

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)» (МАИ)

На правах рукописи  
УДК 629.78



СОХРАННЫЙ ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ

МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О ПОРЯДКЕ ЗАДЕЙСТВОВАНИЯ  
НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
С КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Почукаев Владимир Николаевич

Москва, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ существующего порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами .....	14
1.1 Анализ организации планирования задействования наземных средств.....	14
1.2 Анализ основных факторов, влияющих на порядок задействования наземных средств .....	24
1.3 Основные требования к принятию решений о порядке задействования наземных средств.....	27
1.4 Выводы по первой главе .....	40
Глава 2. Иерархическая структура исходных данных .....	41
2.1 Определение состава экспертной группы.....	41
2.2 Порядок формирования иерархической структуры исходных данных .....	43
2.3 Принципы формирования иерархической структуры исходных данных.....	45
2.4 Формальное представление иерархической структуры исходных данных .....	46
2.5 Выводы по второй главе .....	49
Глава 3. Методика назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратам .....	50
3.1 Обоснование использования метода анализа иерархий.....	50
3.2 Модель подготовки данных для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи .....	59
3.3 Модель расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами.....	82

3.4 Алгоритм эквивалентного преобразования иерархической структуры при объединении её элементов в группы.....	84
3.5 Выводы по третьей главе.....	86
Глава 4. Порядок задействования наземных средств взаимодействия.....	88
4.1 Общие положения.....	88
4.2 Постановка задачи определения порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.....	94
4.3 Алгоритм планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.....	97
4.4 Автоматизация принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.....	107
4.5 Пример определения порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при возникновении спорной ситуации.....	108
4.6 Выводы по четвёртой главе.....	132
Глава 5. Оценка возможности выполнения требований к принятию решений.....	133
5.1 Оценка возможности выполнения требований к обоснованности.....	133
5.2 Оценка возможности выполнения требований к оперативности.....	133
5.3 Выводы по пятой главе.....	134
Заключение.....	136
Перечень сокращений и условных обозначений.....	138
Список терминов.....	139
Список литературы.....	140

*Пусть никто не думает, будто можно всегда принимать безошибочные решения, напротив, всякие решения сомнительны, ибо в порядке вещей, что, стараясь избежать одной неприятности, попадаешь в другую. Мудрость заключается только в том, чтобы, взвесив все возможные неприятности, наименьшее зло почесть за благо.*

*Н. Макиавелли. Государь*

## **Введение**

**Актуальность темы исследования.** Существует категория задач, связанных с принятием решений по широкому кругу вопросов, для которых исходные данные, на основании которых принимаются решения, заданы не количественным показателем, а имеют чисто качественный характер. Вместе с тем, решения в конечном виде имеют и количественный характер. Для задач данной категории характерно то, что число качественных характеристик может быть очень велико, кроме того, показатели могут быть взаимозависимы. Согласно классификации, предложенной в 1958 г. в статье Г. Саймона и А. Ньюэлла [1], такие задачи относятся к категории неструктуризованных.

Для решения таких задач используется, как правило, возможность человека оперировать с показателями подобного типа. Суть метода привлечения человека для решения таких задач состоит в следующем. Выбирается некоторая группа людей, имеющих опыт работы с задачами данной категории в определённой области, которых обычно называют экспертами. При этом важно, что решить данную задачу поручают не одному специалисту, а группе экспертов, на которых возлагается ответственность за принятие решения. При всей, казалось бы, произвольности данного способа, предполагается, что принимаемые решения и их реализация оцениваются по последствиям принимаемых решений, что определяет крайнюю заинтересованность экспертов.

В связи с этим возникает необходимость организации работы экспертов по принятию решений, разработки методического аппарата работы группы экспертов,

разработки документов, позволяющих принимать обоснованные решения, под которыми понимаются решения, принятые по результатам сравнения численных значений целевой функции, рассчитанных на основе экспертных данных. В этом заключается суть приведенной задачи.

Проведенные исследования в области принятия решений [2–4] показали, что принятие обоснованных решений зависит:

- от количества членов экспертной группы;
- от состава экспертов, определяющего возможность экспертов прийти к единому мнению;
- от метода получения данных, на основании которых эксперты могут принимать решения;
- от способа учёта факторов и их взаимосвязей, влияющих на принятие решения;
- от компетентности экспертов: каждый член группы должен иметь достаточно полное представление о специфике решаемой задачи, обо всём разнообразии факторов, которые необходимо оценить на качественном уровне, что позволило бы ему прийти к некоторому окончательному решению;
- от используемого аппарата обработки экспертных данных, позволяющего принимать обоснованные решения.

Задачи подобного типа имеются во многих областях человеческой деятельности, в том числе и в космической отрасли. В настоящей работе решение задачи принятия обоснованных решений осуществляется применительно к одной важной области обеспечения управления космическими аппаратами (КА) с использованием наземных средств взаимодействия (НСВ) (станций командно-измерительных систем, приёмо-регистрирующих и телеметрических станций, радио-телеметрических комплексов и др.), расположенных на командно-измерительных пунктах и осуществляющих непосредственное взаимодействие с космическими аппаратами. Суть решаемой задачи заключается в следующем.

В процессе управления космическими аппаратами с использованием наземных средств взаимодействия с КА возникают ситуации, называемые

спорными, когда возникает необходимость использования одного и того же наземного средства в одно и то же время для проведения сеансов связи с несколькими космическими аппаратами. Поскольку одно наземное средство не может работать одновременно с несколькими космическими аппаратами, возникает необходимость выстраивания очереди запросов на проведение сеансов связи с КА в соответствии с приоритетами запросов.

При возникновении спорных ситуаций основным вопросом является определение порядка задействования наземных средств взаимодействия, при котором обеспечивается возможность исключения максимального ущерба управлению космическими аппаратами, вплоть до потери космического аппарата. При этом необходимо учесть такие факторы, как состав выполняемых с КА операций, тип КА, этап эксплуатации КА, срок пребывания КА на орбите, режим полёта КА, продолжительность зон радиовидимости КА на суточном интервале, тип сеанса связи с КА, режимы послесеансной передачи ТМИ с использованием НСВ, имеющие, в основном, качественный характер и логически взаимосвязанных между собой. В настоящее время разрешение спорных ситуаций поручается группе экспертов, которые выделяют совокупность факторов, влияющих на возможные последствия принятия решения по разрешению конкретной спорной ситуации, производят качественную сравнительную оценку возможных ущербов управлению КА при реализации различных решений и по результатам оценки принимается решение о порядке задействования наземных средств. Основным недостатком существующего процесса принятия решений является отсутствие научно-методического обеспечения и руководящих документов, регламентирующих разрешение спорных ситуаций, как следствие, отсутствие научной обоснованности принимаемых решений. Под научно обоснованными понимаются решения, принятые на основе численных значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, рассчитанных по согласованным экспертным данным.

Важным фактором является также ограниченность времени на принятие решений при разрешении спорных ситуаций, что при существующем порядке

принятия решений может привести к нарушению сроков планирования задействования средств. В условиях роста численности космических аппаратов в составе орбитальной группировки вероятность возникновения спорных ситуаций по задействованию наземных средств взаимодействия возрастает. Складывающаяся ситуация становится недопустимой и требующей разработки нового механизма принятия решений. Планирование задействования наземных средств при возникновении спорных ситуаций является одним из проблемных вопросов обеспечения космической деятельности. Для решения данного вопроса возникает необходимость разработки и реализации методического, нормативно-правового и программного обеспечения [5].

Сущность предлагаемой методики заключается в заблаговременной (до возникновения спорных ситуаций) подготовке данных для расчёта всех возможных значений приоритетов запросов на основе согласованных экспертных оценок важности факторов, влияющих на разрешение спорных ситуаций, что исключает необходимость проведения совещаний экспертов при каждом возникновении спорной ситуации, расчёте значений приоритетов запросов, обусловивших конкретную спорную ситуацию, по подготовленным данным, присущим конкретной спорной ситуации, принятии и реализации решений на основе рассчитанных приоритетов с использованием средств автоматизации.

В данной работе определены основные требования к принятию решений: подбор рациональной численности экспертной группы, обеспечение требуемого качества её специалистов, получение информации от экспертов в соответствии с возможностями человеческой системы переработки информации согласно данным психологических исследований, возможность экспертной группы принимать согласованные решения, учёт множества разнообразных взаимосвязанных факторов качественного характера, определение правил работы экспертов, возможность обоснования решающего правила принимаемых решений и объяснения принимаемых решений на основе экспертных данных, возможность использования программных средств для ЭВМ при принятии решений

Для решения поставленной задачи, удовлетворяющей сформулированным требованиям, включая требования теории принятия решений по научному обоснованию решений [6], проведен анализ методов принятия решений, позволивший выбрать метод анализа иерархий, имеющий математически обоснованный способ работы с суждениями экспертов. Другие методы, в том числе МАУТ, скаляризации критериев (линейной свёртки Гермейера, коэффициентов Фишберна и др.), заданным требованиям не соответствуют.

На основании изложенного, разработка методики принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами, позволяющей разработать программное обеспечение для ЭВМ, используемое при принятии решений, имеет важное практическое значение и является актуальной.

**Степень разработанности задачи принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.**

В работе [7] (Дудко А. Н., Кучеров Б. А., Литвиненко А. О., Сохранный Е.П.) рассмотрен вопрос учёта отдельных параметров, характеризующих КА, сеансы связи и выполнение целевой задачи для приоритетного обслуживания запросов на проведение сеансов связи, в работе [8] (Литвиненко А.О., Дудко А. Н.) рассмотрен вопрос учёта соотношений между количеством включенных в ПЗС сеансов связи и количеством необходимых для исполнения суточного ТЦУ, в работах [9, 10] (Поливников В.М., Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Овечко В.М.) рассмотрены вопросы учёта количества требуемых для КА сеансов связи на суточном интервале планирования, в работе [11] (Литвиненко А.О.) рассмотрен вопрос учёта приоритетов сеансов связи, приоритетов КА на данные сутки, штрафов за отмену или перемещение сеансов связи и др., задаваемых экспертом, в работах [12, 7, 11] (Колпин М.А., Проценко П.А., Слащев А.В.) рассмотрены вопросы учёта отдельных сведений по составу и характеристикам орбитальной группировки и средств НАКУ КА, ограничений по управлению КА при централизованном планировании проведения всех сеансов связи, различные

критерии оценки важности запросов. Предлагаемые варианты приоритетного обслуживания запросов предполагают использование определённых частных предпочтений.

В работах [13, 14] (Парк Дзин-Соо, Саммур Мохаммед, Терри Стефан, Ван Цзинь, Олвера-Эрнандес Юлизис) рассмотрен вопрос приоритетного обслуживания заявок абонентов в системах связи, в работе [15] (Зайцев О.В.) рассмотрен вопрос приоритетного обслуживания при антивирусной проверке. Предлагаемые способы приоритетного обслуживания не могут быть использованы из-за различий в постановках задач (исходных данных, условиях и ограничениях по применению), определяющих способы их решения.

В рассмотренных работах вопросы комплексного учёта всех возможных для анализа факторов, влияющих на разрешение спорных ситуаций, с использованием механизма экспертных оценок, расчёта и использования численных значений важности запросов на проведение сеансов связи с КА не рассматривались.

**Объекты исследования:** процедуры принятия решений, зависящих от множества разнородных и взаимосвязанных факторов, имеющих качественный характер.

**Предмет исследования:** принятие решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.

**Цель работы:** повышение качества и оперативности планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами за счёт принятия обоснованных решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия и обеспечения автоматизации процесса принятия решений.

Для достижения поставленной в данной диссертационной работе цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Определить способ представления исходных данных задачи, характеризующихся большим количеством, разнородностью, взаимосвязью и, в основном, качественным характером.

2. Разработать методику принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при возникновении спорных ситуаций.

3. Разработать формальные модели для автоматизации процесса принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с КА.

4. Определить порядок задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при возникновении спорных ситуаций.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы теории множеств, принятия решений, графов, матриц, методы системного анализа, экспертных оценок, анализа иерархий, парных сравнений.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Принципы формирования, структура и формальное представление исходных данных, используемых при принятии решений о порядке задействования наземных средств.

2. Методика назначения приоритетов запросам на проведение сеансов связи с космическими аппаратами, включающая формальные модели подготовки согласованных данных и расчёта значений приоритетов запросов, позволяющие разработать программные средства для расчёта численных значений приоритетов запросов.

3. Порядок задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами на основе приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами, включающий алгоритм планирования, обеспечивающий совместно с разработанными формальными моделями возможность разработки программных средств планирования задействования наземных средств взаимодействия.

#### **Научная новизна**

К новым научным результатам, представляющим теоретический интерес, можно отнести следующие:

1. Требования к принятию решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.

2. Использование метода анализа иерархий для решения задачи принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия.

3. Принципы формирования, формальное представление и структура исходных данных, *позволяющие* представить множество разнообразных, взаимосвязанных факторов качественного характера, влияющих на принятие решений, в форме иерархии.

4. Методика назначения приоритетов запросам на проведение сеансов связи с КА, *отличающаяся* возможностью расчёта приоритетов запросов на основе множества согласованных исходных данных.

5. Формальные модели подготовки согласованных данных и расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, алгоритм планирования задействования наземных средств, *обеспечивающие* возможность разработки программных средств планирования задействования наземных средств с учётом возникновения спорных ситуаций.

6. Порядок задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами, *основанный* на использовании приоритетов запросов.

### **Теоретическая значимость работы**

Настоящая диссертация развивает прикладные методы принятия решений и методы планирования задействования средств взаимодействия с КА при возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств взаимодействия с КА.

1. Развитие прикладных методов принятия решений заключается в разработке требований к принятию решений, разработке формальных моделей расчёта показателей оценки согласованности экспертных данных на основе теории анализа иерархий.

2. Развитие методов планирования задействования средств взаимодействия с КА заключается в разработке формальных моделей подготовки данных и расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с

КА, в разработке алгоритма планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА при разрешении спорных ситуаций на основе численных значений приоритетов запросов.

**Практическая значимость работы** состоит в:

- возможности создания нормативно-правовой базы по разрешению спорных ситуаций по задействованию наземных средств взаимодействия с КА;
- возможности заблаговременной подготовки согласованных экспертных данных для расчёта значений приоритетов запросов;
- совершенствовании системы планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА при возникновении спорных ситуаций на основе приоритетов запросов.

Результаты исследований прошли апробацию и используются в работе Центра ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП) ЦУП АО «ЦНИИмаш» по следующим направлениям: научно-методическое обоснование планирования задействования наземных средств для обеспечения управления космическими аппаратами, разработка конструкторской, программной документации, программ и руководящих документов по планированию задействования средств, организация информационного взаимодействия ЦСАКП с абонентами при планировании задействования средств, что подтверждается Актом о внедрении.

**Степень достоверности** результатов исследований, полученных соискателем ученой степени, обеспечивается:

1. Корректным использованием апробированного аппарата указанных теорий множеств, принятия решений, графов, матриц, обработки информации на основе методов экспертных оценок, анализа иерархий, парных сравнений, а также системного анализа и подтверждается адекватностью результатов использования предложенного аппарата.

2. Использованием информации реально существующей базы данных о факторах, учитываемых при принятии решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами.

3. Моделированием вариантов принимаемых решений для различных ситуаций, определяемых условиями проведения сеансов связи с космическими аппаратами, для подтверждения обоснованности выбранного решения.

4. Выполнением требований к научному обоснованию решений, определённых в теории принятия решений.

**Апробация результатов работы.** По теме диссертации опубликовано 13 работ [7, 16-27], из них 6 [7, 17 – 21] в рецензируемых изданиях, определённых высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, 10 [7, 17-19, 21, 23-27] в соавторстве, получены 2 патента на изобретения [24, 25], 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [26, 27]. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференции в МГТУ им. Н.Э. Баумана «Современные проблемы науки и образования в ракетно-космической технике и автоматизация производства».

**Личный вклад.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, 5 глав, заключение, перечень сокращений и условных обозначений, список терминов, список литературы. Диссертация изложена на 151 листе, в том числе 14 рисунков и 30 таблиц, список литературы включает 87 наименований.

Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта специальности: формализация и постановка задач, разработка моделей описания и критериев оценки эффективности, методы и алгоритмы принятия решений и обработки информации, методы получения, анализа и обработки экспертной информации.

## **Глава 1. Анализ существующего порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами**

### **1.1 Анализ организации планирования задействования наземных средств**

Для достижения целей, стоящих перед космической системой, требуется выполнение ряда действий (ориентация в пространстве, коррекция орбиты с помощью двигательных установок и др.) при состоянии космического аппарата, удовлетворяющем заданному множеству условий (например, нормальное состояние аппаратуры, необходимый температурный режим, требуемое состояние газовой среды и т.д.). Выполнение действий по управлению КА и поддержанию требуемых условий на космическом аппарате можно рассматривать как процессы [28]. Эффективность реализации указанных процессов, определяющая эффективность управления космическим аппаратом и орбитальной группировкой КА, существенно зависит от состава, характеристик и технологий применения (задействования) наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами. Наземные средства взаимодействия с космическими аппаратами – средства, обеспечивающие информационный обмен органов управления (Центров управления полётами – ЦУП) непосредственно с объектами управления (космическими аппаратами) при управлении космическими аппаратами. Под управлением КА будем понимать процесс выполнения операций, задаваемых ЦУП КА в запросах на проведение сеансов связи с КА, по реализации функций КА. Задачей средств управления является непрерывное и устойчивое управление российской орбитальной группировкой (ОГ) автоматических и пилотируемых космических аппаратов, а также объектами на траекториях полёта к Луне, Марсу, другим небесным телам Солнечной системы [29]. Решение данной задачи осуществляется в процессе проведения сеансов связи с КА. Под сеансом связи с КА понимается информационный обмен органа управления (ЦУП) с объектом управления (КА) в течение непрерывного интервала времени с использованием НСВ с КА, средств связи и передачи данных. Объём работ, выполняемых во время проведения сеансов связи, определяется технологическим циклом управления (ТЦУ) КА и указывается в заявках ЦУП органу планирования задействования

НСВ. Заявка состоит из совокупности строк, включающих дату проведения, объект (шифр КА) управления, номер витка, номер командно-измерительного пункта (КИП), номер задействуемого средства, номера режимов работы средств взаимодействия с КА, зоны радиовидимости (ЗРВ) космического аппарата данным средством, угол места, время подготовки к сеансу связи [30] (рисунок 1). Режимы работы средств взаимодействия с КА соответствуют операциям, проводимым с оборудованием КА.

Заявка на задействование средств для управления РС МКС на 20.05.2021 г.

Объект	Виток	Номер КИП	Ср-ва	Зона Р/В	Угол места	Режим работы	Примечание (Т подг.)
1	2	3	4	5	6	7	8
A-001	1384	3	06	06:46:00 - 06:55:00	11	121	Тподг = 30мин; ЕКТС
A-001	1385	3	05	08:21:00 - 08:32:00	43	121	Тподг = 30мин; ЕКТС
A-001	1386	3	06	09:58:00 - 10:08:00	88	121	Тподг = 30мин; ЕКТС
A-001	1390	4	01	16:07:00 - 16:18:00	37	121	Тподг = 30мин; ЕКТС
A-001	1391	4	01	17:43:00 - 17:54:00	45	121	Тподг = 30мин; ЕКТС
A-001	1391	1	5201	17:51:00 - 18:01:00	32	121	Тподг = 30мин; ЕКТС

Рисунок 1 – Пример заявки на задействование средств

Совокупность сведений, определяющих параметры заказа для проведения одного сеанса связи с КА, назовём запросом на проведение сеанса связи с КА. Выполнение запроса на проведение сеанса связи с КА осуществляется в период нахождения данного КА в зоне его радиовидимости конкретным средством взаимодействия с КА. Поэтому одной из важнейших особенностей задействования НСВ с КА является возможность использования конкретного средства для взаимодействия только с теми КА, которые находятся в зоне радиовидимости этого средства. При планировании реализации запросов на проведение сеансов связи с различными КА возникают ситуации, когда заказывается одно и то же

средство для работы с разными КА, находящимися в конкретный интервал времени в зоне радиовидимости этих КА данным средством взаимодействия. Однако одно средство взаимодействия одновременно работать с разными КА не может, что приводит к возникновению спорных ситуаций, обуславливающих образование очередей запросов для задействования наземных средств взаимодействия и, следовательно, необходимости определения порядка задействования этих средств при обслуживании очередей запросов. Под спорной ситуацией по задействованию НСВ с КА будем понимать ситуацию, при которой возникает необходимостью задействования одного и того же средства в одно и то же время для работы с несколькими космическими аппаратами. Следствием этого является невозможность средств взаимодействия обеспечить проведение требуемого количества сеансов связи с космическими аппаратами. Недостаточность средств взаимодействия для низкоорбитальных КА и разгонных блоков (РБ) является одной из основных причин недостаточного уровня характеристик по оперативности, глобальности и надёжности управления космическими аппаратами [31].

Первым и основным при возникновении спорных ситуаций по задействованию НСВ является вопрос о запросах, подлежащих перемещению на другое время и/или другое средство для их реализации. Поскольку управление КА осуществляется во время нахождения КА в зоне его радиовидимости средством взаимодействия, запрос на задействование конкретного средства не может ждать в очереди и должен быть либо включен в ПЗС, либо отклонён для переноса на другое время и/или средство. В настоящее время вопрос перемещения запросов для разрешения спорных ситуаций по задействованию НСВ решается руководителем полётами (лицом, принимающим решения – ЛПР) с привлечением, как правило, 2-х специалистов секторов управления полётами космических аппаратов, по которым необходимо принять решение о порядке задействования наземных средств для реализации запросов. Решения принимаются на основе качественных оценок последствий возможных перемещений запросов на другое время и/или средство, количественные оценки последствий принимаемых

решений не производятся, что не соответствует требованиям теории принятия решений. Принимаемые решения реализуются в виде утверждённых планов или коррекций Планов задействования средств (ПЗС), разрабатываемых на основании заявок ЦУП на задействование средств.

Спорные ситуации по задействованию НСВ могут возникать как при оперативном планировании (за 3-е суток до проведения сеанса связи с КА) при заказе разными ЦУПами одних и тех же средств в одно и то же время для управления различными КА, так и при текущем планировании в случае необходимости задействования уже распределённых технических средств.

Органом, осуществляющим планирование задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения (НСЭН), является Центр ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП) работы средств НАКУ КА НСЭН. Приказом Федерального космического агентства от 30 января 2006 г. № 5 [32] с учётом уточнений приказа Федерального космического агентства от 14 декабря 2009 г. № 195 [33] на ЦСАКП возложены следующие функции:

- оперативное планирование и координация использования средств НАКУ КА НСЭН;
- анализ состояния ОГ КА НСЭН, а также наземных средств взаимодействия;
- взаимодействие с внешними организациями по привлечению средств к управлению КА НСЭН.

Определяющей из перечисленных функций является оперативное планирование и координация использования средств НАКУ КА НСЭН, другие можно отнести к обеспечивающим функциям.

По срокам реализации планирование задействования НСВ подразделяется на долгосрочное, оперативное и текущее.

Долгосрочное планирование осуществляется на этапах годового, квартального и месячного планирования.

Оперативное планирование задействования НСВ выполняется на одно–двухсуточном интервале за 3-ое суток до требуемого времени реализации ПЗС.

Текущее планирование осуществляется, как правило, в течение текущих суток проведения сеанса связи и заключается в коррекции утверждённого ПЗС. Коррекцией является любое изменение, вносимое в утверждённый ПЗС, необходимость которого возникает из-за изменений в состоянии КА, НСВ с КА, условий их применения или планов работы с КА [7].

В общем случае процесс оперативного (текущего) планирования задействования наземных средств включает следующие этапы [7, 30]:

- а) постановка задачи планирования;
- б) сбор (приём) исходных данных, необходимых для разработки планов;
- в) анализ качества исходных данных;
- г) разработка предложений в план (вариантов планов);
- д) оценка предложений в план (вариантов планов);
- е) формирование плана на основе разработанных предложений либо выбор одного из планов в качестве рабочего;
- ж) согласование и утверждение рабочего плана;
- з) разработка управляющих воздействий (выписок из планов и распоряжений на задействование средств) для реализации плана;
- и) доведение управляющих воздействий до исполнителей (абонентов);
- к) контроль реализации плана (исполнения управляющих воздействий).

Постановка задачи определяет цель и задачи планирования, исходные данные и ограничения по планированию.

