Gamma_2) = 1 - 0,5*(10-4) = -2$ | $y(\Gamma_5) = 1 - 0,5*(4 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_8) = 1 - 0,5*(4 - 16) = -5$ |
| $y(\Gamma_3) = 1 - 0,5*(16-4) = -5$ | $y(\Gamma_6) = 1 - 0,5*(4 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_9) = 1 - 0,33*(7 - 16) = -2$ |

В начальном состоянии удовлетворенность всех грузов следующая:

$$Y = (1 - 2 - 5) + (-2 - 2 - 2) + (-0,2 - 5 - 2) = -19,2.$$

На каждом полете ТК активизируются агенты грузов с минимальной удовлетворенностью, которые ищут полет ТК ближайший к своему идеальному времени доставки. В первую очередь активизируется наиболее неудовлетворенный агент, поскольку у него наибольший потенциал для улучшения. Затем он обращается к выбранному полету ТК и запрашивает сначала агента груза также с наихудшей удовлетворенностью и договаривается с ним о возможном перемещении.

Шаг 1. На шаге 1 груз Γ_3 с удовлетворенностью -5 является наиболее неудовлетворенным и может повысить свою удовлетворенность за счет перехода на полет П₃. Однако, там все места заняты и необходимо вступить в переговоры с размещенным там на данный момент грузами. Наиболее неудовлетворенными грузами на полете П₃ являются грузы Γ_8 с удовлетворенностью -5 и груз Γ_9 с удовлетворенностью -2. Таким образом груз Γ_3 предлагает грузу Γ_8 перейти на полет П₁, в свою очередь груз Γ_8 , оценив изменение своей удовлетворенности при переходе на полет П₁, соглашается на обмен.

После перехода грузов состояние агентов по удовлетворенности будет следующее (табл. А.3). Полужирным шрифтом здесь и далее выделены грузы, которые совершили переход на другие полеты ТК.

Таблица А.3 – Состояния агентов после первой итерации переговоров

| Полет П ₁ | Полет П ₂ | Полет П ₃ |
|-------------------------------------|---|--|
| $y(\Gamma_1) = 1 - 0,5*(4-4) = 1$ | $y(\Gamma_4) = 1 - 0,5*(16 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_7) = 1 - 0,2*(10 - 16) = -0,2$ |
| $y(\Gamma_2) = 1 - 0,5*(10-4) = -2$ | $y(\Gamma_5) = 1 - 0,5*(4 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_3) = 1$ |
| $y(\Gamma_8) = 1$ | $y(\Gamma_6) = 1 - 0,5*(4 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_9) = 1 - 0,33*(7 - 16) = -2$ |

После шага 1 суммарная удовлетворенность всех грузов будет следующая:

$$Y = (1 - 2 + 1) + (-2 - 2 - 2) + (-0,2 + 1 - 2) = -7,2.$$

Таким образом общее состояние удовлетворенности всех грузов по сравнению с начальным состоянием значительно улучшилось за счет согласованных взаимовыгодных перестановок.

Шаг 2. На полете Π_1 имеется груз Γ_2 с отрицательной удовлетворенностью -2. Груз начинает искать полет ТГК наиболее удовлетворяющий его идеальному времени доставки. Таким полетом является Π_2 , на котором все грузы с отрицательной удовлетворенностью -2 и поэтому груз Γ_2 опрашивает каждого из агентов груза Γ_4 , Γ_5 и Γ_6 .

При этом груз Γ_4 дает отказ, так как при перемещении на полет Π_1 удовлетворенность груза Γ_4 ухудшится. Груз Γ_5 соглашается на обмен, так как при перемещении на полет Π_1 он улучшит свою удовлетворенность.

После перехода грузов состояние агентов по удовлетворенности будет следующее (табл. А.4).