Целью долгосрочного планирования является обеспечение достаточности ресурсов наземных средств для управления КА на годовом, квартальном и месячном периодах с учётом планов запусков КА, прогноза загрузки наземных средств и Плана эксплуатации и технического обслуживания средств НАКУ. Задачами долгосрочного планирования являются:

- анализ и оценка достаточности ресурсов наземных средств для управления КА на планируемые периоды;

– разработка предложений по обеспечению ресурсами наземных средств на планируемые периоды при недостаточности ресурсов.

Основной целью планирования задействования наземных средств является распределение средств для обеспечения управления космическими аппаратами без наличия спорных ситуаций [30].

Задачами оперативного (текущего) планирования являются:

- разработка ПЗС и ПЗКС, их оперативная корректировка, в том числе при возникновении нештатных или аварийных ситуаций, разработка и доведение до исполнителей управляющих воздействий и контроль исполнения планов;
- ситуационный анализ состояния орбитальной группировки КА НСЭН, а также наземных средств взаимодействия с КА;
- привлечение к работе, при необходимости, средств сторонних организаций.

Результаты планирования реализуются в «Плане задействования средств» (ПЗС), на его основании – в «Плане задействования каналов связи» (ПЗКС) и последующих управляющих воздействиях по их реализации.

Обоснованное задействование средств взаимодействия для обеспечения эффективного процесса управления группировками КА, в том числе внесение корректив в распределение указанных средств, осуществляемые при разработке ПЗС, ПЗКС и их оперативной корректировке, является одной из качественно новых задач, связанных с управлением космическими группировками [10].

Исходными для оперативного (текущего) планирования являются данные, содержащиеся в заявках ЦУП КА на задействование наземных средств взаимодействия с КА.

Ограничения по планированию задействования наземных средств определяются условиями их применения (готовность расчётов наземных средств решать поставленные задачи, работоспособность средств и каналов связи, состояние радиоэлектронной, метео-, гео- и гелиофизической обстановки в районах размещения наземных средств и др.).

Приём заявок на задействование средств, анализ их корректности, проверка отсутствия спорных ситуаций по задействованию наземных средств, формирование ПЗС, ПЗКС, выписок из ПЗС и ПЗКС, распоряжений на задействование средств и их рассылка исполнителям (Центру управления полётом КА, пункту управления (ПУ) мультисервисной системы связи и передачи данных (МССПД), оперативно-техническому пункту управления (ОТПУ) командно-измерительного пункта (КИП) и Центру координации эксплуатации и развития (ЦКЭР) средств НАКУ) осуществляются автоматизированным способом с использованием разработанных в соответствии с функциями ЦСАКП комплексов программ оперативного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическим аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений, ситуационного анализа применения средств и информационного обмена центра ситуационного анализа, координации и планирования с абонентами [26, 27, 34–42]. Автоматизированная обработка запросов на проведение сеансов связи с КА осуществляется в порядке поступления запросов в ЦСАКП, соответствующее приоритетности обработки в режиме «первый пришёл первый обслужен» (FiFo).

Контроль реализации ПЗС и ПЗКС осуществляется по докладам (сообщениям) от ЦУП КА, ОТПУ КИП, ПУ МССПД.

При проведении оперативного планирования в настоящее время в зависимости от соотношения между объемами имеющихся и затребованных ресурсов наземных средств используется одна из трех технологий (технологических циклов) планирования (ТЦП):

- ТЦП при отсутствии спорных ситуаций;
- ТЦП при наличии спорных ситуаций, разрешаемых с использованием резервных зон радиовидимости (РЗРВ) наземными средствами взаимодействия. Резервными являются зоны радиовидимости, которые указаны в заявках ЦУП и включены в ПЗС дополнительно к основным для обеспечения гарантированного проведения сеансов связи с КА;

– ТЦП при наличии спорных ситуаций, разрешение которых невозможно с применением РЗРВ и требует согласования с ЦУП перемещений времени реализации запросов на другое время и/или средство или привлечения ресурсов сторонних организаций.

При проведении текущего планирования используются те же технологии, что и при оперативном планировании, но накладывается ряд ограничений, определяемых технологическим циклом управления (ТЦУ) КА [7], основным из которых является ограничение по времени выполнения мероприятий по перепланированию задействования и подготовке к работе средств взаимодействия с КА, которое может быть ограничено временем одного витка КА вокруг Земли.

Отличительной особенностью используемых технологий планирования является порядок реализации этапа разработки вариантов ПЗС при возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств. Существующие программные средства обеспечивают только обнаружение спорных ситуаций.

Часто возникают ситуации, когда перенести запрос на другое время или средство в течение суток планирования невозможно из-за занятости этого средства для проведения сеанса связи с другим космическим аппаратом, либо время реализации переносимого сеанса связи не удовлетворяет требованиям технологического цикла управления космическим аппаратом.

Экспертная оценка практики разрешения спорных ситуаций по задействованию НСВ показывает, что для разрешения одной спорной ситуации (идентификация, разработка вариантов разрешения спорных ситуаций, согласование принятого решения, документальное оформление) в зависимости от способа её разрешения (использование резервной ЗРВ, изменение времени проведения сеансов связи с использованием заказанного или выбор иного средства взаимодействия) оператору–планировщику требуется от 10 до 30-ти минут без привлечения средств сторонних организаций.

Приведенный анализ используемых технологий автоматизированного планирования задействования средств взаимодействия с КА показывает, что они разработаны при допущении достаточности средств взаимодействия и не решают

задачу определения порядка задействованию наземных средств взаимодействия с КА при возникновении спорных ситуаций.

Особенности дискретного управления процессами на КА (по ЗРВ и в соответствии с ТЦУ КА), определяющие требования к технологии планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами, не позволяют использовать классические методы и способы планирования, в том числе основанные на теории расписаний, теории массового обслуживания, линейного программирования [43–45], поскольку ряд характеристик этих методов, например, таких как длина очереди, длительности запаздывания, опережения, ожидания в очереди, характерные для непрерывных систем управления, и другие являются ограничениями по их использованию [19]. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки и исследования оригинальных технологий планирования задействования средств взаимодействия с учётом особенностей управления космическими аппаратами.

Для приоритетного обслуживания запросов на проведение сеансов связи с КА авторами предлагается учёт различных факторов: отдельных параметров, характеризующих КА, сеансы связи и выполнение целевой задачи [7]; соотношений между количеством включенных в ПЗС сеансов связи и количеством необходимых для исполнения суточного ТЦУ [8]; количества требуемых для КА сеансов связи на суточном интервале планирования [9, 10]; приоритетов сеансов связи, приоритетов КА на данные сутки, штрафов за отмену или перемещение сеансов связи и др., задаваемых экспертом [11]; отдельных сведений по составу и характеристикам орбитальной группировки и средств НАКУ КА, а также ограничений по управлению КА при централизованном планировании проведения всех сеансов связи [12].

Рассматриваются варианты повышения оперативности планирования задействования средств взаимодействия за счёт перемещений времени проведения одного из сеансов связи на другую зону радиовидимости, в том числе занятую («заблокированную») другим КА [19, 24], передачи в сектора управления КА листингов свободных зон (ЛСЗ), т. е. временных интервалов, на которых

отсутствуют ограничения по применению средств и запланированные сеансы связи [46], использования современных информационных технологий для повышения оперативности и качества планирования задействования НСВ в части сокращения временных затрат по документообороту и организации работы специалистов ЦСАКП при планировании и анализе задействования НСВ [47–50].

Исследованы вопросы возможности применения методов теории массового обслуживания при организации обработки запросов на проведение сеансов связи с КА с использованием метода имитационного моделирования при минимизации общего времени обслуживания заявок и получены граничные значения областей эффективной работы системы массового обслуживания [17]. Рассмотрена возможность применения метода ситуационного анализа при планировании задействования наземных средств взаимодействия с КА и показана возможность использования методов теории исследования в части динамического и линейного программирования для оценки значений целевых функций задачи анализа и оценки состояния и развития представленных сценариев планирования задействования средств взаимодействия [18].

Предлагаемые варианты планирования задействованию НСВ и разрешения спорных ситуаций предполагают либо равнозначность запросов на проведение сеансов связи с КА, либо использование определённых частных предпочтений. Варианты характеризуются достаточно большим количеством и разнообразием факторов, влияющих на разрешение спорных ситуаций и определяющих различные критерии оценки важности запросов.

Задача приоритетного обслуживания заявок абонентов решается и в других областях (например, [13–15]), однако предлагаемые способы приоритетного обслуживания не могут быть использованы из-за различий в постановках задач (исходных данных, условиях, ограничениях и целевой функции), определяющих способы их решения.

Приведенный анализ свидетельствует о необходимости разработки оригинальных технологий планирования задействования наземных средств, включая определение порядка задействования наземных средств взаимодействия.

## **1.2 Анализ основных факторов, влияющих на порядок задействования наземных средств**

На основании имеющегося опыта задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами определены наиболее часто учитываемые факторы, к которым относятся следующие характеристики космических аппаратов и наземных средств взаимодействия, а также возможные их параметры:

- а) тип КА, параметры:
  - 1) пилотируемые;
  - 2) транспортные;
  - 3) РН/РБ;
  - 4) КА-ретрансляторы;
  - 5) КА научного назначения;
  - б) метеорологические КА и КА дистанционного зондирования Земли (объединены, т.к. часто один КА выполняет две эти задачи);
  - 7) навигационные спутники;
- б) срок пребывания КА на орбите, параметры:
  - 1) менее двух месяцев нахождения на орбите;
  - 2) более двух месяцев нахождения на орбите;
- в) ЗРВ КА. Возможные параметры этой характеристики, определяющей суммарную продолжительность зон радиовидимости КА на суточном интервале:
  - 1) 0-1 час/сутки;
  - 2) 1-3 часа/сутки;
  - 3) 3-6 часов/сутки;
  - 4) 6-12 часов/сутки;
  - 5) 12-24 часов/сутки;
- г) режим полёта КА. Характеристика, которая определяет важность проведения сеанса связи с КА в зависимости от состояния бортовой аппаратуры КА и его ориентации в космическом пространстве. Необходимость корректировки орбиты или

устранения неисправностей на борту КА повышает степень приоритета запросов на проведение заявленного сеанса связи с ним. Параметры:

1) штатный полёт (бортовая аппаратура КА исправна, ориентация КА в космическом пространстве штатная);

2) неориентированный полёт (ситуация, некритичная для полёта КА: например, отказ целевой аппаратуры, отказ бортовой аппаратуры с переходом на резерв. Возможны ограничения в части обеспечения работы КА и при проведении сеансов связи (СС));

3) нештатный полёт (требуется оперативное вмешательство в управление КА);

д) этап эксплуатации КА. Характеристика, влияющая на приоритет с точки зрения необходимости контроля и отслеживания работы КА на различных этапах его эксплуатации. В ходе опытной эксплуатации и летных испытаний предполагают особое внимание к таким КА. От этапа эксплуатации часто зависит количество необходимых КА сеансов связи в суточном интервале управления. Параметры:

1) опытная эксплуатация КА;

2) летные испытания;

3) ввод в состав ОГ;

4) штатная эксплуатация;

5) вывод из состава ОГ;

е) тип СС. Характеристика, которая определяет степень привязанности СС к конкретному витку или интервалу времени. Параметры:

1) текущий СС, реализация которого напрямую не зависит от результата проведения предыдущих СС;

2) зависимый СС, для которого важно время его реализации относительно других (другого) СС;

3) обязательный СС;

4) резервный СС;

5) отменённый (перенесен на другое время);

ж) режимы работы НСВ с КА (с условными обозначениями и номерами), используемые для проведения рассматриваемого сеанса связи, объединённые в группы (кластеры):

- 1) режимы управления КА, параметры:
  - разовые команды (РК, 101);
  - закладка специальной информации (СИ, 120);
  - передача программных команд (КП, 121);
  - передача командно-программной информации (КИ, 143);
  - работа в резерве (РЗ, 157);
- 2) режимы с особо важными операциями управления КА, параметры:
  - сеансы управления с особо важными операциями управления (ПК, 160);
  - временная программа (ВП, 102);
- 3) режимы обеспечения выполнения целевой задачи КА, параметры:
  - рабочая программа (РП, 103);
  - передача информации на пункт приема информации (НСК, 137);
  - закладка программы наведения (ЗПН, 106);
- 4) режимы обеспечения полёта КА, параметры:
  - эфемериды 1-го рода (Э1, 104), эфемериды 2-го рода (Э2, 105);
  - фазирование и коррекция (ФК, 107);
  - сверка шкал времени (СВ, 116);
  - измерение текущих навигационных параметров (ИК, 117);
  - закладка частотно- временных поправок (ЧВП, 122);
  - прослушивание (ПС, 133);
- 5) режимы оперативного приёма информации о состоянии КА, параметры:
  - телеметрия (ТМ, 112), непосредственный прием телеметрии (НП, 151);
  - телесигнализация (ТС КА, 113);
  - информация оперативного контроля (ИОК, 114);

- квити́рование (КВ, 115);
  - съём телеметрической информации (ТМИ) (применительно к КА ЦСКБ "Прогресс") на 2 (ВН, 161), 10 (ВД, 162), 4 (В1, 163) витках;
  - приём, регистрация и передача полных потоков ТМИ (ПТ, 171);
- б) режимы послесеансной передачи ТМИ с использованием наземных средств взаимодействия, параметры:
- перекачка информации (ПИ, 131);
  - передача информации в специальный центр (ЦК, 135);
  - передача информации в записи (ТЗ, 145);
- 7) режимы технического обслуживания, параметры:
- ремонт закрытого режима (РЗ, 124);
  - исследование (ИС, 130);
  - факультативный режим работы (ФТ, 132);
  - комплексная тренировка (КТ, 170).

Анализ приведенных факторов, влияющих на порядок задействования наземных средств взаимодействия с КА, позволяет выделить их следующие особенности:

- большое количество и разнообразие;
- преимущественно качественный характер;
- наличие взаимосвязей между факторами.

### **1.3 Основные требования к принятию решений о порядке задействования наземных средств**

Анализ данных о планируемых изменениях состава орбитальной группировки и наземных средств взаимодействия с КА [29, 51] показывает, что в период с 2018 по 2024 год при возрастании количества КА в 3,3 раза и наземных средств взаимодействия в 1,9 раза прогнозируемое количество требуемых сеансов связи возрастёт примерно в 4 раза, при этом средняя нагрузка на одно средство возрастёт примерно в 2,2 раза, что повышает вероятность возникновения спорных ситуаций по задействованию наземных средств взаимодействия.

Основными причинами возникновения спорных ситуаций по задействованию НСВ, приводящими к росту количества необходимых сеансов связи с КА, являются:

- а) рост состава орбитальной группировки космических аппаратов;
- б) возникновение ситуаций, оказывающих влияние на возможности использования средств взаимодействия по назначению, в том числе:
  - возникновение неисправностей или нештатных ситуаций при работе средств взаимодействия, средств обеспечения их работы или бортовой аппаратуры КА;
  - проведение unplanned эксплуатационных мероприятий на средствах взаимодействия;
  - изменение состава и состояния мультисервисной системы связи и передачи данных (МССПД);
  - изменения радиоэлектронной, метео-, гео- или гелиофизической обстановки в районах размещения средств взаимодействия;
  - изменение планов работ с КА, например, при оперативном перераспределении функций между отдельными КА для повышения качества и скорости получения целевой информации [10] и т.п.

Рост состава орбитальной группировки однозначно приводит к увеличению количества необходимых сеансов связи с КА. Ухудшение условий функционирования КА и использования наземных средств приводит, как правило, к увеличению количества требуемых сеансов связи и увеличению нагрузки на исправные средства. Необходимо также учитывать, что характеристики различных средств взаимодействия отличаются, что исключает их взаимозаменяемость, поэтому распределение нагрузки на исправные средства, вообще, и перераспределение нагрузки на исправные средства при изменении условий функционирования КА и использования наземных средств, в частности, осуществляются неравномерно. Возрастание количества необходимых сеансов связи с КА и нагрузки на отдельные средства взаимодействия с КА в условиях ограниченности количества и возможностей средств взаимодействия с КА и

использования малопунктной экономической структуры наземных комплексов управления (НКУ) КА [29] приводят к увеличению вероятности возникновения спорных ситуаций по задействованию наземных средств и, как следствие, к увеличению времени, необходимого для планирования задействования средств взаимодействия с КА. Малопунктная экономичная структура наземных комплексов управления (НКУ) КА, располагаемых на 4-х командно-измерительных пунктах (КИП): Восточном (ВКИП), Центральном (ЦКИП), Западном (ЗКИП) и Балтийском (БКИП), и, соответственно, малопунктные и ресурсосберегающие технологии информационного обмена с изделиями ракетно-космической техники [52], принятые при создании НАКУ КА НСЭН для экономии финансовых затрат на эксплуатацию наземных средств, накладывают определённые ограничения на состав и размещение наземных средств, определяемые как техническими требованиями к их функционированию, так и финансовыми возможностями.

Следует также учитывать, что рост количества участников информационного обмена с ЦСАКП требует дополнительных временных затрат и приводит к снижению ресурса времени на принятие решений по разрешению спорных ситуаций.

Анализ возникавших спорных ситуаций, состояния системы «Орбитальная группировка космических аппаратов (ОГ КА) – наземные средства взаимодействия с космическими аппаратами» и изменения времени формирования ПЗС показывает, что при оперативном планировании без привлечения средств сторонних организаций резерв времени позволял разрешать от 1-й до 3-х спорных ситуаций без нарушения сроков планирования. Результаты обработки статистических данных за период с 2012-го года по возникновению спорных ситуаций по задействованию НСВ указывают на восходящий тренд частоты возникновения более 3-х спорных ситуаций при увеличении количества требуемых сеансов связи (рисунок 2).

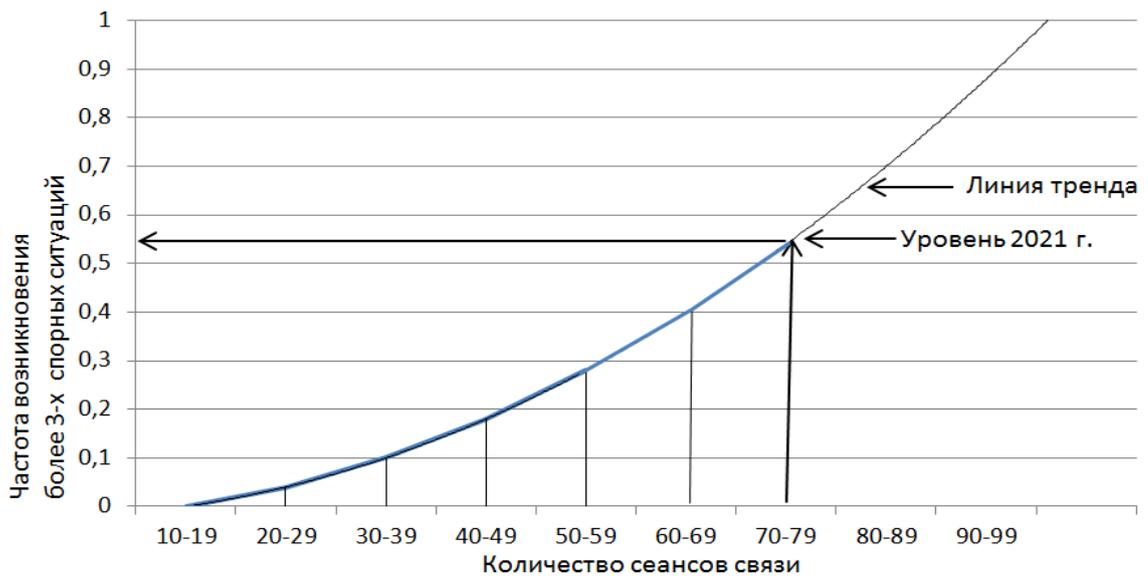


Рисунок 2 – Прогноз зависимости частоты возникновения более 3-х спорных ситуаций от количества требуемых сеансов связи

Под частотой понимается отношение количества оперативных планирований, при которых возникло более 3-х спорных ситуаций, к общему количеству оперативных планирований.

В документах по информационному обмену ЦСАКП с абонентами заданы некоторые ограничения, в частности – крайние сроки получения в ЦСАКП заявок на задействование средств, составляющие для базового ЦУП (БЦУП) космической системы «Ресурс-П» не позднее 2-х часов [53], для ЦУП КА «Канопус-В» – не позднее 45-ти минут до начала дозаказываемого сеанса связи при текущем планировании [54]. Учитывая необходимость предоставления порядка 15-ти минут для подготовки наземных средств к работе, минимальное время на разрешение возможных спорных ситуаций по задействованию наземных средств при текущем планировании, включая их идентификацию, расчёт значений приоритетов запросов, распределение их реализации по НСВ, формирование и согласование ПЗС, формирование распорядительных документов по реализации скорректированного ПЗС и их рассылка исполнителям, составит не более 30-ти минут. Исключая время на автоматизированное формирование и рассылку исполнителям распорядительных документов по реализации скорректированного ПЗС, составляющее порядка 5-ти минут, время на принятие решения о порядке

обслуживания запросов на проведение сеансов связи с КА при текущем планировании будет ограничено значением 25 минут. Время принятия и реализации решения может быть значительно ограничено при возникновении ситуаций, приведенных выше, ухудшающих условия функционирования средств взаимодействия с КА и оказывающих влияние на возможности их использования по назначению. При возникновении более 3-х спорных ситуаций по задействованию наземных средств при текущем планировании их своевременное разрешение организационным способом становится проблематичным.

Таким образом, с увеличением количества КА в составе ОГ (в соответствии с ФКП-2025 [51]) и изменением условий функционирования КА и применения наземных средств взаимодействия повышается вероятность возникновения спорных ситуаций по задействованию наземных средств, увеличивается время планирования задействования средств взаимодействия и повышается риск невыполнения требований по оперативности планирования задействования средств взаимодействия при оперативном (рисунок 3, где  $T_{ПЗС}^{доп}$  – допустимое время формирования Плана задействования средств, мин) и текущем планировании задействования наземных средств.

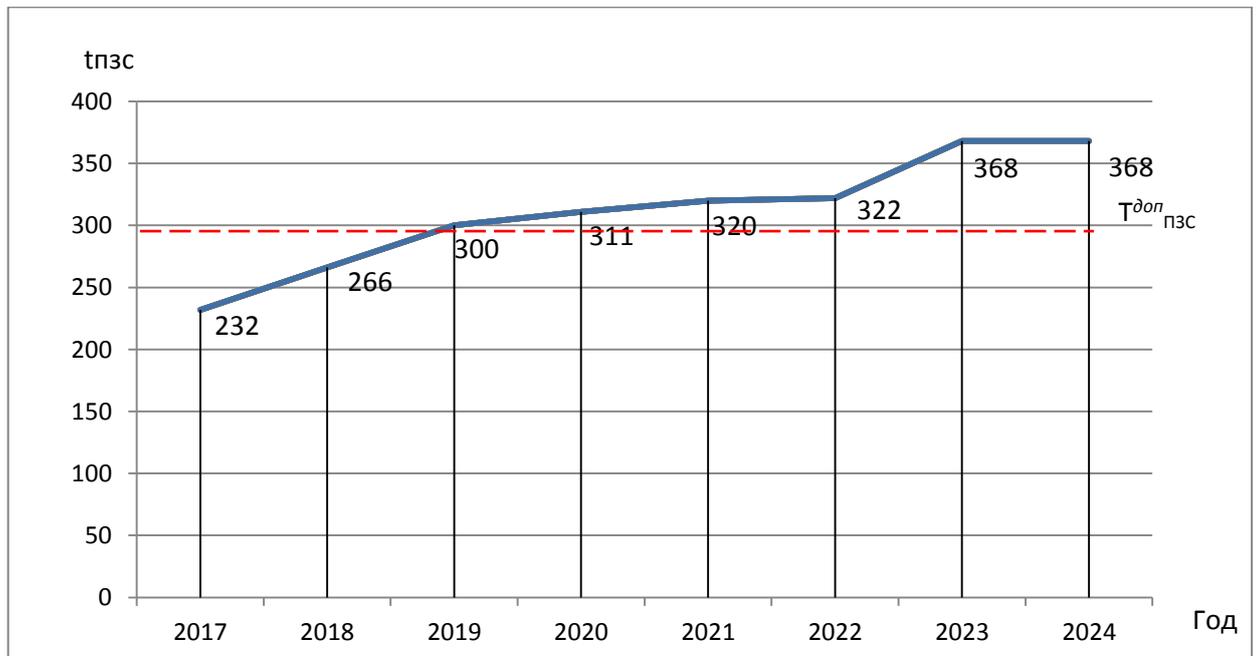


Рисунок 3 – Прогноз изменения времени формирования ПЗС ( $t_{ПЗС}$ , мин) по временным рубежам при оперативном планировании задействования НСВ

Возникает так называемый второй информационный барьер (по определению академика В.М. Глушкова), когда суммарная сложность задач по управлению выше способности системы управления по переработке информации.

Для преодоления данного барьера должна использоваться автоматизация всех информационных процессов, телекоммуникации и сетевые технологии. Объектом автоматизации являются функции, задачи и процессы, происходящие в системах управления. Автоматизация является также основным способом повышения обоснованности управленческих решений [55].

Ввиду особенностей планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами (по ЗРВ и ТЦУ), при возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств запрос на проведение сеанса связи с КА не может ждать обслуживания в очереди. Отсутствие либо принятие необоснованного решения по разрешению спорной ситуации может привести к нарушению сроков планирования и технологического цикла управления, потере связи с КА и самого КА [7, 56]. При недостаточности времени на принятие решений возможны ситуации, когда приходится остановиться на некотором до конца не продуманном варианте решения, поскольку время поиска наилучшего варианта оказалось исчерпанным [57].

Автоматизированная обработка запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами и их распределение по средствам взаимодействия сейчас осуществляются в порядке их поступления в ЦСАКП в предположении равнозначности запросов. Однако в действительности важность запросов может не соответствовать порядку их поступления на обработку.

Факторы, влияющие на определение порядка задействования наземных средств взаимодействия, для различных случаев используются разные (по усмотрению экспертов), что создаёт дополнительные трудности экспертам по разрешению спорных ситуаций. Оценить большое количество разнообразных факторов, влияющих на определение порядка задействования НСВ, особенно в условиях ограничения времени на принятие решений, затруднительно (максимальное число элементов, которые могут быть сравнены с какой-либо

достаточно разумной (психологически) уверенностью в согласованности, равно семи [3]). Основной вывод, к которому приходят авторы различных работ, заключается в том, что объём кратковременной памяти человека, определяющий его возможности по переработке информации, ограничен. В знаменитой статье Дж.Миллера [58] о «магическом числе  $7\pm 2$ » обобщены многочисленные эксперименты по изучению возможности человека перерабатывать информацию и различать уровни измерения стимулов и на большом фактическом материале сделан вывод, что пропускная способность человека как измерительного устройства ограничена числом  $7\pm 2$  бинарных единиц (битов) или чанков, которые воспринимаются испытуемым как один смысловой образ типа буквы или фразы. Г.Саймон [59] сделал вывод, что психологическая реальность достаточно хорошо продемонстрирована, а объём кратковременной памяти составляет от пяти до семи чанков.

Кроме этого, при одновременном анализе всех факторов с большой вероятностью возможны потери учёта взаимосвязей между факторами, относящимся к разным уровням анализа из-за разнообразия факторов.

Количественный и качественный подбор специалистов в экспертную группу не производится. Участие достаточно узкого круга лиц (обычно 3 человека) для принятия решений недостаточно с точки зрения обеспечения минимально необходимого значения доверительной вероятности результатов экспертной оценки, которое достигается при привлечении не менее семи экспертов [60]. Дополнительное привлечение квалифицированных специалистов при возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств в режиме реального времени управления космическими аппаратами затруднительно из-за наиболее вероятного отсутствия экспертов в нужное время (отпуска, болезни, отдых после смены и т.п.), а при возможности привлечения потребуются дополнительные временные затраты на согласование мнений, что при жёстких временных ограничениях на принятие решений нежелательно, при этом качественное согласование их мнений в этих условиях проблематично.

Математические оценки согласованности суждений каждого эксперта и мнений экспертов группы при принятии решений не производятся, что также снижает качество подготовленных решений. Принятие решений существенно зависит от человеческого фактора, особенно от ЛПР, что повышает субъективность принимаемых решений и снижает оперативность. Отсутствие численных оценок важности запросов на проведение сеансов связи с КА не позволяют объективно сравнивать эти запросы при разрешении спорных ситуаций и принимать обоснованные решения. Руководящие документы по принятию решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия при возникновении спорных ситуаций по их задействованию отсутствуют.

Низкое значение доверительной вероятности результатов экспертных оценок, отсутствие оценок согласованности экспертных данных, использование, в основном, качественных оценок важности запросов на проведение сеансов связи с КА, а также доминирующее влияние мнения лица, принимающего решения, создают значительные сложности при определении порядка задействования наземных средств взаимодействия, особенно при управлении космическими аппаратами в режиме реального времени из-за ограниченности времени на принятие и реализацию решений. Приведенные недостатки свидетельствуют о низком качестве подготавливаемых решений, невыполнении требований теории принятия решений к научному обоснованию решений и возможном нарушении временных нормативов планирования, что может привести к значительному ущербу управлению космическими аппаратами вплоть до потери космического аппарата.

Решения, реализуемые в виде ПЗС, должны удовлетворять потребности ЦУП по управлению КА, отражаемые в запросах на проведение сеансов связи. Перенос реализации запросов на другое время (средство) приводит к переносу выполнения (невыполнению в заданное в запросе время) заложенных в запросе операций, что может привести к ущербу управлению космическими аппаратами. Критерий минимизации возможного ущерба при разрешении спорных ситуаций по задействованию НСВ с КА был предложен ещё в начале создания НАКУ

народно-хозяйственного назначения [61], впоследствии НАКУ КА НСЭН и измерений. Определить размер возможного ущерба при разрешении спорных ситуаций не представляется возможным из-за отсутствия числовых значений факторов и функциональных зависимостей между факторами, влияющими на ущерб управлению КА, и величиной ущерба. Проведение экспериментов для получения статистических данных может привести к неприемлемому ущербу управлению космическими аппаратами, что не позволяет определить вероятность наступления (для предупреждения) неблагоприятного события, при котором возможно достижение порогового (неприемлемого) значения ущерба. Когда определить вероятность наступления последствий не представляется возможным из-за неопределённости, порождаемой множеством различных факторов, говорят о принятии решений в условиях риска [62]. Недостаточность познавательных средств не позволяет описать весь сложный комплекс причин, приводящих к определённым последствиям от принятых решений. Поэтому под минимизацией ущерба управлению КА в нашем случае будем понимать исключение случая непроведения сеанса связи по управлению КА, который по экспертным оценкам вызвал бы наиболее значимое нарушение процесса управления космическими аппаратами и программы целевого функционирования КА из состава орбитальной группировки.

Для принятия решений в условиях риска исследование предлагают начинать с установления существенных в данных условиях причин и выражения основных причинных отношений в количественной форме [63], что позволит прийти к некоторому оптимальному пути обдумывания в точной и достоверной форме [3]. Учитывая отсутствие формализации задачи определения размера ущерба управлению космическими аппаратами при переносе времени реализации запросов, для таких задач рекомендуется применять методы системного анализа с привлечением технологии экспертных оценок.

Практически в процессе принятия решения о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами происходит, в основном, качественное сравнение важности одних запросов относительно других

на основании сравнения факторов, влияющих на определение порядка обслуживания запросов, т.е. используется относительная оценка важности запросов качественного характера. Однако для выбора запросов, подлежащих реализации либо переносу необходимы количественные оценки в виде приоритетов, позволяющие проводить сравнение важности запросов. Под приоритетом запроса на проведение сеанса связи с космическим аппаратом будем понимать численное значение важности запроса на проведение сеанса связи с КА с точки зрения возможного ущерба управлению космическим аппаратом от переноса реализации запроса на другое время и/или другое средство. Использование численных значений приоритетов запросов позволяет не только обоснованно выбирать запросы для реализации в запланированное время и для переноса реализации на другое время и/или средство, но и определить степень превосходства одних запросов над другими, тем самым повысить обоснованность принимаемых решений за счёт снижения субъективизма, а также повысить оперативность принятия решений. В некоторых документах по созданию наземных комплексов управления КА (например, [64]) отмечается необходимость учёта приоритетности применения космических аппаратов.

Анализ приведенных недостатков существующего процесса принятия решений, а также возможные последствия обуславливают необходимость обеспечения обоснованности и оперативности принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с КА [16]. Обоснованность принимаемых решений определяется количественным и качественным составом экспертной группы и её способностью прийти к согласованному решению, а также правилами принятия решений. При организации работы экспертов важно использовать рекомендации теории принятия решений, позволяющие повысить качество принимаемых решений: способы получения информации от экспертов должны соответствовать возможностям человеческой системы переработки информации согласно данным психологических исследований, возможность проверки непротиворечивости полученной информации и исключения противоречий, любые соотношения между вариантами решений должны быть

объяснимы только на основе информации, полученной от экспертов, правила принятия решений должны быть математически обоснованы [6].

Поскольку группа людей, участвующих в подготовке данных для принятия решений, остаются людьми (экспертами) с их качественным интуитивным уровнем понимания сложности проблемы, нужно найти такой метод обработки мнений каждого эксперта в отдельности с последующим рассмотрением их в совокупности, чтобы максимально очистить окончательное решение всей группы от таких факторов, как:

- человеческая субъективность, свойственная каждому человеку;
- эмоциональный настрой на момент принятия решения;
- несущественные предпочтения и т.д.

Оперативность принятия решений, зависящая, в основном, от разрешения спорных ситуаций, должна удовлетворять заданным временным ограничениям при оперативном и текущем планировании. Возможности сокращения времени принятия решений определяются возможностями использования программных средств для ЭВМ при принятии решений, обеспечивающими также снижение влияния человеческого фактора. Возможность разработки программных средств для ЭВМ обеспечивается разработкой формальных моделей подготовки исходных данных [23] и расчёта значений приоритетов запросов, а также разработкой алгоритма планирования задействования средств с учётом приоритетов запросов, что позволит не только повысить оперативность принятия решений, но и повысить обоснованность управленческих решений, обеспечивающих в итоге достижение общей цели автоматизации управления – повышение эффективности использования объекта управления [55], в данном случае космических аппаратов. При этом должны соблюдаться принципы высокого уровня автоматизации управления КА и обоснованного использования средств взаимодействия с КА [31].

Обобщённую схему принятия обоснованного решения о порядке задействования наземных средств взаимодействия с КА можно представить в виде, изображённом на рисунке 4.



Рисунок 4 – Обобщённая схема принятия обоснованного решения о порядке задействования наземных средств взаимодействия с КА

Важнейшая особенность процедуры принятия решений группой экспертов состоит в том, что данная процедура должна быть вписана в цикл прямого управления космическими аппаратами и поэтому должна быть регламентирована соответствующими нормативно-правовыми и руководящими документами.

Учитывая все приведенные специфические особенности рассматриваемого процесса принятия решений, определим требования к данному процессу:

в части обеспечения обоснованности решений:

- обеспечить рациональную численность экспертной группы;
- определить требования к специалистам экспертной группы;
- способы получения информации от экспертов должны соответствовать возможностям человеческой системы переработки информации согласно данным психологических исследований;

- оценить возможности экспертной группы принимать согласованные решения;

- принятие решений должно осуществляться с учётом всего множества разнообразных взаимосвязанных между собой факторов качественного характера;

- должны быть сформулированы правила, определяющие работу экспертов;

- решение группы должно быть обосновано с точки зрения решающего правила;

- принимаемые решения должны быть объяснимы на основе экспертных данных;

в части обеспечения оперативности принятия решений:

- должны быть определены временные ограничения, в течение которых экспертная группа должна принимать решение;

- должна быть обеспечена возможность разработки программных средств для ЭВМ, используемых при принятии окончательных решений с целью соблюдения временных ограничений на время принятия решений.

#### 1.4 Выводы по первой главе

1. На основе проведенного системного анализа существующего процесса планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами показано, что усложнение данного процесса связано, в основном, с возникновением спорных ситуаций по задействованию наземных средств. Определены основные причины возможного возникновения спорных ситуаций, определяющей из которых является рост состава орбитальной группировки КА.

2. Определено, что при отсутствии возможности увеличения состава и возможностей наземных средств взаимодействия с КА из-за высоких финансовых затрат рациональным является совершенствование существующих технологий планирования задействования имеющихся наземных средств взаимодействия с КА.

3. Для оценки важности запросов на проведение сеансов связи обоснована необходимость использования обобщённого числового показателя – приоритета запроса, учитывающего все возможные для оценки факторы и их взаимосвязи.

4. В рамках совершенствования технологий задействования существующих наземных средств взаимодействия с КА заданы требования к принятию решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с КА, выполнение которых обеспечивает обоснованность и оперативность принятия решений.

## Глава 2. Иерархическая структура исходных данных

### 2.1 Определение состава экспертной группы

Состав исходных данных, их структуру и оценку важности определяют эксперты. В состав экспертной группы должны входить специалисты с опытом работы в области управления различными КА, планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА, желательно с опытом работы в области разрешения спорных ситуаций по задействованию наземных средств взаимодействия с КА, а также с максимально независимым (объективным) мнением.

Важное значение имеет количество специалистов в экспертной группе. В общем случае следует отметить, что численность экспертной группы зависит от требований к точности результатов экспертизы и допустимой трудоёмкости оценочных процедур [60]. При недостатке экспертов появляется излишнее влияние оценки каждого эксперта на общий результат, что увеличивает недостоверность групповой оценки, а при большом их количестве возникают трудности в выработке единого (консолидированного) мнения экспертной группы.

Границы интервала выбора количества экспертов в группе можно определить исходя из следующих соображений.

Рациональное увеличение количества экспертов в группе определим условием

$$\frac{\Delta P}{\Delta n} \geq 1 \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – количество единиц заданных значений градации шкалы доверительной вероятности результатов экспертной оценки;

$\Delta n$  – значение градации шкалы количества экспертов,  $\Delta n = 1,0$ .

Доверительная вероятность результатов экспертной оценки определяет степень доверия оценкам группы экспертов в зависимости от количества экспертов в группе (рисунок 5 [2]).

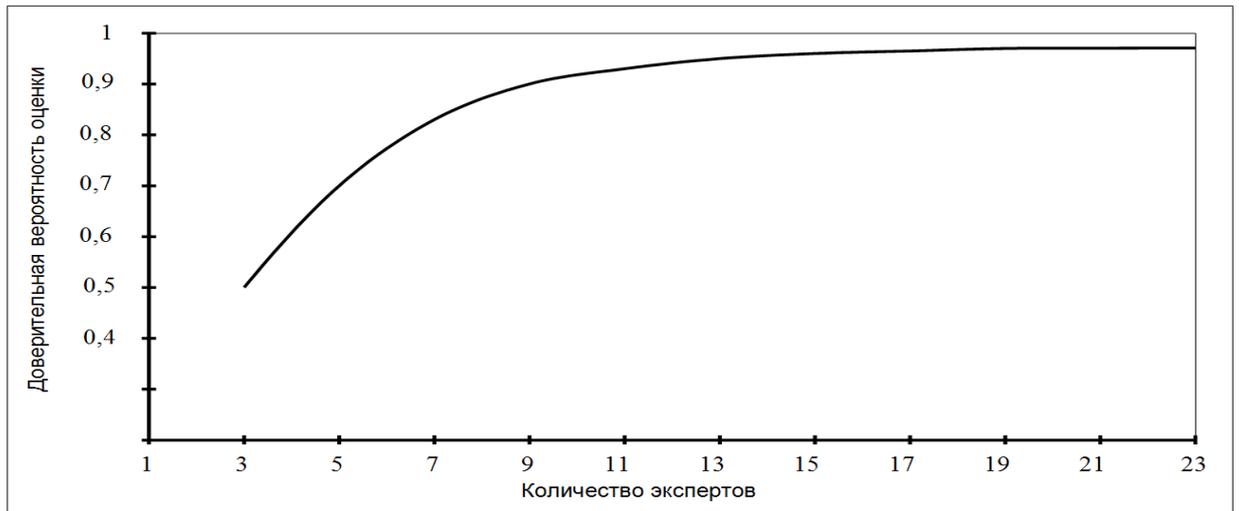


Рисунок 5 – Зависимость доверительной вероятности результатов экспертной оценки от количества экспертов в группе

Условие (1) определяет границу диапазона, на котором обеспечивается преобладающий рост доверительной вероятности результатов экспертной оценки относительно роста количества экспертов в группе. Количество экспертов, соответствующее максимальному значению доверительной вероятности данного диапазона, целесообразно принять за минимальное значение рационального диапазона выбора количества экспертов.

Аналогично можно определить границу диапазона увеличения количества экспертов, определяющую максимально допустимое количество экспертов, превышение которого не приводит к требуемому увеличению доверительной вероятности результатов экспертной оценки

$$\frac{\Delta P}{\Delta n} \geq k \quad (2)$$

где  $k$  – критерий, определяющий цену роста количества экспертов в группе, значение которого задаёт уполномоченный на это руководитель или руководитель экспертной комиссии, организующий по поручению ЛПР работу экспертной группы [65].

По графику на рисунке 5 можно определить, что условие (1) выполняется при увеличении количества экспертов до 7-ми (при заданном значении градации шкалы доверительной вероятности результатов экспертной

оценки, равном 0,05), а увеличение числа экспертов более 20-ти практически не повышает доверительной вероятности результатов экспертной оценки, что соответствует рекомендации литературы по теории принятия решений [60, 2] выбора на практике количества экспертов не менее семи, позволяющим обеспечить минимально необходимое значение доверительной вероятности результатов экспертных оценок, и не более двадцати.

## **2.2 Порядок формирования иерархической структуры исходных данных**

Приведенные выше (п.1.2) особенности факторов, такие как разнообразие и взаимосвязи между факторами, обуславливают необходимость их рассмотрения при анализе в виде иерархической структуры (ИС). Иерархическая структура исходных данных представляет собой набор элементов, располагаемых на различных уровнях, и их взаимосвязей. Элементами структуры являются факторы, влияющие на приоритеты запросов на проведение сеансов связи с КА. На верхнем уровне иерархической структуры располагается элемент, определяющий цель создания структуры, в данном случае – назначение приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, используемых для определения порядка обслуживания запросов на проведение сеансов связи с КА. На нижнем уровне ИС располагаются факторы, определяющие возможные сценарии обслуживания запросов, зависящие от важности запросов на проведение сеансов связи, подлежащих переносу на другое время и/или средство взаимодействия. Перенос реализации запросов приводит к переносу реализации заключённых в запросе операций, проводимых на космическом аппарате, возможному нарушению технологического цикла управления космическим аппаратом, как следствие, возможному ущербу управлению космическим аппаратом. Операции определяют основное содержание, цель выполнения и основное отличие запросов друг от друга. Поэтому именно состав операций определяет базовые элементы ИС, располагаемые на нижнем уровне ИС, от которых, в первую очередь, зависят приоритеты запроса на проведение сеанса связи с КА. Элементами, располагаемыми на вышерасположенных уровнях ИС, являются факторы, определяющие условия (ограничения) реализации

операций и оказывающие влияние на их приоритеты, такие как характеристики КА и их параметры. В иерархической структуре указываются все взаимосвязи между элементами разных уровней.

Качество принимаемых решений о порядке обслуживания запросов на проведение сеансов связи с КА существенно зависит от полноты учитываемых факторов и качества их учёта. Опыт планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА показывает, что состав учитываемых факторов в различных ситуациях может изменяться, поэтому в иерархическую структуру необходимо включить максимально возможное количество факторов, присущих для всех возможных ситуаций, которые могут быть проанализированы экспертами. Качество учёта факторов зависит от согласованности результатов, полученных при сравнении факторов. Достаточно разумная (психологически) уверенность в согласованности результатов сравнения элементов возможна при количестве сравниваемых элементов в группе не более семи [3]. При количестве элементов более семи они объединяются в кластеры (группы), что приводит к появлению новых элементов, которые назовём групповыми. Под элементом ИС будем понимать одиночные (негрупповые) элементы и группы элементов (групповые элементы).

Для обеспечения возможности сравнения элементов группы они должны быть независимыми. Объединение элементов в группы должно производиться по определённому функциональному признаку. При этом на одном уровне ИС должны находиться независимые элементы (группы элементов) одной функциональной принадлежности (одного типа), что обеспечивает возможность сравнительного анализа элементов, расположенных на каждом уровне ИС.

После получения от экспертов информации по составу элементов иерархической структуры и их взаимосвязям руководитель экспертной группы совместно с экспертами осуществляет обобщение полученных данных экспертного опроса и формирует обобщённую иерархическую структуру.

### **2.3 Принципы формирования иерархической структуры исходных данных**

С учётом изложенного сформулируем основные принципы формирования иерархической структуры исходных данных [23], соблюдение которых обеспечивает возможность эффективного анализа исходных данных с учётом взаимосвязей элементов и возможность реализации этапов определения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА с помощью программных средств:

1. Одному фактору соответствует один элемент иерархической структуры.

2. Учёт максимально возможного для экспертной оценки количества факторов, влияющих на значение приоритета запроса на проведение сеанса связи с КА. «Чем шире охватывается причинно-следственный комплекс, тем глубже вскрываются связи, ... что даёт возможность изучать причинные отношения между явлениями» [63].

3. На верхнем уровне ИС располагается элемент, определяющий целевую функцию – назначение приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА. На самом нижнем уровне ИС располагаются элементы, которые определяют возможные сценарии процесса разрешения спорных ситуаций. Этими элементами являются операции, входящие в состав запросов на проведение сеансов связи с КА и проводимые на космическом аппарате, которые назовём базовыми элементами (БЭ). На вышерасположенных уровнях располагаются элементы, определяющие условия (ограничения) реализации операций и оказывающие влияние на приоритеты операций [66].

4. Классификация всей совокупности факторов по типам, каждый тип факторов располагается на отдельном уровне ИС. Элементы каждого уровня ИС должны быть независимы друг от друга, так как в противном случае один элемент может получить дополнительный приоритет за счёт перекрытия некоторого признака, свойственного данному элементу, с другим признаком, что вызовет его двойной учёт [3].

5. В случае расположения на одном уровне ИС свыше семи элементов, они функционально объединяются в группы, в каждой из которых не более семи элементов, образуя новые уровни. Процедура объединения повторяется до тех пор, пока не получится окончательная декомпозиция, при которой каждая группа будет иметь не более семи образующих элементов.

6. Любой элемент ИС, кроме верхнего уровня, должен иметь связь хотя бы с одним элементом вышерасположенного уровня, влияющим на элемент данного уровня с точки зрения целевой функции.

## **2.4 Формальное представление иерархической структуры исходных данных**

В соответствии с принципами формирования иерархической структуры и на основе анализа состава факторов, влияющих на приоритеты запросов на проведение сеансов связи с КА (п.1.2), разработана иерархическая структура исходных данных, представленная на рисунке 6.

Иерархическая структура представляется в виде графа. Каждому фактору соответствует один элемент – вершина графа. Нумерация уровней графа осуществляется сверху вниз. На первом (верхнем) уровне иерархической структуры располагается целевая функция – приоритет запроса на проведение сеанса связи с КА, на самом нижнем уровне – операции (режимы работы НСВ), на уровне выше – группы операций (режимов работы НСВ), на вышерасположенных уровнях – характеристики КА и параметры характеристик КА. Названия и условные номера операций, расположенных на нижнем уровне структуры, приведены в п.1.2.

Каждый элемент иерархической структуры имеет наименование (применительно к режимам работы технических средств – номер режима), порядковый номер ( $p$ ) среди элементов своего уровня ( $r$ ) и весовой коэффициент ( $k_{pq}^r$ ), отражающий его влияние (приоритет) на элемент ( $q$ ) вышерасположенного уровня ( $r-1$ ).