Таблица А.4 – Состояния агентов после второй итерации переговоров

| Полет Π_1 | Полет Π_2 | Полет Π_3 |
|-----------------------------------|--|--|
| $y(\Gamma_1) = 1 - 0,5*(4-4) = 1$ | $y(\Gamma_4) = 1 - 0,5*(16 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_7) = 1 - 0,2*(10 - 16) = -0,2$ |
| $y(\Gamma_5) = 1$ | $y(\Gamma_2) = 1$ | $y(\Gamma_3) = 1$ |
| $y(\Gamma_8) = 1$ | $y(\Gamma_6) = 1 - 0,5*(4 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_9) = 1 - 0,33*(7 - 16) = -2$ |

После шага 2 суммарная удовлетворённость всех грузов будет следующая:

$$Y = (1 + 1 + 1) + (-2 + 1 - 2) + (-0,2 + 1 - 2) = -1,2.$$

Таким образом общее состояние удовлетворенности всех грузов по сравнению с предыдущим шагом опять значительно улучшилось за счет согласованных взаимовыгодных перестановок.

Шаг 3. На полете Π_1 все агенты имеют максимальную удовлетворенность и не могут ее улучшить за счет перемещения на другие полеты ТГК. Таким образом переходим к грузам полета Π_2 , где агент груза Γ_4 имея отрицательную удовлетворенность начинает опрашивать грузы полета Π_3 . При этом груз Γ_7 принимает предложение о смене полета ТГК, так как его удовлетворенность на полете Π_2 увеличивается.

После перехода грузов состояние агентов по удовлетворенности будет следующее (табл. А.5).

Таблица А.5 – Состояния агентов после третьей итерации переговоров

| Полет П ₁ | Полет П ₂ | Полет П ₃ |
|-----------------------------------|---|--|
| $y(\Gamma_1) = 1 - 0,5*(4-4) = 1$ | $y(\Gamma_7) = 1$ | $y(\Gamma_4) = 1$ |
| $y(\Gamma_5) = 1$ | $y(\Gamma_2) = 1$ | $y(\Gamma_3) = 1$ |
| $y(\Gamma_8) = 1$ | $y(\Gamma_6) = 1 - 0,5*(4 - 10) = -2$ | $y(\Gamma_9) = 1 - 0,33*(7 - 16) = -2$ |

После шага 3 суммарная удовлетворённость всех грузов будет следующая:

$$Y = (1 + 1 + 1) + (1 + 1 - 2) + (1 + 1 - 2) = 3.$$

Таким образом общее состояние удовлетворенности всех грузов по сравнению с предыдущим шагом также значительно улучшилось за счет согласованных взаимовыгодных перестановок.

Шаг 4. На полете П₂ остался груз Г₆ с отрицательной удовлетворенностью и может улучшить свое положение за счет перехода на полет П₁, но там у всех грузов удовлетворенность равна 1. Для перемещения необходимо понять на сколько у них может упасть удовлетворенность, если они уступят свое место грузу Г₆, при этом если бы удовлетворенность упала, например, до -1, что является больше текущей удовлетворенности груза Г₆ равной -2, то переход можно было бы осуществить для повышения общей удовлетворенности всех грузов.

К грузам полетам П₃ груз П₆ не обращается поскольку его перемещения на полет П₃ лишь ухудшит его состояние. Таким образом активность переходит к грузам полета П₃, а именно к грузу Г₉, поскольку его удовлетворенность является отрицательной. Груз Г₉ находит единственного агента груза Г₆ на полете П₂ с отрицательной удовлетворенностью и предлагает ему совершить обмен, при этом груз Г₉ получил бы значение удовлетворенности равной 0, т.е. улучшил бы свое состояние на 2 пункта. Но груз Г₆, оценив свою удовлетворенность при перемещении на П₃, которая будет равна -5, что на 3 пункта хуже, отвергает предложение груза Г₉, так как общая удовлетворенность всех грузов системы в целом ухудшится.

Таким образом процесс переговоров и улучшений естественным способом останавливается, так как на этом шаге состояние всех грузов системы достигло максимальной упорядоченности и дальнейшие улучшения невозможны (рис. А.2).