Формально иерархическая структура  $S$  представляется множеством вершин  $V$  и связей  $SV^u$  между ними:

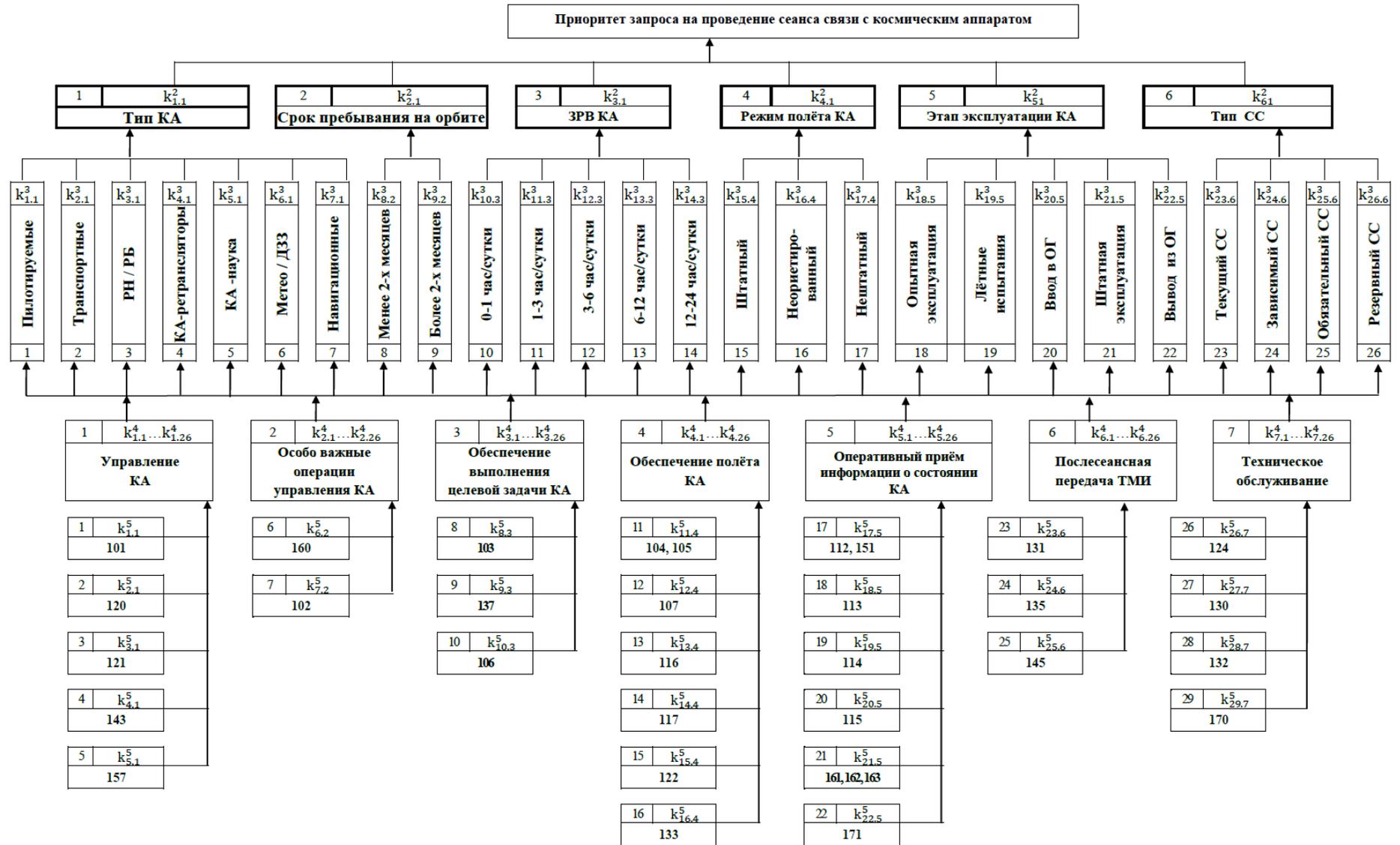


Рисунок 6 –Иерархическая структура исходных данных

$$S = \{V, SV^u\}. \quad (3)$$

Множества  $V$  и  $SV^u$  представляют собой соответственно объединения множеств порядковых номеров вершин всех уровней  $P^r$  и их межуровневых связей  $SV^{r,u}$ :

$$V = U_{r=1}^{R_{\max}} \cdot P^r, \quad (4)$$

$$SV^u = U_{r=1}^{R_{\max}} SV^{r,u}, \quad (5)$$

$$P^r = \{p^r\}, p^r = \overline{1, P_{\max}^r}, \quad (6)$$

$$SV^{r,u} = \{sv_{p,q}^{r,u}\}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = p^r = \overline{1, P_{\max}^r}, q = q^{r-1} = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}, \quad (7)$$

$$sv_{p,q}^{r,u} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } p \text{ яруса } r \\ & \text{соединена с вершиной } q \\ & \text{вышерасположенного яруса } r-1; \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (8)$$

$$R = \{r\}, r = \overline{1, R_{\max}}, \quad (9)$$

где  $U$  – символ объединения множеств;

$R$  – множество номеров уровней;

$r$  – номер уровня;

$R_{\max}$  – количество уровней графа;

$p^r$  – порядковый номер вершины на уровне  $r$ ;

$P_{\max}^r$  – максимальный номер вершины на уровне  $r$ ;

$q^{r-1}$  – порядковый номер вершины на уровне  $r-1$ ;

$Q_{\max}^{r-1}$  – максимальный номер вершины на уровне  $r-1$ .

Применительно к группам вершин структуры  $S$  определены:

– множество  $G^r$  номеров групп вершин  $r$ -го уровня

$$G^r = \{g^r\}, g^r = \overline{1, G_{\max}^r}, \quad (10)$$

– множество  $I^{r,g}$  номеров вершин в группе  $g$  уровня  $r$

$$I^{r,g} = \{i^{r,g}\}, i^{r,g} = \overline{1, I_{\max}^{r,g}}, \quad (11)$$

– соответствие множества  $I^{r,g}$  групповых номеров вершин множеству  $P^r$  их порядковых номеров на уровне  $r$

$$I^{r,g} \rightarrow P^r, r = \overline{1, R_{\max}}, \quad (12)$$

– множество  $SV^g$  групповых связей

$$SV^g = U_{r=1}^{R_{\max}} SV^{r,g}, \quad (13)$$

$$SV^{r,g} = \{ sv_{i,j}^{r,g,g^1} \}, r = \overline{1, R_{\max}}, i = \overline{i^{r,g} = 1, I_{\max}^{r,g}}, j = \overline{j^{r-1,g^1} = 1, J_{\max}^{r-1,g^1}}, g = \overline{g^r = 1, G_{\max}^r}, \quad (14)$$

$$sv_{i,j}^{r,g,g^1} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } i \text{ группы } g \text{ яруса } r \\ & \text{соединена с вершиной } j \text{ группы } g^1 \\ & \text{вышерасположенного яруса } \neq 1; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (15)$$

– соответствие множества групповых связей множеству межуровневых связей:

$$SV^g \rightarrow SV^u, \quad (16)$$

где  $g^r$  – номер группы вершин уровня  $r$ ;

$G_{\max}^r$  – количество групп вершин уровня  $r$ ;

$i^{r,g}$  – номер вершины в группе  $g$  уровня  $r$ ;

$I_{\max}^{r,g}$  – количество вершин в группе  $g$  уровня  $r$ ;

$j^{r-1,g^1}$  – номер вершины в группе  $g^1$  уровня  $r-1$ ;

$J_{\max}^{r-1,g^1}$  – количество вершин в группе  $g^1$  уровня  $r-1$ .

Формальное представление исходных данных является основой для выполнения и формализации этапов подготовки данных для расчёта значений приоритетов.

## 2.5 Выводы по второй главе

1. Определены требования к качеству экспертной группы. Предложены математические условия, определяющие выбор диапазона рационального количества экспертов в группе, подтверждающие рациональность состава экспертной группы от семи до двадцати специалистов.

2. Определён порядок формирования, разработаны принципы формирования, формальная модель представления и иерархическая структура исходных данных, являющиеся основой для выполнения и формализации этапов подготовки данных для расчёта значений приоритетов.

### **Глава 3. Методика назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратам**

#### **3.1 Обоснование использования метода анализа иерархий**

Качественный характер факторов, отсутствие численных значений факторов и функциональных зависимостей между ними обуславливает необходимость использования метода экспертных оценок. Экспертные оценки, получаемые на основе суждений экспертов при проведении экспертных опросов, являются основой принимаемых решений. С суждениями трудно работать, кроме того, они меняются в широком диапазоне. Но можно исследовать согласованность суждений и тем самым обосновать их использование [3]. Наличие зависимостей между факторами обуславливает необходимость их представления в виде иерархической структуры. Для анализа качественной информации, представленной в виде иерархической структуры, очень эффективным из известных является метод анализа иерархий (в английской транскрипции Analytic Hierarchy Process – АНР [67]), разработанный для моделирования неструктурированных задач. В соответствии с данным методом сложная задача декомпозируется на более простые составные части [68], в частности – группы анализируемых элементов, располагаемых на разных уровнях иерархии, парные сравнения внутри групп.

Метод анализа иерархий базируется на использовании результатов экспертных опросов, относительно которых делаются следующие предположения, при которых возможно получение согласованных экспертных оценок.

1. Несмотря на возможность различными людьми оценивать действительность различным образом, непосредственный опыт общения с действительностью при наличии общих целей и общего понимания позволяет получить достаточно близкие оценки.

2. Суждения должны стремиться к согласованности, являющейся желаемой целью. Согласованность является центральной проблемой в суждениях и в мыслительном процессе.

3. Для получения лучшей согласованности при проведении экспертных опросов следует систематически направлять суждения экспертов. Целью является повышение объективности и понижение слишком большой субъективности.

Для получения согласованных результатов при проведении экспертных опросов требуется:

1. Найти такую шкалу, применение которой позволит различать индивидуальные мнения так, чтобы можно было доверять соответствию между качественными суждениями и числами этой шкалы.

2. Разработать формальный метод для получения численных оценок суждений и сравнений.

3. Иметь возможность определить количественную величину согласованности суждений экспертов.

В работе использованы следующие возможности метода анализа иерархий.

1. Метод базируется на относительных качественных оценках сравниваемых объектов. При отсутствии численных значений оцениваемых характеристик объектов человеку свойственно делать качественные оценки, а при определении предпочтений – сравнительные качественные оценки. Относительные сравнения в большей степени соответствуют логике суждений человека, чем абсолютные. При этом наиболее точными являются оценки при одновременном сравнении минимального количества элементов, т.е. парные сравнения, поскольку расчленение суждений на элементарные компоненты – пары лучше подходит к познавательной манере человека. «Используя парные сравнения можно справиться с факторами, которые обычно не поддаются эффективной количественной оценке» [3] и получить на качественном уровне экспертные оценки относительной важности факторов, являющиеся исходной информацией для определения важности запросов в виде численных значений приоритетов запросов [25].

Объединение в группы (до 7-ми) анализируемых элементов представляет собой очень эффективный способ исследования сложных проблем, поскольку предпочтительнее оперировать  $n$  множествами  $m$  переменных, чем одновременно

*n*хт переменными, что обеспечивает бóльшую согласованность экспертных данных при условии ограниченной способности мозга сравнивать больше, чем  $7 \pm 2$  элементов одновременно. При объединении элементов в группы не более семи, снижающем размерность задачи анализа, и применении парных сравнений, грубые ошибки, приводящие сразу к большому количеству противоречий, встречаются редко (один-два случая на 50 ответов), эти ошибки явные и заметные, что позволяет их быстро скорректировать и получать оценки, более соответствующие реальности. Объединение элементов ИС в группы и попарное сравнение элементов одного уровня значительно упрощает процесс анализа без ухудшения качества получаемых результатов, так как производится достаточно просто и занимает немного времени [3]. Одновременная оценка большого количества факторов (более семи) значительно затрудняет работу экспертов и снижает качество получаемых оценок.

Одним из условий воспроизводства реальности измерениями [3] является установление соответствия между качественными суждениями и числами шкалы оценок. Чёткое осознание различий есть процесс выявления степени различий между событиями через число [69]. Используемые в методе анализа иерархий значения качественных и количественных оценок соответствуют логике оценок человека.

Использование парных сравнений, относительных качественных и количественных оценок, объединение сравниваемых элементов в группы не более семи, соответствующие возможностям человеческой системы переработки информации, позволяют обосновать оценки с психологической точки зрения и получить описание неструктуризованной задачи, более близкое к реальному.

2. Возможность учёта множества разнообразных и взаимосвязанных между собой факторов качественного характера при принятии решений путём представления факторов, влияющих на принятие решений, в виде иерархической структуры и использования аппарата экспертных оценок.

3. Возможность проверки информации на непротиворечивость (согласованность) с использованием специальных процедур метода анализа

иерархий посредством индекса и отношения согласованности как для отдельных матриц, так и для иерархии ИС. Проверка согласованности экспертных данных осуществляется на всех возможных уровнях: личном (суждений каждого эксперта), групповом (мнений группы экспертов) и иерархии иерархической структуры. Получение непротиворечивых экспертных оценок является основой для их последующего использования, а также для подбора состава экспертной группы.

4. Возможность представления и обработки совокупности оцениваемых экспертами факторов в виде иерархической структуры позволяет учитывать взаимосвязи разнообразных элементов ИС при анализе различных ситуаций и расчёте значений приоритетов. Анализ приоритетов элементов по нисходящим уровням иерархии позволяет понять, как получены те или иные значения приоритетов (вариантов) решения. Поэтому любые соотношения между вариантами решений в методе анализа иерархий объяснимы на основе информации, полученной от экспертов (четвёртая аксиома метода анализа иерархий [3]).

5. «Для достоверного отражения объективных явлений и процессов ... следует количественно описать самые существенные взаимосвязи. Это неременное условие научного планирования и управления» [63]. Математическая правомочность решающего правила в методе анализа иерархий базируется на методе собственного значения и принципа иерархической композиции, имеющих чёткое математическое обоснование.

6. Возможность обработки экспертных данных группы экспертов в части обобщения суждений экспертов и оценки согласованности обобщённых мнений.

7. Математический аппарат работы с суждениями экспертов позволяет разработать формальные модели для последующей разработки программных средств для ЭВМ, используемых при принятии решений.

8. Выработка согласованного решения экспертной группы на основании мнений экспертов заключается в обработке совокупности индивидуальных

оценок, включённых в матрицы сравнений, и последовательной обработке обобщённых мнений, соответствующих каждому уровню иерархии.

Приведенные возможности метода анализа иерархий свидетельствуют о его соответствии приведенным выше (п.1.3) требованиям к принятию решений, включая рекомендации по принятию научно обоснованных решений [3, 6], что обусловило выбор метода анализа иерархий для решения задачи назначения приоритетов запросов. Применение других методов принятия решений, отличающихся от выбранного источниками и видом представления исходной информации, а также способами их обработки неприемлемо из-за невозможности обработки исходной информации в виде иерархической структуры и недостаточном соответствии требованиям научного обоснования решений.

Человеко-машинные системы для решения рассматриваемой задачи отсутствуют, их разработка потребует значительных финансовых и временных затрат, а использование в диалоговом режиме при управлении космическими аппаратами в реальном масштабе времени маловероятно из-за ограниченности временных ресурсов на принятие решений.

Возможности метода анализа иерархий позволили использовать его в различных областях [70–76], при решении экономических, социальных, политических, военных и других задач [3], включая диссертационные работы (например, [77, 78]).

Базируясь на основные положения теории анализа иерархий, предположения и требования для получения согласованных результатов, в основу разработанной методики назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА положены:

– руководящая идея, заключающаяся в возложении ответственности за принятие решения не одному, а некоторому количеству человек, хорошо понимающим суть поставленной задачи, сводящейся к определению последствий принятого решения, приводящих к ущербу управлению космическими аппаратами, и каким образом избежать максимального ущерба, какое решение в

интуитивном смысле является наиболее правильным, что в совокупности обеспечивает обоснованность принимаемых решений;

- механизм наиболее правильного подбора членов экспертной группы, способных прийти к согласованному мнению;

- обязательным является учёт характеристик космических аппаратов и наземных средств взаимодействия и их параметров, а также условий их функционирования в качестве взаимодействующих факторов, что, в конечном счёте, должно привести к принятию обоснованного решения;

- использование иерархической схемы взаимодействия различных решающих факторов, определяющих в конечном счёте искомый приоритет запросов на проведение сеансов связи с КА;

- применение парных сравнений, построение матриц отношений и матриц сравнений, позволяющие переводить качественные оценки экспертов в количественные показатели;

- использование важнейших свойств матрицы сравнений, заключающихся в том, что собственное значение является мерой согласованности суждений эксперта, а собственный вектор обеспечивает упорядочение приоритетов;

- учёт влияния факторов одного уровня иерархической структуры на факторы других уровней иерархии путём взвешивания значений приоритетов факторов нижерасположенных уровней иерархии через значения приоритетов факторов вышерасположенных уровней иерархии;

- метод выделения из совокупности мнений экспертной группы обобщённого (среднего) согласованного мнения, использование которого позволяет выделять мнения отдельных экспертов группы, которые сильно расходятся со средним мнением группы и препятствуют получению согласованного решения, что приводит к необходимости замены их в группе и привлечений новых членов группы.

В методе анализа иерархий матрицы сравнений имеют определяющее значение. Для расчёта итогового значения приоритета необходим метод определения силы, с которой различные элементы одного уровня влияют на

элементы другого уровня, чтобы можно было вычислить величину воздействий элементов самого низкого уровня на общую цель. В теории анализа иерархий воздействие элементов определяется через значения приоритетов элементов иерархической структуры, которые вычисляются на основании данных, представленных в матрицах сравнений.

Рассмотрим элементы  $C_1, \dots, C_n$  некоторого уровня иерархии. Необходимо определить веса  $w_1, \dots, w_n$  их влияния на некоторый элемент следующего уровня. Основным инструментом будет матрица чисел, представляющих суждения о парных сравнениях. Показано, почему для представления приоритетов выбран собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению [3].

Обозначим через  $a_{ij}$  значение, соответствующее значимости элемента  $C_i$  по сравнению с  $C_j$ . Матрицу, состоящую из этих чисел, обозначим через  $A = (a_{ij})$ .

Для обратно-симметричных матриц справедливо  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ . Если суждение эксперта совершенно при всех парных сравнениях элементов, то  $a_{ij} = a_{ik} a_{kj}$  для всех  $i, j, k$  и матрицу  $A$  называют согласованной.

Очевидным для согласованной матрицы является случай, когда сравнения основаны на точных измерениях, т.е. веса  $w_1, \dots, w_n$  известны, тогда

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (17)$$

и поэтому

$$a_{ij} a_{jk} = \frac{w_i}{w_j} \frac{w_j}{w_k} = \frac{w_i}{w_k},$$

$$a_{ji} = w_j/w_i = \frac{1}{w_i/w_j} = 1/a_{ij}.$$

Этот случай рассмотрим подробнее. Матричное уравнение

$$A \cdot x = y,$$

где  $x = (x_1, \dots, x_n)$  и  $y = (y_1, \dots, y_n)$  соответствует краткой записи системы уравнений

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Теперь из (17) получаем

$$a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1, i, j = 1, 2, \dots, n,$$

следовательно,

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \frac{1}{w_i} = 1, i = 1, 2, \dots, n,$$

или

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = n w_i, i = 1, 2, \dots, n,$$

что эквивалентно выражению

$$Aw = nw. \quad (18)$$

В теории матриц эта формула отражает то, что  $w$  – собственный вектор матрицы  $A$  с собственным значением  $n$ . Уравнение (18), расписанное поэлементно, выглядит следующим образом:

$$A = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим конкретный случай, в котором  $a_{ij}$  основаны не на точных измерениях, а на субъективных суждениях. В данном случае  $a_{ij}$  будет отклоняться от «идеальных» отношений  $w_i/w_j$ , и поэтому уравнение (18) более не будет иметь места. Полезными оказываются следующие два факта из теории матриц.

Первый факт: если  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – числа, удовлетворяющие уравнению

$$Ax = \lambda x,$$

т.е. являются собственными значениями  $A$ , и если  $a_{ii}=1$  для всех  $i$ , то

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = n.$$

Поэтому если имеет место (18), то все собственные значения – нули, за исключением одного, равного  $n$ . Ясно, что в случае согласованности  $n$  есть наибольшее собственное значение матрицы  $A$ .

Второй полезный факт заключается в том, что если элементы  $a_{ij}$  положительной обратно-симметричной матрицы  $A$  незначительно изменить, то собственные значения также изменятся незначительно.

Объединяя эти результаты, находим, что если диагональ матрицы  $A$  состоит из единиц ( $a_{ii} = 1$ ) и  $A$  – согласованная матрица, то при малых изменениях в  $a_{ij}$  наибольшее собственное значение  $\lambda_{max}$  остаётся близким к  $n$ , а остальные собственные значения – близкими к нулю.

Поэтому можно сформулировать следующую задачу: если  $A$  – матрица значений парных сравнений, то для нахождения вектора приоритетов нужно найти вектор  $w$ , который удовлетворяет

$$Aw = \lambda_{max} w.$$

Так как желательно иметь нормализованное решение, слегка изменим  $w$ , полагая  $\alpha = \sum_{i=1}^n w_i$  и заменим  $w$  на  $(1/\alpha)w$ . Это обеспечивает единственность, а также

соблюдение условия  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ .

Поскольку малые изменения в  $a_{ij}$  вызывают малое изменение  $\lambda_{max}$ , отклонение  $\lambda_{max}$  от  $n$  является мерой согласованности. Для проведения парных сравнений  $n$  объектов при условии, что каждый объект представлен в данных по крайней мере один раз, требуется  $(n-1)$  суждений о парных сравнениях. Даже при использовании для суждений всех действительных чисел до тех пор, пока не будет суждений по основным  $(n-1)$  объектам, получить согласованные числа невозможно. Для большинства задач очень трудно определить  $(n-1)$  суждений, связывающих все объекты или виды действий, одно из которых является абсолютно верным. Отклонение от согласованности можно оценить разностью  $\lambda_{max} - n$ , разделённой на  $(n-1)$ . Оно позволяет оценить близость полученной шкалы к основной шкале отношений. Поэтому индекс согласованности  $(\lambda_{max} - n)/(n-1)$  рассматривается как показатель «близости к согласованности». Заметим, что неравенство  $\lambda_{max} \geq n$  всегда верно (теорема 7.14). В общем случае, если индекс согласованности  $\leq 0,1$ , можно быть удовлетворенным суждениями.

Доказаны [3] утверждения о том, что положительная обратнo-симметричная матрица согласована тогда и только тогда, когда  $\lambda_{max}=n$ ; о том, что если  $A$  – положительная и согласованная матрица, то  $a_{ii}=1$  и  $a_{ij}=1/a_{ji}$ ; о том, что положительная матрица  $A$  согласованна в том и только в том случае, если она единичного ранга и элементы её главной диагонали равны единице.

Приведенные сведения обосновывают возможность использования матриц сравнений для определения частных и на их основе обобщённых значений приоритетов элементов (факторов) иерархической структуры путём вычисления главного собственного вектора, а также для оценки согласованности суждений каждого эксперта на основе максимального собственного значения. Полученные частные значения приоритетов используются для последующей оценки согласованности мнений группы экспертов, вычисления обобщённых значений приоритетов элементов иерархической структуры и приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА.

На основе метода анализа иерархий разработана методика назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, включающая подготовку данных и расчёт значений приоритетов запросов.

### **3.2 Модель подготовки данных для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи**

В соответствии с методом анализа иерархий, разработанной Т. Саати [3], определение приоритетов осуществляется в определённой последовательности. На каждом из этапов этой последовательности используются элементы, включающие: иерархическую структуру исходных данных, матрицы отношений, матрицы сравнений, значения весовых коэффициентов элементов иерархической структуры исходных данных, приоритеты элементов иерархической структуры исходных данных. Для расчёта значений приоритетов запросов используются только данные, проверенные на согласованность.

Подготовка данных для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА включает прохождение следующих этапов:

1. Формирование матриц отношений.

2. Формирование частных матриц сравнений. Оценка согласованности суждений каждого эксперта.

3. Формирование обобщённых матриц сравнений. Оценка согласованности мнений группы экспертов.

4. Ранжирование результатов экспертных оценок.

5. Оценка согласованности иерархии.

6. Расчёт значений приоритетов элементов иерархической структуры. Формирование исходных матриц уровневых связей.

### 3.2.1 Формирование матриц отношений

#### 3.2.1.1 Порядок формирования матриц отношений

Формирование матриц отношений основано на методе парных сравнений. Преимущество данного метода заключается в том, что одновременно рассматриваются только два объекта и выясняется, как они соотносятся друг с другом.

Исходной информацией для матриц отношений является разработанная иерархической структура исходных данных. Каждая матрица отношений отражает качественные оценки попарных сравнений элементов определённого уровня иерархической структуры относительно элемента вышерасположенного уровня. Для формирования матрицы отношений выбирается один элемент вышерасположенного уровня и группа элементов нижерасположенного уровня, связанные с элементом вышерасположенного уровня, которые условно назовём кустом, например, группы элементов 1-5 самого нижнего уровня структуры, изображённой на рисунке 6, связанные с элементом 1 («Управление КА») вышерасположенного уровня. Эксперт проводит попарные сравнения элементов нижерасположенного уровня куста относительно вышерасположенного элемента (вершины) куста и назначает сравниваемым элементам качественные оценки, основанные на способности человека производить качественные разграничения пятью определениями: равный, слабый, сильный, очень сильный и абсолютный [3, 79], с учётом пояснений важности (превосходства), приведенных в таблице 1.