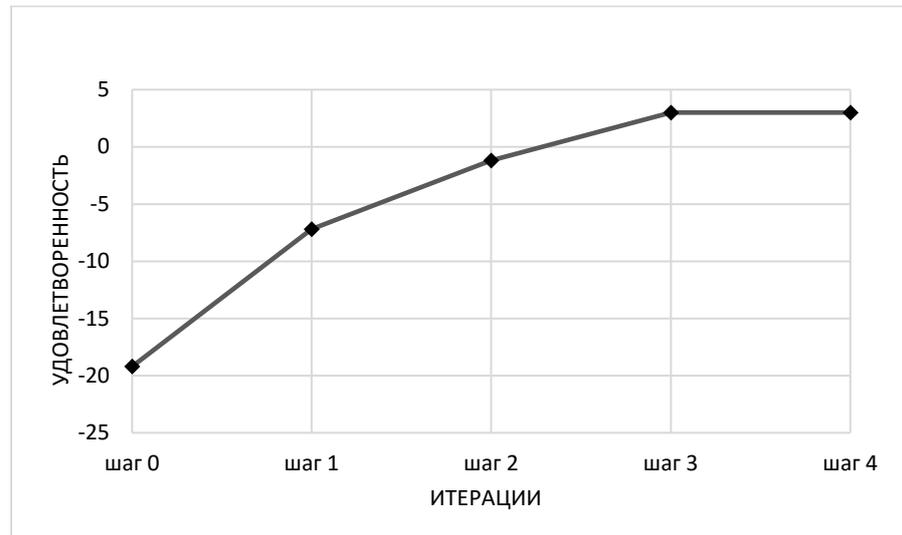


Рисунок А.2 – График изменения суммарной удовлетворенности по итерациям

Итак, в результате переговоров агентов о смене положения и улучшения значения своей локальной функции удовлетворенности позволяет за счет них перейти к более выгодному с точки зрения каждого груза общему состоянию всей системы.

Приведенный пример показывает, как МАС «Грузопоток» позволяет путем самоорганизации агентов во времени находить решения по размещению грузов на наиболее подходящих полетах ТГК, т.к. не использовались никакие другие критерии, кроме внутренних функций и стремления агентов к ее улучшению. Решение достигается итерационным механизмом, базирующимся на переговорах агентов полетов ТГК и грузов.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015610854

ИНТЕРАКТИВНАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА
ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММЫ ПОЛЕТА, ГРУЗОПОТОКА И
РАСЧЕТА РЕСУРСОВ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственная компания «Разумные решения» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2014619838

Дата поступления 01 октября 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 января 2015 г.

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



Авторы: *Кузьмин Виталий Владиславович (RU), Полников Александр Сергеевич (RU), Перваков Алексей Владимирович (RU), Новиков Антон Леонидович (RU), Скобелев Петр Олегович (RU), Попова Елена Евгеньевна (RU), Карбовничий Вячеслав Павлович (RU), Лахин Олег Иванович (RU), Полиновская Ольга Сергеевна (RU), Редькина Ксения Владимировна (RU), Анисимов Илья Константинович (RU)*

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАХИНА О. И. В РКК «ЭНЕРГИЯ»

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
конструктора ПАО «РКК «Энергия»,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор


В.А. Соловьёв



«20» января 2016 г.

Акт о внедрении

результатов диссертационной работы Лахина Олега Ивановича
«Управление грузопотоком сложных технических объектов удаленного
базирования на основе мультиагентных технологий»

Комиссия в составе:

председатель Хамиц И.И. – руководитель НТЦ-1Ц ПАО «РКК «Энергия»;

члены комиссии:

Бидеев А.Г. – начальник отделения ПАО «РКК «Энергия»;

Сычева М.В. – начальник сектора ПАО «РКК «Энергия»

составили настоящий акт о том, что при разработке «Интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов российского сегмента международной космической станции» (МАС «Программа полета и грузопоток»), которая успешно прошла апробацию и была введена в штатную эксплуатацию в ПАО «РКК «Энергия», использованы следующие результаты диссертационной работы Лахина О.И. на тему «Управление грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на основе мультиагентных технологий»:

- 1) модифицированный метод сопряженных взаимодействий для управления грузопотоком Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС);
- 2) онтология управления грузопотоком РС МКС, позволяющая сформировать базу знаний для построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС и настраиваться на индивидуальные особенности предметной области (применяемые транспортные корабли, модули и подсистемы станции, доставляемые грузы и экипаж) при формировании и согласовании планов без перепрограммирования;

3) мультиагентная система поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС, интегрированная с существующими системами предприятия IMS, АСП РС МКС, Windchill.

Использование МАС «Программа полета и грузопоток» позволило рассчитывать ресурсы и планировать адаптивно и согласованно программу полетов, грузопоток, размещение грузов на борту станции, возврат и утилизацию грузов в едином информационном поле специалистов различных подразделений ОАО «РКК «Энергия».

Внедрение системы обеспечивает одновременную и согласованную работу 8 основных специалистов-проектантов, а также более 120 кураторов заявок, работающих с заводами-производителями и позволило добиться следующих результатов:

- снижение сложности и трудоемкости расчетов, а также и согласования плана грузопотока – в 3-4 раза;
- повышение оперативности в принятии решений – в 2-3 раза;
- впервые появилась реальная возможность просчитать варианты на случай аварийных ситуаций, например, при обработке нештатной ситуации – крушения транспортных грузовых кораблей «Прогресс 412» в конце августа 2011 г. и «Прогресс-М-27М» в мае 2015 г.;
- уменьшение зависимости от человеческого фактора, включая ошибки.

Перспективы развития системы связаны с разработкой сетевых механизмов взаимодействия различных корпоративных систем ПАО «РКК «Энергия» для согласованного формирования и корректировки различными подразделениями предприятия стратегических и оперативных планов.

Председатель комиссии:

 Хамиц И.И.
17.11.16

Члены комиссии:

 Бидеев А.Г.
14.11.16

 Сычев М.В.
14.11.16

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАХИНА О. И. В УЧЕБНОМ
ПРОЦЕССЕ САМАРСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по учебной работе

Самарского университета,

кандидат физико-математических наук,

доцент



А.В. Гаврилов

2017 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта СамГТУ
Лахина Олега Ивановича «Управление грузопотоком сложных технических объектов
удалённого базирования на основе мультиагентных технологий», представленной на
соискание учёной степени кандидата технических наук,
в учебном процессе Самарского университета

Результаты кандидатской диссертации аспиранта СамГТУ Лахина О.И. (руководитель д.т.н. Скобелев П.О.) на тему «Управление грузопотоком сложных технических объектов удалённого базирования на основе мультиагентных технологий» частично внедрены в учебный процесс Самарского университета на основании **решения заседания кафедры** конструкции и проектирования летательных аппаратов от **14.11.2016 г. протокол №4** и используются в курсе **«Онтология производственной сферы»** для подготовки бакалавров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», специализация «Автоматизированное управление жизненным циклом продукции».

В частности, в лекционном курсе используются принципы применения «Конструктора онтологий» для описания предметной области производственной сферы в форме онтологии, а также иллюстративные материалы онтологии управления грузопотоком Российского сегмента Международной космической станции для описания жизненного цикла доставляемых на станцию грузов.

В лабораторном практикуме используется «Конструктор онтологий» для создания онтологий с целью применения их в мультиагентных системах поддержки принятия решений при управлении ресурсами в различных производственных сферах.

Заведующий кафедрой конструкции и проектирования
летательных аппаратов, д.т.н., профессор  В. А. Комаров

Начальник управления образовательных программ,  А.В. Дорошин
к.т.н., доцент

Отдел сопровождения научных исследований,
к.т.н., доцент  А.М. Гареев

 О.И. Лахин

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАХИНА О. И. В УЧЕБНОМ
ПРОЦЕССЕ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор ФГБОУ ВО «Поволжский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики»,
доктор технических наук, профессор


_____ Д.В. Мишин

«07» сентября 2017 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспиранта СамГТУ Лахина Олега Ивановича на тему «Управление грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на основе мультиагентных технологий» в учебном процессе Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

Настоящим актом подтверждаем, что результаты, полученные в диссертационной работе О.И. Лахина на тему «Управление грузопотоком сложных технических объектов удаленного базирования на основе мультиагентных технологий», а именно модифицированный метод сопряженных взаимодействий для управления грузопотоком Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), онтология управления грузопотоком РС МКС, а также мультиагентная система поддержки принятия решений для управления грузопотоком РС МКС внедрены в учебный процесс на кафедре инженерии знаний и используются в курсе «Методология управления» при подготовке бакалавров в рамках образовательной программы 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника (профиль программы – Программное обеспечение средств вычислительной техники и автоматизированных систем).

И.о. декана факультета
информационных систем и технологий
к.т.н., доцент



М.А. Богомолова

Заведующий кафедрой инженерии знаний
д.т.н., профессор



В.А. Витих

Секретарь кафедры
к.э.н., доцент



Т.В. Моисеева