Таблица 1 –Оценки шкалы отношений

Численное значение оценки	Значение качественной оценки	Пояснение
1	Равная важность	Элементы имеют одинаковую важность, равный вклад в цель
3	Слабое, умеренное превосходство	Опыт и суждение дают легкое превосходство одного элемента над другим
5	Сильное, существенное превосходство	Имеются надежные данные или логические суждения, чтобы показать предпочтительность одного из элементов
7	Значительное превосходство	Убедительное свидетельство в пользу одного элемента перед другим, настолько сильное предпочтение, что элемент становится практически значительным
9	Абсолютное превосходство	Свидетельства в пользу предпочтения одного элемента перед другим в высшей степени убедительны

Суждения о важности элементов куста иерархической структуры отражаются в форме матрицы отношений, пример которой представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица отношений для 4-х сравниваемых элементов

Элем. сравнения	Степень превосходства	Абсолютное	Очень сильное	Сильное	Слабое	Равное	Слабое	Сильное	Очень сильное	Абсолютное	Элем. сравнения
$\mathcal{E}_n$	$m \rightarrow$ $l$ $\downarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\mathcal{E}_k$
$\mathcal{E}_1$	1	$C_{lm}^h$									$\mathcal{E}_2$
$\mathcal{E}_1$	2										$\mathcal{E}_3$
$\mathcal{E}_1$	3										$\mathcal{E}_4$
$\mathcal{E}_2$	4										$\mathcal{E}_3$
$\mathcal{E}_2$	5										$\mathcal{E}_4$
$\mathcal{E}_3$	6										$\mathcal{E}_4$

где  $\mathcal{E}_n, \mathcal{E}_k$  – левый (номер  $n, n = 1, 2, \dots, N-1$ ) и правый (номер  $k, k = n+1, n+2, \dots, N$ ) сравниваемые элементы матрицы отношений;

$m$  – номер столбца (отношения) матрицы отношений,  $m = \overline{1, M}$  ;

$M$  – количество отношений,  $M=9$ ;

$l$  – номер строки матрицы отношений,  $l = \overline{1, L}$  ;

$L$  – количество строк матрицы отношений, равное количеству парных сравнений

$$L = \frac{N(N-1)}{2}, \quad (19)$$

$N$  – количество элементов сравнения в данном кусте (группе).

Если элемент из левого столбца  $\mathcal{E}_n$  превосходит элемент из правого столбца  $\mathcal{E}_k$  по отношению к элементу вышерасположенного уровня, то отмечается (например, устанавливается равной единице) одна из позиций левее графы «Равное», если элемент из правого столбца  $\mathcal{E}_k$  превосходит элемент из левого столбца  $\mathcal{E}_n$  отметка ставится правее графы «Равное», при равной важности элементов отметка ставится в поле «Равное».

В связи с тем, что приоритет запроса отражает величину возможного ущерба управлению космическим аппаратом, то оценка степени превосходства элементов должна производиться с точки зрения возможного ущерба при переносе времени реализации запросов, для которых присущи факторы, соответствующие элементам иерархической структуры.

Каждый эксперт самостоятельно и независимо от других экспертов составляет все матрицы отношений для иерархической структуры.

### 3.2.1.2 Формальное представление матриц отношений

Формально матрица отношений представляет собой множество  $C^o$  в виде

$$C^o = \{c_{l,m}^{q,h}\}, l = \overline{1,L}, m = \overline{1,M}, h = \overline{1,H}, q = \overline{1,Q}, \quad (20)$$

где  $q$  – номер вершины вышерасположенного уровня ИС, с которым связана вершина данного уровня;

$Q$  – количество вершин на вышерасположенном уровне ИС;

$h$  – номер эксперта;

$H$  – количество экспертов.

Значения элементов матрицы отношений определяются скобкой (нотацией) Айверсона:

$$c_{l,m}^{q,h} = \begin{cases} 1, & \text{если } o_{l,m}^{q,h} = o_m^l; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (21)$$

где  $o_{l,m}^{q,h}$  – значение качественной оценки  $h$ -го эксперта по  $m$ -му столбцу при сравнении элементов  $\mathcal{E}_i$  и  $\mathcal{E}_j$   $l$ -ой строки по влиянию на элемент номер  $q$  вышерасположенного уровня;

$o_m^t$  – табличное значение качественной оценки по шкале отношений (таблица 1),  $o_m^t \in O^t$ ;

$O^t$  – множество табличных оценок:

$$O^t = \{o_m^t\}, \quad (22)$$

Количество матриц отношений ИС равно количеству кустов иерархической структуры.

### 3.2.2 Формирование частных матриц сравнений.

Оценка согласованности суждений каждого эксперта

#### 3.2.2.1 Порядок формирования матриц сравнений

На этапе формирования матриц сравнений осуществляется переход от качественных оценок в виде матриц отношений к количественным оценкам в виде матриц сравнений  $A = \{a_{i,j}\}$ , представляющих собой квадратную матрицу размерности  $N \times N$ , где  $N$  – количество сравниваемых элементов в кусте (группе). Матрицы сравнений соответствуют матрицам отношений, разработанным каждым экспертом.

Исходной информацией для формирования матриц сравнений являются разработанные матрицы отношений и оценки шкалы отношений (таблица 1). Выбор числовых значений основывается на склонности человека приводить оттенки чувств в соответствие с числами 1, 3, 5, 7, 9 [3].

Столбцы и строки матрицы сравнений соответствуют номерам сравниваемых элементов. Элементами матрицы сравнений являются численные значения относительной важности элементов, расположенных в левом столбце матрицы сравнений, по отношению к элементу, стоящему в верхней строке матрицы сравнений. Пример матрицы сравнений приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица сравнений

Сравниваемые элементы	1	2	...	$j$	...	$N$
1	1	$a_{1,2}$	...	$a_{1,j}$	...	$a_{1,N}$
2	$1/a_{1,2}$	1	...	$a_{2,j}$	...	$a_{2,N}$
...	...	...	...	...	...	...
$i$	$1/a_{1,i}$	$1/a_{2,i}$	...	$1/a_{i,j}$	...	$a_{i,N}$
...	...	...	...	...	...	...
$N$	$1/a_{1,N}$	$1/a_{2,N}$	...	$1/a_{j,N}$	...	1

Оценки соответствуют шкале отношений (таблица 1). Если элемент в левом столбце матрицы сравнений согласно матрице отношений превосходит элемент, стоящий в верхней строке матрицы сравнений, численное значение относительной важности ( $a_{i,j}$ ), соответствующее шкале отношений, будет больше единице, если не превосходит, то численное значение относительной важности будет равно обратной величине шкалы отношений, при равенстве важности – равно единице. Таким образом устанавливаются значения элементов матрицы сравнений, расположенные выше её главной диагонали. Значения диагональных элементов матрицы сравнений равны единице, поскольку важность элемента по отношению к самому себе одинакова (равна), значения поддиагональных элементов обратны симметричным относительно диагонали значениям наддиагональных элементов.

Данные матрицы используются для оценки согласованности результатов сравнительной оценки каждым экспертом важности элементов ИС на основе максимального собственного значения матрицы. Компоненты главного собственного вектора матрицы сравнений относятся к элементам, по которым вычисляется приоритет элементов матрицы сравнений и, соответственно, элементов иерархической структуры исходных данных.

### 3.2.2.2 Формальная модель представления и формирования матрицы сравнений

Матрицу сравнений  $A$  представим в виде объединения подмножеств  $A^d$ :

$$A = U_{d=1}^3 A^d, \quad (23)$$

$$A^d = \{a_{i,j}^d\}, d = \overline{1,3}, \quad (24)$$

где  $d$  – номер подмножества.

Числовые значения элементов матрицы сравнений формируются по следующим правилам [3]:

– числовое значение, определённое по шкале отношений, соответствующее отмеченной позиции в строке матрицы отношений, заносится в поле матрицы сравнения, координатами которого являются номера сравниваемых элементов из левого и правого столбцов матрицы отношений рассматриваемой строки:

$$A^1 = \{a_{i,j}^1\} = \{b_m, m: c_{l,m}^{q,h}=1, \varphi_2: l \rightarrow i^1, j^1, \varphi_1: m \rightarrow b_m\}; \quad (25)$$

– диагональ матрицы состоит из единиц, т.к. относительно самого себя элемент сравнения имеет такую же важность:

$$A^2 = \{a_{i,j}^2\} = \{1, i^2=j^2\}, \quad (26)$$

– элементы подмножества  $A^3$  обратно-симметричны элементам подмножества  $A^1$ , то есть в позиции  $(i, j)$  подмножества  $A^3$  должно стоять значение, обратное значению в позиции  $(j, i)$  подмножества  $A^1$ :

$$A^3 = \{a_{i,j}^3\} = \{1/b_m, i^3=j^1, j^3=i^1: A^3=A - U_{d=1,2} A^d\}, \quad (27)$$

где  $a_{i,j}^d$  – численное значение сравнительной оценки элементов подмножества  $A^d$  с номерами (координатами)  $i$  и  $j$ ;

$i, j$  – номера сравниваемых элементов, соответствующие номерам строк и столбцов матрицы сравнений  $(i, j = \overline{1, N})$ , верхние индексы определяют принадлежность к подмножеству  $A^d$ ;

$b_m$  – табличное численное значение качественной оценки;

$m$  – номер оценки (столбца);

$:$  – знак «такое, что»;

$U$  – знак объединения множеств;

$\varphi_1$  – табличное соответствие (таблица 4) между множествами элементов  $M$  и  $B$  состоит из упорядоченных пар, каждая пара  $(m, b_m) \in \varphi_1$  указывает, что элементу  $m \in M$ , для которого  $c_{l,m}^{q,h} = 1$ , соответствует элемент  $b_m \in B$  при данном (табличном) соответствии  $\varphi_1$

$$\varphi_1: M \rightarrow B, \quad (28)$$

$\varphi_2$  – табличное соответствие (таблица 5) между множеством номеров строк ( $L^c$ ) матрицы отношений и множеством координат ( $I^1, J^1$ ) элементов матрицы сравнений (множеством номеров сравниваемых элементов), состоит из упорядоченных пар, каждая пара  $((l, (i^1, j^1))) \in \varphi_2$  указывает, что элементу  $l \in L^c$  соответствует пара элементов  $(i^1, j^1) \in N^3$  при данном (табличном) соответствии  $\varphi_2$

$$\varphi_2: L^c \rightarrow (I^1, J^1), \quad (29)$$

где  $L^c = \{1, 2, \dots, L\}$  – множество номеров строк матрицы отношений;

$N^3 = \{1, 2, \dots, N\}$  – множество номеров элементов сравнения.

Таблица 4 – Соответствие  $\varphi_1$

$c_{l,m}^{q,h}$	$m$	$b_m$
1	5	1
1	4, 6	3, 1/3
1	3, 7	5, 1/5
1	2, 8	7, 1/7
1	1, 9	9, 1/9

Таблица 5 – Соответствие  $\varphi_2$  для 3-х элементов сравнения

$l$	$i^1$	$j^1$
1	1	2
2	1	3
3	2	3

Областью определения соответствия  $\varphi_1$  является множество  $M$  номеров строк, соответствующих номерам столбцов матрицы отношений, для которых значения элементов матрицы отношений равны единице:

$$\text{Dom } \varphi_1 = \{m \in M, m: c_{l,m}^{q,h} = 1, \exists b_m \in B: (m, b_m) \in \varphi_1\}. \quad (30)$$

Множеством значений соответствия  $\varphi_1$  является множество  $B$  табличных числовых значений, соответствующих качественным оценкам экспертов, для которых  $c_{l,m}^{q,h} = 1$ :

$$Im \varphi_1 = \{b_m \in B, m: c_{l,m}^{q,h} = 1, \exists m \in M: (m, b_m) \in \varphi_1\}, \quad (31)$$

где  $B = \{1, 3, 5, 7, 9\}$ ;

$\in$  – знак «содержится в» (принадлежность элемента множеству);

$\exists$  – квантор: существует по меньшей мере один элемент...;

$\rightarrow$  – символ однонаправленного следования;

$c_{l,m}^{q,h}$  – признак совпадения оценки эксперта и табличной оценки строки

$l$  столбца  $m$  матрицы отношений;

$l$  – номер строки матрицы отношений (номер парного сравнения, оценки).

Областью определения соответствия  $\varphi_2$  является множество  $L^c$  номеров строк матрицы отношений:

$$Dom \varphi_2 = \{l \in L^c: \exists (i^1, j^1) \in N^2: (l, (i^1, j^1)) \in \varphi_2\}, \quad (32)$$

Множеством значений соответствия  $\varphi_2$  является множество координат  $(I^1, J^1)$  элементов матрицы сравнений:

$$Im \varphi_2 = \{(i^1, j^1) \in N^2: \exists l \in L^c: (l, (i^1, j^1)) \in \varphi_2\}. \quad (33)$$

Соответствие  $\varphi_2$  определяется при построении матриц отношений.

Схема формирования элементов матрицы сравнений представлена на рисунке 7.

### 3.2.2.3 Оценка согласованности суждений каждого эксперта

Непротиворечивость (согласованность) экспертных оценок является основой обоснованности принимаемых решений. Согласованность – это следование логике при высказывании суждений. Согласованность предполагает соблюдение условия транзитивности и условия формирования согласованных экспертных оценок. Суть транзитивности в том, что если число  $a$  больше числа  $b$ , а число  $b$  больше числа  $c$ , то должно обеспечиваться выполнение условия  $a$  больше  $c$ .

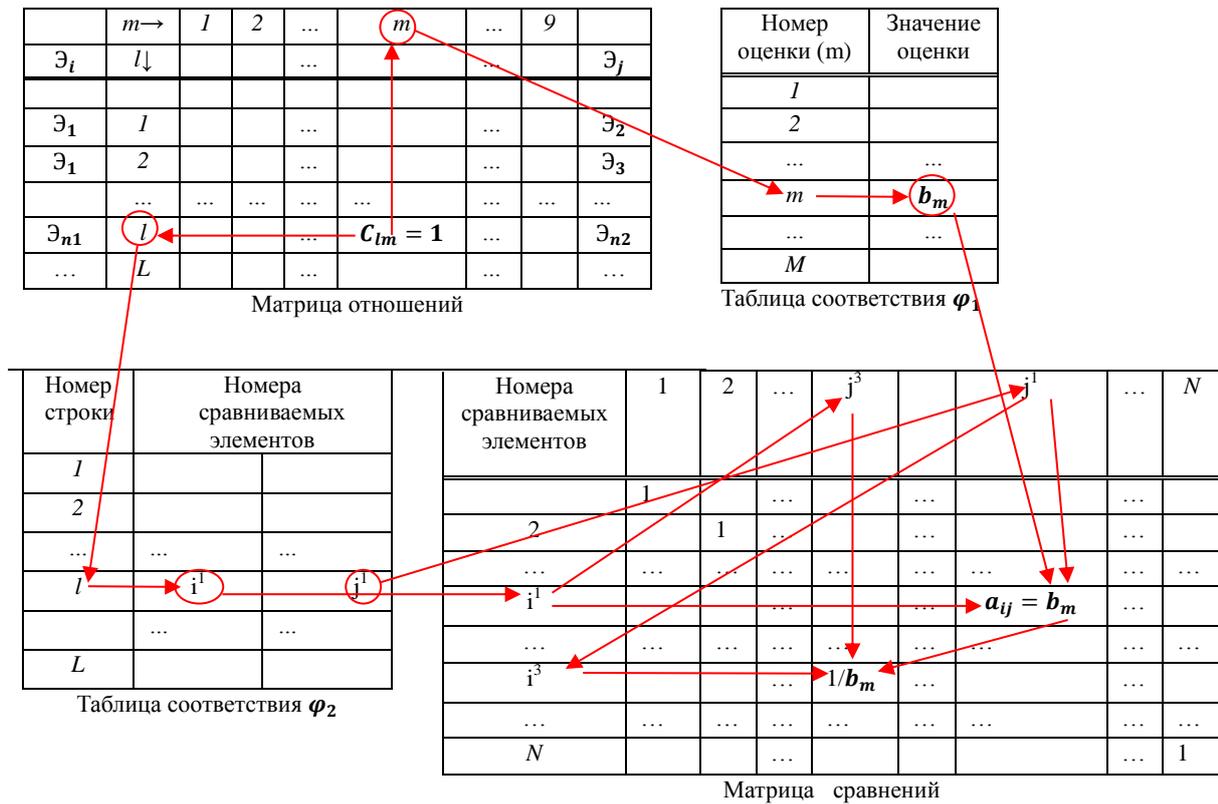


Рисунок 7 – Схема формирования элементов матрицы сравнений

Условие формирования согласованных экспертных оценок (формула согласованности 34) предполагает соблюдение количественного соотношения между экспертными оценками: например, если число  $a$  вдвое больше числа  $b$ , а число  $b$  втрое больше числа  $c$ , то число  $a$  должно быть больше числа  $c$  в шесть раз. При соблюдении формулы согласованности максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$  матрицы сравнений будет равно размерности  $n$  квадратной матрицы сравнений, что соответствует абсолютной согласованности. Поэтому мерой согласованности суждений эксперта является отклонение максимального собственного значения матрицы сравнений от размерности матрицы. Оценка согласованности матрицы сравнений определяется значением индекса согласованности ( $I_nC$ ), а согласованность суждений эксперта – значением отношения согласованности (ОС), формулы расчёта которых приведены ниже.

Если для элементов обратнo-симметричной матрицы сравнений  $A$  верно равенство

$$a_{ij} = a_{i,k} * a_{k,j}, i, j, k = 1, 2, \dots, N, \quad (34)$$

где  $N$  – размерность матрицы, то матрицу  $A$  называют согласованной, а суждение эксперта совершенным при всех сравнениях.

Попарные сравнения позволяют повысить согласованность путём использования всей возможной информации сравнений [3].

Для оценки согласованности суждений каждого эксперта выполняется проверка каждой матрицы сравнений на согласованность.

При использовании способа расчёта значений главного собственного вектора и максимального собственного значения согласно [3] проверка матрицы сравнений на согласованность выполняется в следующем порядке:

а) рассчитываем значения дополнительного столбца по формуле

$$d_i = \prod_{j=1}^N a_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (35)$$

б) рассчитываем значения главного собственного вектора (частные значения весовых коэффициентов элементов иерархической структуры) по формуле

$$w_i^s = \sqrt[N]{d_i}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (36)$$

в) рассчитываем сумму значений главного собственного вектора по формуле

$$W^s = \sum_{i=1}^N w_i^s, \quad (37)$$

г) рассчитываем значения нормализованного главного собственного вектора (вектора приоритетов) по формуле

$$w_i = w_i^s / W^s, \quad i = \overline{1, N}, \quad (38)$$

д) рассчитываем приближенное значение максимального собственного значения по формуле

$$\lambda_{max} = e^T A W \quad (39)$$

или в развёрнутом виде:

$$\lambda_{max} = (1, \dots, 1) \times \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} = \left( \sum_{i=1}^N a_{i1}, \dots, \sum_{i=1}^N a_{iN} \right) \times \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=1}^N a_{ij} w_j \right), \quad (40)$$

е) рассчитываем индекс согласованности ( $I_{HC}$ ) положительной обратносимметричной матрицы по формуле

$$I_{HC} = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1}, \quad (41)$$

ж) рассчитываем значения отношения согласованности (ОС), отражающего согласованность суждений, путём сравнения полученного значения индекса согласованности ( $I_{HC}$ ) со случайным индексом согласованности, соответствующим матрице со случайными суждениями того же порядка, по формуле

$$ОС = \frac{I_{HC}}{СИ}, \quad (42)$$

где СИ – среднее значение случайного индекса согласованности. Случайный индекс согласованности получен по результатам оценки согласованности сгенерированной случайным образом по шкале от 1 до 9 обратносимметричных матриц парных сравнений различных порядков с соответствующими обратными величинами элементов и определения среднего значения на базе 500 случайных выборок [3].

Значение СИ есть табличная величина, входным параметром для которой выступает значение  $N$  – размерность матрицы (таблица 6). Значение  $ОС \leq 0,1$  считается приемлемым [3, 79].

Таблица 6 – Среднее значение индекса согласованности в зависимости от размерности матрицы

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
СИ	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Если для матрицы сравнений значение  $ОС > 0,1$ , что свидетельствует о существенном нарушении логики суждений, допущенном экспертом при

проведении сравнений, эксперт обязан пересмотреть свои оценки. Эксперт, для которого не удаётся достигнуть требуемого значения ОС, исключается из экспертной группы. Проверяется достаточность (не менее семи) оставшегося количества экспертов в группе. При достаточности оставшегося количества экспертов проверяется согласованность их суждений (п.3.2.2.3), при недостаточности количества экспертов состав экспертной группы увеличивается, «новые» эксперты формируют матрицы отношений (п.3.2.1), по ним формируются матрицы сравнений (п.3.2.2) и проводится оценка согласованности суждений этих экспертов (п. 3.2.2.3).

Оценка согласованности суждений каждого эксперта осуществляется для всех матриц сравнений.

### 3.2.3 Формирование обобщённых матриц сравнений.

Оценка согласованности мнений группы экспертов

Значения элементов обобщённой матрицы сравнений  $A^{r,g}$  получаются путём усреднения суждений экспертов:

$$a_{i,j}^{r,g} = \sqrt[H]{\prod_{h=1}^H a_{i,j}^{h,r,g}}, \quad (43)$$

$$A^{r,g} = \{ a_{i,j}^{r,g} \}, \quad (44)$$

где  $r$  – номер уровня,  $r = \overline{1, R_{\max}}$ ;

$R_{\max}$  – максимальный номер уровня иерархии;

$g$  – номер группы элементов на уровне  $r$ ,  $g = \overline{1, G_{\max}^r}$ ;

$G_{\max}^r$  – количество групп элементов на уровне  $r$ ;

$i, j$  – соответственно номера строк и столбцов матрицы сравнений,  $i, j = \overline{1, N}$ ;

$N$  – количество строк (столбцов) матрицы сравнений;

$a_{i,j}^{h,r,g}$  – численная оценка  $h$  – м экспертом элемента, принадлежащего  $i$ –ой строке  $j$ –му столбцу матрицы сравнений  $g$  – ой группы  $r$ –го уровня;

$H$  – количество экспертов.

При усреднении оценок экспертов предпочтительно использовать среднегеометрические, а не среднеарифметические значения для снижения влияния больших отклонений оценок некоторых экспертов на общую оценку [3].

Оценка согласованности мнений группы экспертов проводится с целью обеспечения требуемой обоснованности принимаемых решений по полученным данным группы экспертов.

Проверка согласованности мнений группы экспертов осуществляется в два этапа: на первом этапе проверяется согласованность между собой частных мнений экспертов по дисперсионному коэффициенту конкордации (множественный коэффициент конкордации) Кендалла ( $W(H)$ ) [80], на втором – проверка согласованности обобщённых мнений группы экспертов.

Значения дисперсионного коэффициента конкордации лежат в диапазоне  $0 \leq W(H) \leq 1$ : при  $W(H)=0$  частные мнения экспертов полностью рассогласованы, при  $W(H)=1$  достигнута полная согласованность частных мнений экспертов.

Множественный коэффициент конкордации Кендалла интерпретируется как степень соответствия результатов оценивания их максимально согласованному варианту оценки и определяется как отношение фактической несмещенной дисперсии ( $D$ ) случайной величины (присвоенных элементам рангов) к теоретически максимально возможной дисперсии ( $D_{\max}$ ) на заданном множестве

$$W(H) = \frac{D}{D_{\max}}. \quad (45)$$

Дисперсия ( $D$ ) случайной величины – это мера разброса данной случайной величины, то есть её отклонения от математического ожидания (среднего значения случайной величины).

Для расчёта коэффициента конкордации Кендалла предварительно осуществляется ранжирование полученных значений нормализованного собственного вектора (вектора приоритетов), которое состоит в расстановке элементов (значений нормализованного собственного вектора) в порядке их предпочтения по важности (весомости). Место, занятое при такой расстановке, называется рангом. Чем выше ранг, тем важнее элемент.

Оценка согласованности частных мнений экспертов выполняется в следующей последовательности.

1 Ранжирование значений весовых коэффициентов каждой группы сравниваемых элементов ИС

1.1 Устанавливается соответствие между нормализованными главными собственными векторами и частными значениями весовых коэффициентов каждой группы сравниваемых элементов ИС

$$w_i \rightarrow k_{hi}, h = \overline{1, H}, i = \overline{1, I}, \quad (46)$$

где  $h$  – номер эксперта;

$H$  – количество экспертов.

При ранжировании необходимо учитывать, что один эксперт не может присвоить двум весовым коэффициентам одинаковый ранг

$$z_{hi} \in \{ \overline{1, I} \}, h = \overline{1, H}, i = \overline{1, I}, z_{hi} \neq z_{hk} \text{ для } i \neq k. \quad (47)$$

1.2 Выбирается ряд весовых коэффициентов  $\{k_{li}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$  первого ( $h=1$ ) эксперта.

1.3 Устанавливаются равными нулю исходное запомненное значение ранга  $z_h^3$  и множество рангов значений коэффициентов  $Z$

$$z_h^3 = 0, \quad (48)$$

$$Z = \{z_{hi}\} = \{0\}, i = \overline{1, I}. \quad (49)$$

1.4 Среди ранжируемых значений весовых коэффициентов осуществляется поиск минимального из них и присвоение ему значения ранга, равного запомненному значению, увеличенному на единицу (тем самым проранжированный весовой коэффициент исключается из числа ранжируемых)

$$z_{hi} = z_h^3 + 1 : k_{hi} = \min\{k_{hi}\}, i = \overline{1, I} : z_{hi} = 0. \quad (50)$$

1.5 Запоминается значение ранга проранжированного весового коэффициента, в множество проранжированных коэффициентов добавляется проранжированный весовой коэффициент

$$z_h^3 = z_{hi}, \quad (51)$$

$$Z := Z \cup z_{hi}. \quad (52)$$

1.6 Проверяется условие, все ли коэффициенты данного эксперта проранжированы

$$z_{hi} = 0?, \quad i = \overline{1, I}. \quad (53)$$

Если условие (53) выполняется – переход к п.1.7, иначе – к п.1.4.

1.7 Проверяется условие, проранжированы ли данные всех экспертов

$$h = H? \quad (54)$$

Если условие (54) выполняется – переход к п.1.8, иначе выбираются весовые коэффициенты  $k_{hi}$ , ( $i = \overline{1, I}$ ) следующего эксперта ( $h := h+1$ ) и переход к п.1.3.

1.8 Конец алгоритма ранжирования. В результате ранжирования получается множество рангов весовых коэффициентов, расположенных в порядке возрастания их значений, которые для удобства заносят в таблицу (рисунок 8)

$$Z = \{z_{hi}\}, \quad h = \overline{1, H}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (55)$$

Номер эксперта, ранги	Номер весового коэффициента					
	1	2	...	$i$	...	$I$
1	$z_{11}$	$z_{12}$	...	$z_{1i}$	...	$z_{1I}$
2	$z_{21}$	$z_{22}$	...	$z_{2i}$	...	$z_{2I}$
...	...	...	...	...	...	...
$h$	$z_{h1}$	$z_{h2}$	...	$z_{hi}$	...	$z_{hI}$
...	...	...	...	...	...	...
$H$	$z_{H1}$	$z_{H2}$	...	$z_{Hi}$	...	$z_{HI}$
$z_i$	$z_1$	$z_2$	...	$z_i$	...	$z_I$
$z_{i,cp}$	$z_{1,cp}$	$z_{2,cp}$	...	$z_{i,cp}$	...	$z_{I,cp}$

Рисунок 8 – Результаты ранжирования и расчёта рангов весовых коэффициентов

2 Вычисление дисперсионного коэффициента конкордации Кендалла и его оценка

2.1 Вычисление суммарных значений рангов каждого весового коэффициента

$$z_i = \sum_{h=1}^H z_{hi}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (56)$$

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_I\}, \quad (57)$$

где  $Z$  – множество сумм рангов весовых коэффициентов по всем экспертам.

Результаты расчёта  $z_i$  заносятся в таблицу (рисунок 8).

2.2 Вычисление значения среднего арифметического рангов  $\bar{z}$ :

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^I z_i}{I} = \frac{H(I+1)}{2}. \quad (58)$$

2.3 Вычисление дисперсионного коэффициента конкордации Кендалла  $W(H)$  [80]

$$W(H) = \frac{D}{D_{\max}} = \frac{12}{H^2(I^3 - I)} \sum_{i=1}^I (z_i - \bar{z})^2, \quad (59)$$

где  $D$  – дисперсия случайной величины (рангов);

$D_{\max}$  – теоретически максимально возможная дисперсия случайной величины на заданном множестве.

2.4 Проверка условия

$$W(H) \geq W_{\text{тр}} ? \quad (60)$$

где  $W_{\text{тр}}$  – требуемое значение доверительной вероятности результатов экспертной оценки. Принимается  $W_{\text{тр}} = 0,9$ , при котором согласованность мнений экспертов считается высокой [80].

Если условие (60) не выполняется, то осуществляется переход к оценке качества экспертов на основе ранжирования результатов экспертных оценок (п.3.2.4), если условие выполняется (частные мнения экспертов согласованы), то переход к оценке согласованности обобщённых мнений группы экспертов.

Оценка согласованности обобщённых мнений группы экспертов проводится аналогично оценке согласованности суждений каждого эксперта на основе значения отношения согласованности обобщённой матрицы сравнений. Если условие  $OC \leq 0,1$  выполняется для всех обобщённых матриц сравнений, то формируется итоговый состав экспертной группы

$$H = \{h^*\}, h^* = \overline{1, H^n}, \quad (61)$$

где  $H^n$  – итоговое количество экспертов.

Для дальнейших расчётов приоритетов используются данные сформированной экспертной группы.

Если условие  $OC \leq 0,1$  не выполняется, то осуществляется ранжирование результатов экспертных оценок (п.3.2.4) для оценки качества экспертов.

### 3.2.4 Ранжирование результатов экспертных оценок

Ранжирование результатов экспертных оценок осуществляется для определения экспертов, подлежащих исключению из состава экспертной группы. Процедура исключения основана на оценке близости мнения эксперта к среднему мнению группы [81]. Кандидат с наибольшим расхождением «отбраковывается». Ниже представлена методика расчётной оценки качества экспертов.

3.2.4.1 По частным матрицам сравнений вычисляется главный собственный вектор, значения которого представляют собой частные значения весовых коэффициентов элементов иерархической структуры в составе рассматриваемой группы элементов.

3.2.4.2 Полученные частные значения весовых коэффициентов ранжируются. Ранжирование заключается в расстановке значений весовых коэффициентов в порядке их предпочтения по важности (весомости). Место, занятое при такой расстановке, называется рангом, чем выше ранг, тем важнее элемент иерархической структуры. Значения рангов частных значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры  $z_{hi}$  ( $i = 1, \dots, N, h = 1, \dots, H, N$  – количество сравниваемых элементов,  $H$  – количество экспертов) заносятся в таблицу 7.

3.2.4.3 Для каждого элемента ИС вычисляются суммарные значения рангов  $z_i$  и заносятся в таблицу 7.

3.2.4.4 Рассчитываем средние значения ранга каждого весового коэффициента  $z_{i.cр}$ .

Таблица 7 – Результаты ранжирования и расчёта рангов весовых коэффициентов

Номер эксперта ( $h$ ), ранги	Номер ( $i$ ) весового коэффициента					
	1	2	...	$i$	...	$N$
1	$z_{1,1}$	$z_{1,2}$	...	$z_{1,i}$	...	$z_{1,N}$
2	$z_{2,1}$	$z_{2,2}$	...	$z_{2,i}$	...	$z_{2,N}$
...	...	...	...	...	...	...
$h$	$z_{h,1}$	$z_{h,2}$	...	$z_{h,i}$	...	$z_{h,N}$
...	...	...	...	...	...	...
$H$	$z_{H,1}$	$z_{H,2}$	...	$z_{H,i}$	...	$z_{H,N}$
$z_i$	$z_1$	$z_2$	...	$z_i$	...	$z_N$
$z_{i,cp.}$	$z_{1,cp}$	$z_{2,cp}$	...	$z_{i,cp}$	...	$z_{N,cp}$

$$z_{i,cp} = \frac{z_i}{H}. \quad (62)$$

Результаты заносим в таблицу 7.

3.2.4.5 Рассчитываем значения элементов матрицы-строки отклонений мнения каждого эксперта от среднего мнения группы относительно значимости каждого весового коэффициента

$$\Delta z_{hi} = |z_{hi} - z_{i,cp}|, \quad i = \overline{1, N}, \quad (63)$$

$$\Delta Z_h = |\Delta z_{h1}, \Delta z_{h2}, \dots, \Delta z_{hi}, \dots, \Delta z_{hN}|. \quad (64)$$

3.2.4.6 Формируем матрицы отклонений  $\Delta Z$  мнений всех экспертов ( $h = \overline{1, H}$ ) от средних мнений (по каждому весовому коэффициенту)

$$\Delta Z = \begin{pmatrix} \Delta z_{1,1} & \dots & \Delta z_{1,i} & \dots & \Delta z_{1,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta z_{h,1} & \dots & \Delta z_{h,i} & \dots & \Delta z_{h,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta z_{H,1} & \dots & \Delta z_{H,i} & \dots & \Delta z_{H,N} \end{pmatrix}. \quad (65)$$

3.2.4.7 Рассчитываем суммы отклонений мнений каждого эксперта от среднего мнения группы по всем весовым коэффициентам

$$\Delta k_h = \sum_{i=1}^N \Delta z_{hi}, \quad h = \overline{1, H}. \quad (66)$$

3.2.4.8 Рассчитываем суммы отклонений мнений всех экспертов по всем весовым коэффициентам

$$\Delta k = \sum_{h=1}^H \Delta k_h. \quad (67)$$

3.2.4.9 Рассчитываем средние отклонения мнений экспертов по всем весовым коэффициентам от суммы отклонений мнений всех экспертов

$$\overline{\Delta k_h} = |\Delta k_h - \Delta k|, \quad h = \overline{1, H}, \quad (68)$$

$$\overline{\Delta K} = |\overline{\Delta k_1}, \overline{\Delta k_2}, \dots, \overline{\Delta k_h}, \dots, \overline{\Delta k_H}|. \quad (69)$$

3.2.4.10 Ранжируем отклонения  $\overline{\Delta k_h}$  ( $h = \overline{1, H}$ ) и располагают ранги отклонений в порядке возрастания в виде кортежа

$$\overline{\Delta K^*} = |\overline{\Delta k_1^*}, \overline{\Delta k_2^*}, \dots, \overline{\Delta k_h^*}, \dots, \overline{\Delta k_H^*}|. \quad (70)$$

Получаем перечень новых номеров экспертов:  $1^*, 2^*, \dots, H^*$ .

3.2.4.11 Эксперт, ранг отклонения которого имеет наибольшее значение, корректирует свои оценки и осуществляется переход к ранжированию скорректированных весовых коэффициентов сравниваемых элементов данного эксперта.

3.2.4.12 Эксперт, ранг отклонения которого имеет наибольшее значение и для которого не достигнута требуемая согласованность, исключается из состава группы [82, 83]:

$$h = \{1^*, 2^*, \dots, H^* - 1\}. \quad (71)$$

3.2.4.13 Проверяем условие достаточности количества экспертов в группе (не менее семи [23]). В случае достаточности количества экспертов в группе осуществляется переход к оценке согласованности мнений нового состава экспертной группы (п.3.2.3), в противном случае состав экспертной группы увеличивается, «новые» эксперты формируют матрицы отношений (п.3.2.1), на их основе матрицы сравнений (п.3.2.2), осуществляется оценка согласованности их суждений (п.3.2.2.3) и мнений экспертной группы (п.3.2.3). Процедуру повторяют до получения требуемой согласованности мнений экспертной группы, включающей не менее семи специалистов.

### 3.2.5 Оценка согласованности иерархии

В методе анализа иерархии оценка согласованности иерархии осуществляется по значению отношения реального индекса согласованности иерархии к случайному индексу согласованности иерархии относительно

рассматриваемого элемента иерархической структуры. Расчёт заключается в том, что индекс согласованности, полученный из матрицы парных сравнений, умножается на приоритет элемента ИС, относительно которого проведено сравнение, и к этому числу добавляются аналогичные результаты для всей иерархии. К полученному значению добавляется значение индекса согласованности относительно рассматриваемого элемента. Затем данная величина сравнивается с соответствующим индексом, который получен как сумма случайно сформированных индексов, взвешенных посредством соответствующих приоритетов. Отношение должно находиться в окрестности 0,10.

Полагая, что ранее рассчитаны необходимые значения приоритетов и индексов согласованности матриц сравнений, оценка согласованности иерархии относительно одного элемента выполняется в следующей последовательности:

- выбираем элемент  $a_r$  иерархической структуры уровня  $r$ , относительно которого осуществляется оценка согласованности иерархии;
- выбираем вектор-строку приоритетов  $\Pi_r$  элементов уровня  $r$  по отношению к выбранному элементу  $a_r$ ;
- выбираем индекс согласованности  $ИС_r$  матрицы сравнений уровня  $r$ ;
- выбираем вектор-столбец индексов согласованности  $[ИС_{r+1}]$  матриц сравнений уровня  $r+1$ ;
- вычисляем реальный индекс согласованности иерархии РИСИ относительно элемента  $a_r$

$$\text{РИСИ} = ИС_r + (\Pi_r) [ИС_{r+1}] \quad (72)$$

- вычисляем случайный индекс согласованности иерархии СИСИ относительно элемента  $a_r$

$$\text{СИСИ} = \text{СИС}_r + (\Pi_r) [\text{СИС}_{r+1}], \quad (73)$$

где  $\text{СИС}_r$  – случайный индекс согласованности уровня  $r$ ;

$[\text{СИС}_{r+1}]$  – вектор-столбец случайных индексов согласованности уровня  $r+1$ .

Значения случайных индексов согласованности выбираем из таблицы б в зависимости от размерности матриц сравнений;

– вычисляем отношение согласованности иерархии ОСИ относительно элемента  $a_r$

$$\text{ОСИ} = \text{РИСИ} / \text{СИСИ} \quad (74)$$

– проверяем условие  $\text{ОСИ} \leq 0,1$ . Если условие удовлетворяется, то считается, что иерархия согласована, иначе – переходим к поиску экспертов, мнения которых в наибольшей степени расходятся со средним мнением группы (п.3.2.4), для обеспечения требуемой согласованности;

– проверка согласованности осуществляется относительно элементов  $a_r$ , расположенных на уровнях иерархической структуры  $r = 1, \dots, N_{\max} - 2$ , где  $N_{\max}$  – номер максимального уровня иерархической структуры.

### 3.2.6 Расчёт значений приоритетов элементов иерархической структуры.

Формирование исходных матриц уровневых связей иерархической структуры

Приоритетами элементов иерархической структуры являются нормализованные собственные вектора обобщённых матриц сравнений. Для обеспечения возможности использования матричных вычислений при расчёте значений приоритетов запросов составляются исходные матрицы уровневых связей  $K^r$  иерархической структуры. Эти матрицы имеют размерность  $P \times Q$ , где  $P$  – количество элементов данного уровня,  $Q$  – количество элементов вышерасположенного уровня. Элементами  $k_{p,q}^r$  данных матриц являются значения  $k$  приоритетов элементов обобщённых матриц сравнений, привязанные к номеру уровня  $r$  иерархической структуры, на котором расположен элемент, к его порядковому номеру  $p$  на данном уровне ИС, и номеру элемента  $q$  вышерасположенного уровня иерархической структуры, с которым связан данный элемент. Индексы значений приоритетов определяют их положение в матрицах уровневых связей ИС, отражающих взаимосвязи элементов двух рядом расположенных уровней ИС и используемых для расчётов значений приоритетов запросов. Поэтому значения приоритетов элементов обобщённых матриц сравнений индексируются в соответствии с их расположением в иерархической

структуре. Матрицы уровневых связей составляются для всех пар взаимосвязанных уровней.

С учётом изложенного расчёт приоритетов элементов иерархической структуры производится в следующей последовательности.

3.2.6.1 Для полученных обобщённых матриц сравнений  $A^{r,g}$  вычисляем главные собственные вектора, которые нормализуем и получаем значения приоритетов элементов иерархической структуры в рамках  $g$ -ой группы

$$W^{r,g} = \{ w_i^{r,g} \}, i = \overline{1, N}, \quad (75)$$

где  $w_i^{r,g}$  – значение приоритета  $i$ -го элемента  $g$ -ой группы  $r$ -го уровня.

3.2.6.2 В соответствии с нумерацией элементов ИС и их связей, представленных в формальной модели иерархической структуры исходных данных (п.2.4), осуществляем индексацию значений приоритетов элементов иерархической структуры путём присвоения порядковых номеров  $p$  элементов на данном уровне  $r$  и номеров  $q$  элементов вышерасположенного уровня  $r-1$ , с которыми связаны элементы данного уровня. Данную индексацию осуществляем на основании соответствий множества групповых номеров вершин  $I^{r,g}$  множеству их порядковых номеров  $P^r$  на уровне  $r$  (12) и множества групповых связей  $SV^g$  множеству межуровневых связей  $SV^u$  иерархической структуры (16)

$$w_i^{r,g} \rightarrow w_{p,q}^r, p: I^{r,g} \rightarrow P^r, q: SV^g \rightarrow SV^u, r = \overline{1, R_{\max}}, \quad (76)$$

где  $p$  – порядковый номер элемента на уровне  $r$ ,  $p = \overline{1, P_{\max}^r}$ ;

$P_{\max}^r$  – количество элементов на уровне  $r$ ;

$q$  – порядковый номер на уровне  $r-1$  элемента, связанного с элементом  $p$  на уровне  $r$ ,  $q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}$ ;

$Q_{\max}^{r-1}$  – количество элементов на уровне  $r-1$ .

3.2.6.3 Формируем исходные матрицы уровневых связей  $K^r$  приоритетов элементов иерархической структуры для всех уровней, кроме верхнего

$$K^r = \begin{pmatrix} k_{11}^r & \dots & k_{1q}^r & \dots & k_{1Q}^r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{p1}^r & \dots & k_{pq}^r & \dots & k_{pQ}^r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{P1}^r & \dots & k_{Pq}^r & \dots & k_{PQ}^r \end{pmatrix}, \quad (77)$$

где  $k_{p,q}^r$  – значение приоритета элемента номер  $p$  уровня  $r$ , связанного с элементом  $q$  уровня  $r-1$ , определяемый по формуле

$$k_{p,q}^r = \begin{cases} w_{p,q}^r, & \text{если } w_{p,q}^r \neq 0; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (78)$$

### 3.3 Модель расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами

Основной задачей в иерархии является оценка элементов высших уровней исходя из взаимодействия элементов низших уровней иерархии. В математической теории анализа иерархий разработан метод оценки воздействия элементов верхнего уровня на элементы соседнего нижнего уровня посредством взвешивания элементов нижнего уровня по отношению к элементам верхнего уровня. Это взвешивание распространяется вверх по иерархии.

Содержание каждого сеанса связи с космическим аппаратом определяется составом операций, которые необходимо провести с космическим аппаратом и которые указаны в запросе на проведение сеанса связи с КА. Приоритет запроса на проведение сеанса связи с КА представляет собой сумму взвешенных приоритетов операций, соответствующих элементам нижнего уровня иерархической структуры, присущих данному запросу. Взвешенность определяется условиями выполнения каждой операции, представляемыми элементами вышерасположенных уровней иерархической структуры, связанными с данной операцией. Данные условия определяются значениями приоритетов этих элементов. Поэтому итоговое значение приоритета операции определяется как произведение приоритета операции на приоритеты связанных с ней элементов вышерасположенных уровней иерархической структуры. Сумма итоговых значений приоритетов операций представляет приоритет запроса, для которого присущи данные операции. Математически это осуществляется путём

перемножения рабочих (актуальных для данного момента) матриц уровневых связей элементов иерархической структуры, начиная с нижнего уровня, и суммирования полученных итоговых значений приоритетов операций.

Для конкретных спорных ситуаций характерны некоторые подмножества факторов (элементов ИС), присущих соответствующим запросам. Данные подмножества факторов будем называть активными на данный момент, поскольку для расчёта значений приоритетов  $pr_c$  запросов в данной ситуации используются именно эти подмножества. Следует учитывать, что для формально одинаковых запросов на проведение сеансов связи с КА составы учитываемых факторов для расчёта значений приоритетов в разные времена могут отличаться условиями выполнения операций, например, этап эксплуатации КА, срок эксплуатации НСВ, время наработки на отказ, и т.д., поэтому активизация элементов ИС происходит непосредственно перед расчётом значений приоритетов запросов.

С учётом изложенного расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА осуществляется в следующей последовательности.

3.3.1 Для рассматриваемых запросов на проведение сеансов связи определяем множества  $\mathcal{E}^a$  активных элементов иерархической структуры и значений их весовых коэффициентов  $K^{r,a}$ :

$$\mathcal{E}_{p,q}^{r,a} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент номер } p \text{ уровня } r, \\ & \text{связанный с элементом номер } q \text{ уровня } r-1, \\ & \text{активен для данного сеанса связи,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (79)$$

$$\mathcal{E}^a = \{ \mathcal{E}_{p,q}^{r,a} \}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = \overline{1, P_{\max}^r}, q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}, \quad (80)$$

$$k_{p,q}^{r,a} = k_{p,q}^r, p, q: \mathcal{E}_{p,q}^r \in \mathcal{E}^a, \quad (81)$$

$$K^{r,a} = \{ k_{p,q}^{r,a} \}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = \overline{1, P_{\max}^r}, q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}. \quad (82)$$

3.3.2 Формируем рабочие матрицы уровневых связей иерархической структуры  $K^{r,раб}$  путём обнуления значений приоритетов  $k_{p,q}^r$  элементов исходных матриц уровневых связей иерархической структуры, которые для данного сеанса связи неактивны

$$K^{r,раб} = \{ k_{p,q}^{r,раб} \}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = \overline{1, P_{\max}^r}, q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}, \quad (83)$$

$$k_{p,q}^{r,\text{раб.}} = \begin{cases} k_{p,q}^{r,a}, & \text{если } \mathcal{E}_{p,q}^r \in \mathcal{E}^a; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (84)$$

3.3.3 Рассчитываем значение  $pr_c$  приоритета  $c$ -го запроса на проведение сеанса связи с КА. Значение  $pr_c$  представляет собой сумму взвешенных значений приоритетов рабочих элементов нижнего уровня через значения приоритетов рабочих элементов вышерасположенных уровней ИС. Данное взвешивание выполняется путём последовательного перемножения матриц значений приоритетов рабочих элементов ИС, начиная с нижнего (максимального) номера уровня. Поскольку на первом (верхнем) уровне иерархической структуры находится только один элемент, матрица отношений его элементов (самых к себе) имеет единичные значения. Для соблюдения правил перемножения эта матрица представляет собой единичный вектор-строку  $|e|$  размерности, равной количеству базовых элементов иерархической структуры, расположенных на нижнем уровне ИС.

С учётом изложенного значение приоритета запроса номер  $c$  рассчитывается по формуле

$$pr_c = e * \left( \prod_{r=R_{\max}}^2 K^{r,\text{раб.}} \right), \quad (85)$$

где  $e$  – единичный вектор-строка;

$\Pi$  – знак перемножения матриц.

### 3.4 Алгоритм эквивалентного преобразования иерархической структуры при объединении её элементов в группы

В процессе формирования иерархической структуры исходных данных, используемых для назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА (п.2.3), при объединении элементов какого-либо уровня ИС в группы не более семи элементов образуются дополнительные уровни ИС из-за образования групповых элементов и смещения вниз элементов, объединённых в группы, что приводит к нарушению структуры исходной ИС и, как следствие, принципов формирования ИС, заключающихся в необходимости расположения на каждом уровне ИС однотипных элементов и наличия непосредственных связей между

элементами двух рядом расположенных уровней ИС. Эти нарушения приводят к следующим последствиям:

- появляются связи между элементами через уровни ИС, которые невозможно отразить в матрицах уровневых связей, предполагающих связи между элементами только рядом расположенных уровней;

- при объединении в группы базовых элементов они могут располагаться на разных уровнях ИС, что не позволяет сформировать матрицы уровневых связей, пригодные для расчётов приоритетов запросов по формуле (85) из-за отсутствия их связей с элементами нижерасположенного уровня.

Матрицы уровневых связей  $K^r$  и  $K^{r-1}$  отражают непосредственную связь между элементами двух рядом расположенных уровней с номерами  $r$  и  $r-1$ .

Указанные последствия приводят к тому, что нарушается условие согласованности размерностей перемножаемых матриц (86), согласно которому количество столбцов ( $b$ ) матрицы  $K^r$  должно быть равно количеству строк матрицы  $K^{r-1}$

$$K^r[a \times b] \times K^{r-1}[b \times c] = K[a \times c]. \quad (86)$$

Таким образом, в результате объединения элементов ИС в группы расчёт значений приоритетов по формуле (85) становится невозможным.

Для разрешения данного вопроса разработан алгоритм эквивалентного преобразования иерархической структуры при объединении элементов ИС в группы путём введения дополнительных «фиктивных» элементов (ФЭ):

- а) каждый БЭ, расположенный выше нижнего уровня иерархической структуры, переместить со своими коэффициентами на уровень ниже, чем однотипные элементы вышерасположенного уровня иерархической структуры;

- б) от перемещённых базовых элементов по каждой связи вверх по иерархической структуре на каждом вышерасположенном уровне, где отсутствуют непосредственные связи БЭ с элементами этого уровня, добавить «фиктивные» элементы таким образом, чтобы исходные связи БЭ с вышерасположенными элементами сохранились;

в) для каждого БЭ, расположенного выше самого нижнего уровня, добавить на каждый нижерасположенный уровень по нижний уровень включительно по одному «фиктивному» элементу для каждого БЭ с соответствующей связью;

г) для остальных (небазовых) элементов, имеющих связи вверх через уровень и более добавить фиктивные элементы на каждый уровень, обеспечивая непосредственную связь между элементами уровней и сохранение ранее имевшихся связей между элементами;

д) для фиктивных элементов присвоить значения весовых коэффициентов, равные единице;

е) переиндексировать весовые коэффициенты элементов ИС в соответствии с их новым расположением по уровням.

Приведенный алгоритм обеспечивает введение минимального количества «фиктивных» элементов за счёт минимизации количества вводимых межуровневых связей, что упрощает процесс формирования матриц уровневых связей, используемых для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА.

### **3.5 Выводы по третьей главе**

1. Определены перечень и содержание этапов подготовки данных для определения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами.

2. Разработаны формальные модели оценки согласованности исходных данных (суждений каждого эксперта, мнений группы экспертов и иерархии иерархической структуры) и оценки качества экспертов, позволяющие разработать программные средства для оценки согласованности принимаемых решений и формирования экспертной группы.

3. Разработаны формальные модели подготовки исходных данных и расчёта значений приоритетов запросов, позволяющие разработать программные средства для расчёта приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА. Численные значения приоритетов запросов позволят не

только выбирать для первоочередной реализации наиболее важные из них, но и определять степень превосходства одних запросов над другими. Автоматизация этапов назначения приоритетов позволит повысить как оперативность принятия решений о порядке задействования наземных средств, так и обоснованность решений за счёт использования согласованных экспертных данных и численных значений приоритетов, снижающих степень субъективизма принимаемых решений.

4. Существенным преимуществом предложенной методики назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА является возможность заблаговременного (до возникновения спорных ситуаций) выполнить наиболее трудоёмкую и ответственную работу по формированию экспертной группы и подготовке согласованных данных для расчёта значений приоритетов запросов, что позволит повысить качество подготовленных данных, значительно снизить трудозатраты и время на разрешение спорных ситуаций и на принятие решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с КА.

5. Показана невозможность расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА с использованием теории матриц при объединении элементов иерархической структуры в группы. Разработан алгоритм эквивалентного преобразования иерархической структуры при объединении её элементов в группы, позволяющий сформировать матрицы уровневых связей для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА за счёт введения минимального количества дополнительных «фиктивных» элементов.

## Глава 4. Порядок задействования наземных средств взаимодействия

### 4.1 Общие положения

После определения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА необходимо определить порядок задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами на основе приоритетов запросов. Данный вопрос решается в процессе планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА.

При определении порядка задействования наземных средств взаимодействия на планируемом (суточном) интервале времени возможны 2 варианта:

1) ситуация разрешается при условии достаточности ресурсов времени используемых средств для реализации запросов с использованием данного или других средств взаимодействия с КА путём изменения времени и/или средства реализации запросов

$$\sum_{i^B=1}^{I^B} \Delta t_{i^B}^k \geq \sum_{i^M=1}^{I^M} \Delta t_{i^M}^k, \Delta t_{i^B}^k, \Delta t_{i^M}^k \in (t_{ЗРВ}^{hi}, t_{ЗРВ}^{ki}), k = \overline{1, K}, \quad (87)$$

где  $i^T, i^B$  – соответственно номера требуемых и возможных реализаций запросов на проведение СС;

$I^T, I^B$  – соответственно требуемое и возможное для реализации количество запросов на проведение СС на планируемом интервале времени;

$k$  – номер средства взаимодействия;

$K$  – количество средств взаимодействия, пригодных для выполнения данного типа запросов;

$\Delta t_{i^B}^k, \Delta t_{i^M}^k$  – соответственно возможный и требуемый временные ресурсы для реализации  $i$ -го запроса на средстве номер  $k$ ;

$\in$  – знак принадлежности;

$:$  – знак «такое, что...»;

$\exists$  – квантор «существует по меньшей мере один элемент...»;

$(t_{ЗРВ}^{hi}, t_{ЗРВ}^{ki})$  – интервал (начало и конец) зоны радиовидимости (ЗРВ) данным средством для реализации  $i$  – го запроса.

При этом предполагается, что существуют способы задействования дополнительных ресурсов НСВ при их наличии.

2) в противном случае спорная ситуация не разрешается

$$\sum_{i^B=1}^{I^B} \Delta t_{i^B}^k < \sum_{i^m=1}^{I^m} \Delta t_{i^m}^k, \Delta t_{i^B}^k, \Delta t_{i^m}^k \in (t_{ЗРВ}^{Hi}, t_{ЗРВ}^{Ki}), k = \overline{1, K}, \quad (88)$$

и часть запросов необходимо перенести для реализации на следующие планируемые сутки.

Разрешение спорных ситуаций осуществляется путём реализации в первую очередь наиболее важных запросов на проведение сеансов связи с КА.

Необходимость определения порядка задействования наземных средств взаимодействия возникает при первом выявлении запросов, создающих спорную ситуацию. Такие запросы назовём исходными нераспределёнными запросами (ИНЗ). При распределении этих запросов запрос с наивысшим приоритетом остаётся для реализации на средстве и во времена, указанные для данного запроса, который назовём реализуемым исходным нераспределённым запросом (РИНЗ), запрос (запросы) с меньшим приоритетом, который переносится для реализации на другое приемлемое в соответствии с ЗРВ и ТЦУ КА время и/или средство, назовём переносимый исходный нераспределённый запрос (ПИНЗ). Данный запрос после его переноса может создать (породить) новую спорную ситуацию, для которой необходимо определить порядок обслуживания порождённых нераспределённых запросов (ПНЗ). Их распределение по НСВ осуществляется в соответствии с приоритетами в приведенном выше порядке. Запрос с наивысшим приоритетом, который остаётся для реализации на средстве и временном интервале, определённый на момент его распределения, назовём реализуемым порождённым нераспределённым запросом (РПНЗ). Запрос (запросы) с меньшим приоритетом, который переносится для реализации на другое приемлемое в соответствии с ЗРВ и ТЦУ КА время и/или средство, назовём переносимым порождённым нераспределённым запросом (ППНЗ). Переносимые запросы могут создавать новые спорные ситуации, требующие определения порядка их обслуживания. Множество переносимых исходных и

порождённых запросов зависит от количества совпадений средств и ЗРВ, заданных в заявках ЦУП и в порождённых запросах.

Исходной информацией для планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА является:

1. Понятие планирования задействования НСВ с КА при обеспечении управления КА – распределение запросов на проведение сеансов связи с КА по средствам в соответствии с составом наземного комплекса управления (НКУ) космического аппарата, зонами радиовидимости космических аппаратов техническими средствами, технологическими циклами управления КА и приоритетами запросов.

2. Виды планирования – оперативное и текущее. Оперативное планирование задействования средств осуществляется на суточном интервале за 3-е суток до сеанса связи с КА на основании присланных ЦУП КА заявок на задействование средств. Оперативное планирование завершается утверждением Плана задействования средств и выдачей исполнителям руководящих документов для реализации ПЗС. Текущее планирование задействования НСВ осуществляется после завершения оперативного планирования при поступлении дополнительных запросов, обуславливающих необходимость коррекции утверждённого ПЗС.

3. Основная цель планирования задействования НСВ – максимальное удовлетворение потребностей ЦУП КА по управлению КА, указанных в заявках на задействование средств. При возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств целью планирования является определение порядка задействования наземных средств взаимодействия.

4. Приняты следующие понятия и условные обозначения:

– спорная ситуация по задействованию наземных средств взаимодействия с КА (спорная ситуация) – ситуация, обусловленная необходимостью задействования одного и того же средства взаимодействия с КА в одно и то же время для работы с несколькими космическими аппаратами;

– плановые зоны радиовидимости (ПЗРВ) – ЗРВ, указанные в запросах ЦУП КА на проведение сеансов связи с КА;

- свободные зоны радиовидимости (СЗРВ) – ЗРВ, в течение которых возможна реализация нераспределённых (подлежащих распределению) запросов;
- свободные фрагменты зон радиовидимости (СФЗРВ) включают свободные фрагменты ПЗРВ (СФПЗРВ) и свободные фрагменты СЗРВ (СФСЗРВ), в течение которых возможна реализация нераспределённых фрагментов запросов;
- резервы зон радиовидимости (РЗРВ) включают СЗРВ и СФЗРВ;
- понятие запроса на проведение сеанса связи с КА, приведенное выше.

5. Для реализации каждого запроса планируется задействование конкретного средства взаимодействия из состава НКУ КА на время зоны радиовидимости данным средством конкретного КА. Запросы могут быть декомпозированы на части, включающие одну или несколько операций, реализация которых возможна за счёт РЗРВ. Один запрос при реализации может использовать свободные фрагменты нескольких ЗРВ.

6. В процессе планирования задействования средств используются:

- перемещения реализации запросов по времени на данное или на другое средство и декомпозиция запросов для их реализации по частям [7, 19, 24];
- методика назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами [25].

При оперативном планировании в процессе распределения запросов по средствам взаимодействия в порядке поступления от ЦУП КА заявок на задействование средств возможны ситуации, когда в первую очередь будут распределены запросы с более низкими приоритетами, а запросы с более высокими приоритетами, времена и средства реализации которых совпадают с уже распределёнными запросами, останутся нераспределёнными. Для исключения подобных ситуаций реализацию запросов по средствам взаимодействия с КА необходимо осуществлять в соответствии с их приоритетами. Очевидно, что увеличение количества перемещений нераспределённых запросов приведёт к увеличению времени планирования задействования НСВ. Учитывая изложенное, при оперативном планировании распределение всех запросов по средствам взаимодействия необходимо производить не в порядке поступления заявок от

ЦУП КА, а в соответствии с приоритетами запросов и ТЦУ КА, что позволит также упростить процесс обслуживания запросов при оперативном планировании за счёт наличия проранжированных по приоритетам всех запросов, а не только нераспределённых. Реализация в первую очередь запросов с наивысшими приоритетами позволит исключить необходимость поиска нераспределённых запросов и автоматически определить порядок обслуживания всех запросов. Кроме этого, упорядоченное расположение всех запросов в соответствии с их приоритетами позволит упростить обслуживания запросов при текущем планировании, когда вновь появившийся запрос будет обслужен в соответствии с его приоритетом в очереди проранжированных запросов, а расчёт значений приоритетов ранее распределённых запросов не потребуется.

Время на проведение операций текущего планирования относительно оперативного планирования значительно меньше, поскольку данные операции выполняются в режиме реального времени полёта КА и общее время перепланирования по переносу времени реализации запроса, включая коррекцию плана, доведение информации (выписок из ПЗС, распоряжений) до исполнителей и подготовку наземных средств взаимодействия с КА к работе, может быть ограничено временем одного витка КА вокруг Земли, составляющем около 90 минут.

Повышенные требования к оперативности текущего планирования обуславливают необходимость (целесообразность) принятия дополнительных мер:

– отдельные изменения времени проведения некоторых сеансов связи не должны приводить к кардинальному изменению ПЗС, требующему значительных дополнительных затрат времени ЦСАКП, ЦУП КА и командно-измерительных пунктов (КИП) на перепланирование задействования наземных средств взаимодействия и выполнение мероприятий по скорректированному ПЗС. Для этого минимизация возможных изменений ПЗС осуществляется за счёт поиска возможности распределения поступающих запросов по СЗРВ и СФЗРВ с учётом приоритетов запросов и ТЦУ КА, а при отсутствии такой возможности – за счёт

переноса времени реализации нераспределённых запросов с меньшим значением приоритета с использованием ЗРВ, появившихся от предыдущих распределений;

– для предоставления возможности ЦУП КА и КИП подготовиться к реализации изменённого ПЗС коррекция ПЗС должна осуществляться в минимально короткие сроки за счёт автоматизации процесса подготовки скорректированного ПЗС.

На основании изложенного можно выделить следующие варианты обслуживания запросов:

а) при оперативном планировании задействования НСВ с КА:

1) расчёт и ранжирование значений приоритетов всех запросов на проведение СС с КА, распределение запросов по ПЗРВ в порядке их рангов и с учётом ТЦУ;

2) при наличии нераспределённых запросов по выше описанному варианту осуществляется их распределение по СЗРВ и СФЗРВ с учётом приоритетов и ТЦУ.

б) при текущем планировании задействования НСВ с КА:

1) для исключения перераспределения уже распределённых при оперативном планировании запросов осуществляется поиск возможности распределения вновь принятых запросов по ПЗРВ, СЗРВ и СФЗРВ по алгоритму оперативного планирования с учётом приоритетов запросов и требований ТЦУ КА;

2) при наличии нераспределённых по первому варианту запросов осуществляется их распределение с учётом приоритетов нераспределённых запросов и требований ТЦУ КА.

Оставшиеся нераспределённые запросы при оперативном и текущем планировании, имеющие наименьшие приоритеты, переносятся для реализации на следующий период планирования (сутки) с установкой для них признака «перенесенные», используемого при последующем определении значений их приоритетов.

## 4.2 Постановка задачи определения порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами

Задача определения порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами решается как при оперативном, так и при текущем планировании и имеет особое значение при возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств взаимодействия. Формально спорную ситуацию, обусловленную необходимостью задействования одного и того же средства в одно и то же время для проведения сеансов связи с различными КА, можно представить в виде:

$$(t_x^H, t_x^K) \cap (t_y^H, t_y^K) \neq \emptyset, (t_x^H, t_x^K) \wedge (t_y^H, t_y^K) \in (t_{ЗРВ}^H, t_{ЗРВ}^K), \quad (89)$$

где  $(t_x^H, t_x^K), (t_y^H, t_y^K)$  – интервалы (начало, конец) сеансов связи с КА<sub>x</sub> и КА<sub>y</sub>, находящимися в ЗРВ данного средства;

$\cap$  – знак пересечения (множеств, интервалов);

$\emptyset$  – пустое множество;

$\wedge$  – знак логического «И»;

$\in$  – знак принадлежности;

$(t_{ЗРВ}^H, t_{ЗРВ}^K)$  – интервал зоны радиовидимости данным средством.

Временные интервалы зон радиовидимости космических аппаратов средствами взаимодействия вычисляются по баллистическим данным полёта КА и координатам НСВ.

С учётом изложенного постановка задачи определения порядка обслуживания запросов на проведение сеансов связи с КА формулируется следующим образом.

Заданы:

а) исходные данные:

1) множество КА космических аппаратов орбитальной группировки, находящихся на управлении ЦУП

$$КА = \{ka_a\}, a = \overline{1, A}, \quad (90)$$

где  $ka_a$  – космический аппарат с порядковым номером  $a$ ;

$A$  – количество космических аппаратов;

2) множество  $S$  наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами

$$S = \{s_u\}, u = \overline{1, U}, \quad (91)$$

где  $s_u$  – наземное средство взаимодействия с порядковым номером  $u$ ;

$U$  – количество наземных средств взаимодействия;

3) множество  $Z$  запросов на проведение сеансов связи с КА

$$Z = \{z_{c,a}\}, c = \overline{1, C_a}, a = \overline{1, A}, \quad (92)$$

где  $z_{c,a}$  – запрос номер  $c$  на проведение сеанса связи с КА номер  $a$ ;

$C_a$  – количество запросов на проведение сеансов связи с КА номер  $a$ ;

4) интервал  $\Delta t_{c,a}$  времени выполнения запроса номер  $c$  на проведение сеанса связи с КА номер  $a$

$$\Delta t_{c,a} = (t_{c,a}^h, t_{c,a}^k), c = \overline{1, C_a}, a = \overline{1, A}, \quad (93)$$

где  $t_{c,a}^h, t_{c,a}^k$  – соответственно начало и конец выполнения запроса номер  $c$  на проведение сеанса связи с КА номер  $a$ ;

5) множество  $O$  операций (команд), содержащихся в запросе номер  $c$  на проведение сеанса связи:

$$O_c = \{o_{k,c}\}, k = \overline{1, K_c}, c = \overline{1, C_a}, O \in F, \quad (94)$$

где  $o_{k,c}$  – операция номер  $k$  в запросе номер  $c$ ;

$K_c$  – количество операций в запросе номер  $c$ ;

$F$  – множество всевозможных операций;

6) длительность  $t_{k,a,u}$  выполнения операции номер  $k$  на космическом аппарате номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ ;

7) множество  $SO$  взаимосвязей операций

$$SO = \{so_{k1,k2}\}, k1, k2 = \overline{1, K}, \quad (95)$$

где  $so_{k1,k2}$  – признак взаимосвязи выполнения операций с номерами  $k1, k2$  (в соответствии с ТЦУ КА), значение которого определяется условием

$$so_{k1,k2} = \begin{cases} 1, & \text{если операция номер } k1 \text{ связана с операцией номер } k2; \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (96)$$

8) множество  $ZRV$  зон радиовидимости космических аппаратов наземными средствами взаимодействия на планируемом интервале времени

$$ZRV = \{zrv_{z,u,a}\}, z = \overline{1, Z_{u,a}}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (97)$$

где  $zrv_{z,u,a}$  – зона радиовидимости номер  $z$  средством взаимодействия номер  $u$  космического аппарата номер  $a$  на планируемом интервале времени;

$Z_{u,a}$  – количество зон радиовидимости средством номер  $u$  космического аппарата номер  $a$  на планируемом интервале времени. Каждая ЗРВ представляет собой интервал времени

$$\Delta t_{z,u,a} = (t_{z,u,a}^H, t_{z,u,a}^K), z = \overline{1, Z_{u,a}}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (98)$$

где  $\Delta t_{z,u,a}$  – интервал зоны радиовидимости номер  $z$  средством номер  $u$  космического аппарата номер  $a$ ;

$t_{z,u,a}^H, t_{z,u,a}^K$  – соответственно начало и конец зоны радиовидимости номер  $z$  средством номер  $u$  космического аппарата номер  $a$ ;

б) ограничения:

$$G_1 = \{E \geq 7, oc_{e,m} \leq 0,1\}, \quad (99)$$

$$G_2 = \{(T_{оп} \leq T_{доп1}, T_{тп} \leq T_{доп2}, \Delta t_{c,a} \in \Delta t_{z,u,a}\}, \quad (100)$$

где  $E$  – количество экспертов в группе, определяющее доверительную вероятность результатов экспертных оценок;

$oc_{e,m}$  – отношение согласованности, определяющее согласованность суждений каждого эксперта, рассчитанное для матрицы сравнений номер  $m$ , составленной по данным эксперта номер  $e$ ,  $m = \overline{1, M}$ , и согласованность мнений группы экспертов;

$M$  – количество матриц сравнений;

$T_{оп}$  – время оперативного планирования (подготовки проекта ПЗС);

$T_{тп}$  – время текущего планирования (коррекции ПЗС);

$T_{доп1}$  – допустимое время обслуживания запросов при оперативном планировании;

$T_{доп2}$  – допустимое время обслуживания запросов при текущем планировании;

$\Delta t_{c,a}$  – интервал времени выполнения запроса номер  $c$  при работе с космическим аппаратом номер  $a$ .

Цель: определить порядок задействования наземных средств взаимодействия с КА, соответствующий порядку (кортежу) реализации запросов на проведение сеансов связи с КА:

$$Z^k = |\{z_{c,a}^k\}|, c = \overline{1, C^k}, a = \overline{1, A^k}, \quad (101)$$

где  $Z^k$  – кортеж запросов на проведение сеансов связи с КА (ПЗС);

$z_{c,a}^k$  – запрос номер  $c$  для работы с КА номер  $a$ ;

$C^k$  – количество запросов;

$A^k$  – количество космических аппаратов, по работе с которыми необходимо определить порядок обслуживания запросов.

Задействование наземных средств взаимодействия осуществляется в порядке, указанном в Плате задействования средств, в каждой строке которого содержится номер наземного средства, задействуемого для реализации соответствующего запроса, и время задействования средства (реализации запроса).

### **4.3 Алгоритм планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами**

Алгоритм планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами, включая разрешение спорных ситуаций, разработан на основе приведенных положений, постановки задачи и с учётом требований соответствующих нормативных документов ([84 – 86] и др.).

Алгоритм предназначен для подготовки основного документа по планированию задействования наземных средств взаимодействия (ПЗС) при обеспечении управления космическими аппаратами. Реализация алгоритма предполагает доработку программного комплекса оперативного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и

измерений [27] в части определения порядка задействование наземных средств взаимодействия с КА в соответствии с приоритетами запросов.

В процессе реализации алгоритм должен взаимодействовать с программой хранения нормативно-справочной информации, входящей в состав программного комплекса оперативного планирования [27], для получения данных:

- о составе НКУ каждого КА;
- о ТЦУ каждого КА, включая времена и последовательность выполнения операций;
- о результатах обработки экспертных данных в виде матриц уровневых связей;

и, при необходимости, с программой расчёта зон радиовидимости космических аппаратов, либо получать ЗРВ от подразделений, осуществляющих их расчёт.

Алгоритм используется для подготовки и проведения сеансов связи ЦУП с космическими аппаратами, в течение которых осуществляется управление этими аппаратами.

Применение алгоритма планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами предполагает соблюдение следующих условий:

а) осуществляется децентрализованное планирование проведения сеансов связи, заключающееся в том, что запросы на проведение сеансов связи с КА формируют ЦУП независимо друг от друга;

б) реализована возможность автоматизированного расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА;

в) осуществлена программная реализация настоящего алгоритма планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами;

г) обеспечена работоспособность технических, программных и информационных средств для применения алгоритма;

д) обеспечено автоматизированное информационное взаимодействие с источниками и потребителями информации;

е) состояние НСВ, бортовой аппаратуры КА и условия радиоэлектронной, метео-, гео- или гелиофизической обстановки в районах размещения средств взаимодействия позволяют реализовывать в заданное время с использованием данных НСВ запросы на проведение сеансов связи с данными КА;

ж) орган планирования задействования НСВ (ЦСАКП) располагает информацией:

- о наличии СЗРВ и СФЗРВ космических аппаратов, о возможности выполнения запросов на проведение сеансов связи по частям, т.е. разбиения запросов на фрагменты;

- о требованиях выполнения ТЦУ, накладывающих ограничения на реализацию запросов в части состава, сроков и последовательности выполнения операций, что обеспечивает возможность проверки соблюдения условий выполнения ТЦУ КА при планировании реализации запросов на проведение сеансов связи с КА и частей запросов.

Возможность реализации запросов на проведение сеансов связи с КА определяется достаточностью ресурсов времени плановых, свободных зон радиовидимости и их свободных фрагментов.

Достаточность ресурса времени зоны радиовидимости (ПЗРВ, СЗРВ) номер  $z$  для реализации запроса номер  $c$  при работе с КА порядковый номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$  определяется условием

$$t_{z,u,a} \geq t_{c,u,a}, c = \overline{1, C_a}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (102)$$

где  $t_{z,u,a}$  – длительность зоны радиовидимости номер  $z$  средством взаимодействия номер  $u$  космического аппарата номер  $a$ , определяемая выражением

$$t_{z,u,a} = t_{z,u,a}^K - t_{z,u,a}^H, z = \overline{1, Z_{u,a}}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (103)$$

$t_{c,u,a}$  – длительность выполнения запроса номер  $c$  на проведение сеанса связи с КА номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ , определяемая выражением

$$t_{c,u,a} = \sum_{k=1}^{K_c} t_{k,u,a}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (104)$$

$t_{k,u,a}$  – длительность выполнения операции номер  $k$  при работе с космическим аппаратом номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ ;

$K_c$  – количество операций в запросе номер  $c$ ;

$C_a$  – количество запросов на проведение сеансов связи с КА номер  $a$ ;

$U$  – количество наземных средств взаимодействия с КА;

$A$  – количество космических аппаратов.

Достаточность ресурсов времени свободных фрагментов зон радиовидимости для реализации запроса номер  $c$  для работы с КА номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$  определяется условием

$$T_c^{H\Phi} \geq t_{c,u,a}, c = \overline{1, C_a}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (105)$$

где  $T_c^{H\Phi}$  – ресурс времени имеющихся в наличии свободных фрагментов зон радиовидимости для реализации запроса номер  $c$ , определяемый выражением

$$T_c^{H\Phi} = \sum_{z=1}^{Z^{H\Phi}} t_{z,u,a}^{H\Phi}, c = \overline{1, C_a}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (106)$$

$t_{z,u,a}^{H\Phi}$  – ресурс времени имеющегося в наличии свободного фрагмента в зоне радиовидимости номер  $z$  при работе с космическим аппаратом номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ , определяемый выражением

$$t_{z,u,a}^{H\Phi} = t_{z,u,a} - \sum_{k=1}^{K_z^3} t_{k,z,u,a}^3, z = \overline{1, Z_{u,a}}, u = \overline{1, U}, a = \overline{1, A}, \quad (107)$$

$t_{k,z,u,a}$  – длительность выполнения операции номер  $k$  в зоне радиовидимости номер  $z$  при управлении КА порядковый номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ ;

$K_z^3$  – количество операций, размещённых в зоне радиовидимости номер  $z$ ;

$Z^{H\Phi}$  – количество зон радиовидимости, имеющих свободные фрагменты;

Достаточность ресурса времени свободного фрагмента ЗРВ номер  $z$  при работе с космическим аппаратом номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$  для реализации одной или нескольких операций проверяется условием

$$t_{z,u,a}^{нф} \geq T_{z,u,a}^p, \quad (108)$$

где  $T_{z,u,a}^p$  – длительность выполнения операций в ЗРВ номер  $z$  при работе с космическим аппаратом номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ , определяемая выражением

$$T_{z,u,a}^p = \sum_{k=1}^{K_z^p} t_{k,z,u,a}, \quad (109)$$

где  $K_z^p$  – количество подлежащих распределению на свободном фрагменте ЗРВ номер  $z$  операций запроса номер  $c$ .

Достаточность ресурса времени оставшихся свободных фрагментов зон радиовидимости для завершения распределения оставшихся операций запроса проверяется условием

$$T_c^{нф} \geq T_c^{TФ} \quad c = \overline{1, C_a}, \quad (110)$$

где  $T_c^{TФ}$  – ресурс времени фрагментов зон радиовидимости, требуемый для завершения распределения операций запроса номер  $c$ , определяемый выражением

$$T_c^{TФ} = \sum_{k=1}^{K_c^o} t_{k,c,u,a}, \quad c = \overline{1, C_a}, \quad u = \overline{1, U}, \quad a = \overline{1, A}, \quad (111)$$

$t_{k,c,u,a}$  – длительность выполнения операции номер  $k$  запроса номер  $c$  при работе с КА номер  $a$  с использованием средства взаимодействия номер  $u$ ;

$K_c^o$  – количество оставшихся для выполнения операций запроса номер  $c$ , определяемое выражением:

$$K_c^o = K_c - K_c^p, \quad (112)$$

где  $K_c$  – общее количество операций в запросе номер  $c$ ;

$K_c^p$  – количество распределённых по средствам взаимодействия операций запроса номер  $c$ .

Возможность применения настоящего алгоритма определяется ограничениями, заданными в постановке задачи (п.4.2):

– значениями доверительной вероятности результатов экспертных оценок, оценок согласованности экспертных данных, которые должны удовлетворять требованиям, предложенным в данной работе;

– быстродействием технических средств, определяющем время подготовки ПЗС, обеспечивающем выполнение требований по оперативности, заданных в руководящих документах по управлению КА и планированию взаимодействия НСВ.

Учитывая обоснованность подготовленного решения (ПЗС) о порядке взаимодействия средств по предложенным критериям, принимается допущение о времени утверждения решения не более 1-2 минут.

При реализации данного алгоритма используются:

– массивы информации, сформированные из поступающих от ЦУП КА заявок на взаимодействие средств, по которым формируются запросы на проведение сеансов связи с КА;

– массивы информации, содержащие состав НКУ каждого КА, ТЦУ каждого КА;

– массивы информации, содержащие зоны радиовидимости космических аппаратов;

– массивы информации, содержащие результаты обработки экспертных данных в виде таблиц весовых коэффициентов элементов иерархической структуры, используемые для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА.

В результате реализации алгоритма формируются:

– массивы информации об активных элементах иерархической структуры исходных данных, хранимые и используемые в течение периода расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА;

– массивы информации, содержащие значения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, хранимые от момента расчёта их значений до окончания периода планирования взаимодействия средств взаимодействия с возможностью уточнения на конкретный момент времени;

– массивы информации, содержащие Планы взаимодействия средств, коррекции и выписки из ПЗС, Распоряжения и коррекции распоряжений на взаимодействие средств, хранимые в течение периода планирования.

В процессе разработки алгоритма используются формальные модели методики назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, описание которых приведено в главе 3.

Определение порядка задействования средств взаимодействия в рамках данного алгоритма осуществляется при следующих допущениях:

- состав факторов, влияющих на приоритеты запросов, достаточен, а точность экспертных оценок этих факторов с достаточной степенью отображает их влияние на величину возможного ущерба управлению космическими аппаратами от переноса времени реализации нераспределённых запросов на проведение сеансов связи с КА;

- расчёт значений главного собственного вектора  $W$  и максимального собственного значения  $\lambda_{\max}$ , проводимый при оценке согласованности суждений экспертов, может проводиться с использованием пакетов прикладных математических программ (Mathematika, MATLAB, Maple, MathCAD и др.), с использованием теории матриц [87], либо приближёнными методами (например, приведенным в п.3.2.2.3);

Схема алгоритма планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами представлена на рисунке 9.

Распределение запросов по НСВ в соответствии с ЗРВ КА при оперативном планировании осуществляется в следующем порядке. После приёма и проверки корректности поступивших от ЦУП КА запросов (блок 2) устанавливается в зависимости от типа планирования (блок 3) признак  $\Pi=0$  для оперативного планирования (блок 4), либо признак  $\Pi=T$  для текущего планирования (блок 20). Далее осуществляется расчёт значений приоритетов (по п.3.3) поступивших (нераспределённых) запросов (блок 5), формирование картежа нераспределённых запросов (блок 6) в порядке снижения приоритетов и в соответствии с ТЦУ КА, выбор для обработки из картежа очередного запроса (блок 7). Первоначально осуществляется распределение запроса на плановую (заданную ЦУП) ЗРВ (блок 11) при наличии свободной ПЗРВ и достаточности его ресурса времени (блоки 8-10) и проверяется наличие других нераспределённых запросов (блок 12).

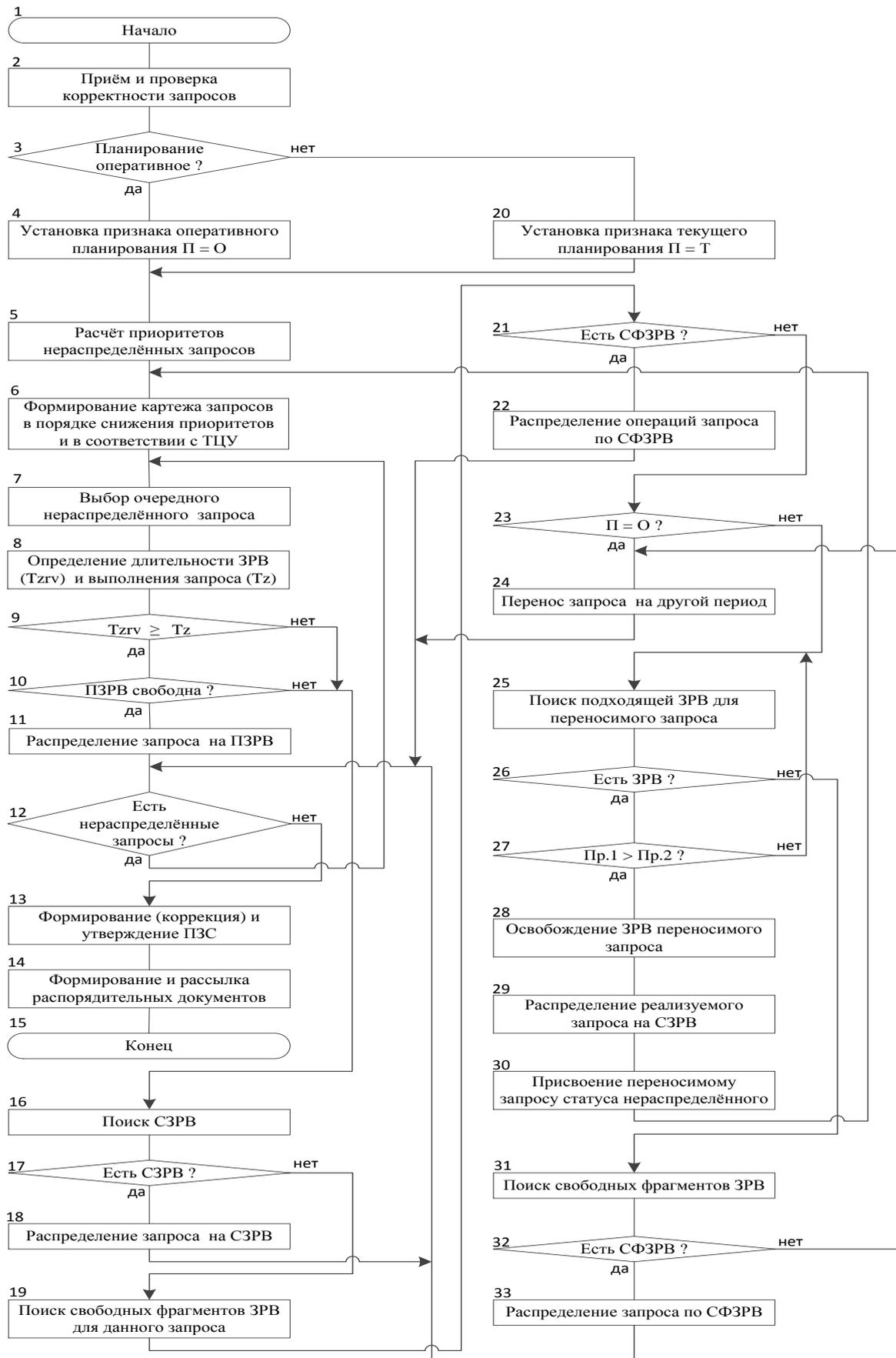


Рисунок 9 – Схема алгоритма планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами

При отсутствии нераспределённых запросов осуществляется переход к выполнению завершающих операций планирования – формирование (коррекция) и утверждение ПЗС (блок 13), на котором осуществляется включение распределённых запросов и их фрагментов в ПЗС, формирование итогового варианта ПЗС, а также его утверждение, после чего автоматически формируются и рассылаются распорядительные документы (выписки из ПЗС для ЦУП КА и распоряжения на задействование средств для КИП) для реализации утверждённого ПЗС (блок 14). При наличии нераспределённых запросов (блок 12) осуществляется выбор очередного запроса (блок 7) для обработки. достаточности его ресурса времени (блок 16), далее переход к определению наличия нераспределённых запросов (блок 12). При отсутствии свободной ПЗРВ (блок 10) осуществляется поиск свободной ЗРВ (блок 16), и распределение запроса на СЗРВ (блок 18) при наличии СЗРВ (блок 17) и При отсутствии необходимых СЗРВ (блок 17) осуществляется поиск свободных фрагментов ЗРВ для реализации данного запроса и распределение по ним операций запроса (блок 22) при их наличии (блок 21) и достаточности ресурсов времени свободных фрагментов зон радиовидимости для реализации данного запроса и ресурса времени свободного фрагмента конкретной ЗРВ для реализации одной или нескольких операций. При невозможности распределения операций данного запроса по СФЗРВ данной ЗРВ проводится проверка достаточности ресурсов времени свободных фрагментов других зон радиовидимости (блок 19). После распределения одного запроса по СФЗРВ осуществляется переход к проверке наличия нераспределённых запросов (блоку 12). При отсутствии необходимых СФЗРВ (блок 21) осуществляется перенос выполнения запроса на другой период (блок 24) и переход к проверке наличия нераспределённых запросов (блоку 12).

При текущем планировании после приёма и проверки корректности поступивших запросов (блок 2), установки признака П=Т текущего планирования (блок 20) осуществляется поиск возможности распределения поступивших запросов по ПЗРВ, СЗРВ и СФЗРВ в приведенном выше порядке. При невозможности реализации такого распределения осуществляется поиск

подходящей ЗРВ, занятой другим запросом (блок 25). Наличие такой ЗРВ свидетельствует о необходимости определения порядка обслуживания запросов, который осуществляется путём сравнения (блок 27) приоритетов поступившего запроса (Пр.1) и ранее распределённого запроса (Пр.2). Если поступивший запрос имеет более высокий приоритет, осуществляется освобождение ЗРВ ранее распределённого (переносимого) запроса (блок 28) после проверки достаточности ресурса освобождаемой ЗРВ (блоки 25, 26), распределение поступившего (реализуемого) запроса на освободившуюся ЗРВ (блок 29), присвоение переносимому запросу статуса нераспределённого (блок 30) с размещением его в картеже нераспределённых запросов в соответствии с его приоритетом и с учётом ТЦУ (блок 6), выбор очередного нераспределённого запроса (блок 7). Если приоритет поступившего (переносимого) запроса не превышает приоритет ранее распределённого запроса, осуществляется переход к поиску другой ЗРВ, занятой ранее распределённым запросом (блоку 25). Если не найдена ЗРВ запроса с более низким приоритетом осуществляется поиск подходящих свободных фрагментов ЗРВ для данного запроса, которые могли появиться в результате освобождения ЗРВ ранее распределённых запросов и распределения переносимых запросов. При наличии СФЗРВ (блок 32) реализации операций переносимого запроса распределяется по этим СФЗРВ (блок 33) после проверки достаточности ресурсов свободных фрагментов зон радиовидимости для реализации данного запроса или ресурса свободного фрагмента конкретной ЗРВ для реализации одной или нескольких операций (блок 31). После распределения данного запроса по свободным фрагментам зон радиовидимости осуществляется переход к определению наличия нераспределённых запросов (блоку 12), при невозможности распределения запроса по СФЗРВ он переносится для реализации на другой период (блок 24) и осуществляется переход к определению наличия нераспределённых запросов (блоку 12).

При проверке достаточности ресурса времени зоны радиовидимости (ПЗРВ, СЗРВ) для реализации запроса (102) осуществляются расчёты длительности зоны радиовидимости (103) и длительности выполнения запроса (104) (блоки 8, 16, 25).

При проверке достаточности ресурсов времени свободных фрагментов зон радиовидимости для реализации запроса (105) осуществляются расчёты размера ресурса времени имеющихся в наличии фрагментов свободных зон радиовидимости для реализации запроса (106) и размера ресурса времени имеющегося в наличии свободного фрагмента в зоне радиовидимости (107) (блоки 19, 31). При проверке достаточности ресурса времени свободного фрагмента ЗРВ для реализации одной или нескольких операций (108) осуществляются расчёты ресурса времени имеющегося в наличии свободного фрагмента в зоне радиовидимости (107) и длительность выполнения операций в ЗРВ (109) (блоки 19, 31). При проверке достаточности ресурса времени оставшихся свободных фрагментов зон радиовидимости для завершения распределения оставшихся операций запроса (110) осуществляются расчёты ресурса времени имеющихся в наличии фрагментов свободных зон радиовидимости для реализации данного запроса (106), ресурса времени фрагментов зон радиовидимости, требуемого для завершения распределения операций данного запроса (111) и количества оставшихся операций для выполнения данного запроса (112) (блоки 19, 31).

#### **4.4 Автоматизация принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами**

Разработанные модели представления иерархической структуры исходных данных, формирования матриц отношений и матриц сравнений, расчёта значений приоритетов элементов иерархической структуры, а также алгоритм эквивалентного преобразования иерархической структуры при объединении её элементов в группы обеспечивают возможность разработки программных средств для автоматизации наиболее трудоёмких работ – подготовки данных для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА.

Модель расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА совместно с перечисленными моделями подготовки данных обеспечивает возможность разработки программных средств для автоматизации расчёта значений приоритетов запросов и, тем самым, обеспечить возможность

принятия в короткие сроки обоснованных решений на основе значений приоритетов запросов. При возникновении спорной ситуации по задействованию наземных средств взаимодействия с КА осуществляется актуализация (выбор соответствующих возникшей ситуации) данных иерархической структуры в виде матриц уровневых связей, содержащих значения приоритетов факторов с учётом их взаимосвязей, и расчёт значений приоритетов запросов путём перемножения указанных матриц, что значительно сокращает время принятия решений.

Модели оценки согласованности экспертных данных (суждений экспертов, мнений группы экспертов и иерархии ИС), оценки качества экспертов обеспечивают возможность разработки программных средств для автоматизации процесса оценки качества экспертных данных и подбора состава экспертной группы.

Программные средства реализации алгоритма планирования задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами совместно с программными средствами реализации перечисленных формальных моделей подготовки данных и расчёта значений приоритетов запросов позволят завершить автоматизацию процесса принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами в виде Планов задействования средств.

#### **4.5 Пример определения порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при возникновении спорной ситуации**

При текущем планировании (коррекции ПЗС) в результате получения от ЦУП КА «Канопус–В» заявки на задействование средства номер 201 (рисунок 10) возникла спорная ситуация по задействованию средства номер 201 для проведения сеансов связи с КА «Стерх-11» (шифр А-801) и с КА «Канопус–В» (шифр А-806), изображённая на рисунке 11.

Исх. №  
от 27.11.2015 г.

Заявка на дополнительное задействование средств  
от ЦУП КА "Канопус-В" на 27.11.2015 г.

Объект	Виток	Номер КИП	Ср-ва	Зона Р/В	Угол места	Режим работы	Примечание (Т подг.)
1	2	3	4	5	6	7	8
A-806	125	2	01	12:05:00 - 12:16:00		101, 132, 160	Тподг = 15мин

специалист группы планирования  
сменный руководитель полётом  
Принял:

/ И.О.Фамилия /

/ И.О.Фамилия /

специалист по планированию

/ И.О.Фамилия /

Рисунок 10 – Заявка (запрос) от ЦУП КА «Канопус-В» на дополнительное задействование средств

Рисунок 11 – ПЗС со спорной ситуацией

Требуется определить порядок задействования средства № 201 с космическими аппаратами «Канопус–В» и «Стерх-11».

Подготовительные этапы

Этап 1. Формирование экспертной группы. Предполагается, что данный этап выполнен.

Этап 2. Формирование иерархической структуры исходных данных

Решение поставленной задачи осуществляется на основании разработанной иерархической структуры, представленной на рисунке 6.

Этап 3. Формирование матриц отношений

Предположим, что для режимов полёта КА экспертом проведено попарное сравнение элементов, результаты представлены в виде матрицы отношений (таблица 8):

$$C_{1,8}=1 \ (l = 1, m = 8), C_{2,7}=1 \ (l = 2, m = 7), C_{3,4}=1 \ (l = 3, m = 4).$$

Этап 4. Формирование частных матриц сравнений. Оценка согласованности суждений каждого эксперта

Таблица 8 – Матрица отношений для режимов полёта КА

Элементы сравнения $\mathcal{E}_i$	Степень сравнения	Абсолютное	Очень сильное	Сильное	Слабое	Равенство	Слабое	Сильное	Очень сильное	Абсолютное	Элементы сравнения $\mathcal{E}_j$
$l \downarrow$	$m \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\mathcal{E}_1$ (Ш)	1								1		$\mathcal{E}_2$ (НО)
$\mathcal{E}_1$ (Ш)	2							1			$\mathcal{E}_3$ (НШ)
$\mathcal{E}_2$ (НО)	3				1						$\mathcal{E}_3$ (НШ)

Обозначения: Ш, НО, НШ– штатный, неориентированный и нештатный режимы полёта.

По схеме формирования матрицы сравнений, представленной на рисунке 7, с учётом таблиц соответствия  $\varphi_1$  (таблица 4) и  $\varphi_2$  (таблица 5) для указанных координат  $l$  и  $m$  получаем матрицу сравнений для режимов полёта КА, представленную в таблице 9.

Таблица 9 – Матрица сравнений для характеристики «Режим полёта КА»

Элементы сравнения	Э <sub>1</sub> (Ш)	Э <sub>2</sub> (НО)	Э <sub>3</sub> (НШ)
Э <sub>1</sub> (Ш)	1	1/7 (0,143)	1/5 (0,2)
Э <sub>2</sub> (НО)	7	1	3
Э <sub>3</sub> (НШ)	5	1/3 (0,333)	1

1. Расчёт значений дополнительного столбца:

$$d_1 = \prod_{j=1}^3 a_{1,j} = 1 * 0,143 * 0,2 = 0,0286,$$

$$d_2 = \prod_{j=1}^3 a_{2,j} = 7 * 1 * 3 = 21,$$

$$d_3 = \prod_{j=1}^3 a_{3,j} = 5 * 0,333 * 1 = 1,666.$$

2. Расчёт значений главного собственного вектора матрицы сравнения (частных значений весовых коэффициентов) режимов полёта КА:

$$w_1^e = \sqrt[3]{d_1} = \sqrt[3]{0,0286} = 0,3057,$$

$$w_2^e = \sqrt[3]{d_2} = \sqrt[3]{21} = 2,7589,$$

$$w_3^e = \sqrt[3]{d_3} = \sqrt[3]{1,666} = 1,1856.$$

3. Расчёт суммы значений главного собственного вектора и нормализованного главного собственного вектора (приоритетов):

$$W^e = \sum_{i=1}^3 w_i^e = 0,3057 + 2,7589 + 1,1856 = 4,2503,$$

$$w_1 = w_1^e / W^e = 0,3057 / 4,2503 = 0,0719,$$

$$w_2 = w_2^e / W^e = 2,7589 / 4,2503 = 0,6491,$$

$$w_3 = w_3^e / W^e = 1,1856 / 4,2503 = 0,2790.$$

Результаты расчёта значений главного собственного вектора и нормализованного главного собственного вектора характеристики «Режим полёта КА» приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты расчета значений главного собственного вектора и нормализованного главного собственного вектора характеристики «Режим полёта КА»

Элементы сравнения	Ш	НО	НШ	Доп. столбец $d_i$	Главный собственный вектор $w_i^r$	Нормализованный главный собственный вектор $w_i$
Ш	1	1/7	1/5	0,0286	$\sqrt[3]{0,0286} = 0,3057$	$\frac{0,3057}{4,2503} = 0,0719$
НО	7	1	3	21	$\sqrt[3]{21} = 2,7589$	$\frac{2,7589}{4,2503} = 0,6491$
НШ	5	1/3	1	1,6667	$\sqrt[3]{1,6667} = 1,185$	$\frac{1,1856}{4,2503} = 0,2790$
				Сумма	4,2503	1

Оценка согласованности суждений эксперта (по [3])

1. Расчёт максимального собственного значения матрицы сравнений:

$$\lambda_{\max} = [1 \ 1 \ 1] * \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} \\ 7 & 1 & 3 \\ 5 & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,0719 \\ 0,6491 \\ 0,2790 \end{bmatrix} = (1+7+5)*0,0719 + (0,143+1+0,333)*0,6491 + (0,2+3+1)*0,279 = 3,0646.$$

2. Расчёт значения индекса согласованности:

$$ИС = \frac{3,0646}{3-1} = 0,0323.$$

3. Расчёт значения отношения согласованности:

$$ОС = \frac{0,0323}{0,58} = 0,0557.$$

Значение ОС < 0,10 считается приемлемым.

Аналогично оценивается согласованность суждений каждого эксперта по другим группам элементов иерархической структуры. Расчёт значений главного собственного вектора и максимального собственного значения может быть проведен с использованием пакетов прикладных математических программ (Mathematika, MATLAB, Maple, MathCAD и др.).

Этап 5. Формирование обобщённых матриц сравнений. Оценка согласованности мнений группы экспертов

Предположим, что для расчёта значений приоритетов режимов полёта КА было опрошено 5 экспертов, матрицы сравнений которых (таблица 11) оказались достаточно согласованными (ИС<0,10).

Таблица 11 – Результаты расчёта отношений согласованности суждений экспертов по характеристике «Режим полёта КА»

Матрица сравнений, эксперт 1				Частные значения	$\lambda_{\max}$	ИС	ОС
1	0,14	0,2	0,0719				
7	1	3	0,6491	3,065	0,032	0,056	
5	0,33	1	0,2790				

Матрица сравнений, эксперт 4				Частные значения	$\lambda_{\max}$	ИС	ОС
1	0,14	0,2	0,0719				
7	1	3	0,6491	3,065	0,032	0,056	
5	0,33	1	0,2790				

Матрица сравнений, эксперт 2				Частные значения	$\lambda_{\max}$	ИС	ОС
1	0,20	0,33	0,1047				
5	1	3	0,6370	3,038	0,019	0,033	
3	0,33	1	0,2583				

Матрица сравнений, эксперт 5				Частные значения	$\lambda_{\max}$	ИС	ОС
1	0,11	0,2	0,0581				
9	1	5	0,7352	3,1171	0,0586	0,100	
5	0,2	1	0,2067				

Матрица сравнений, эксперт 3				Частные значения	$\lambda_{\max}$	ИС	ОС
1	0,11	0,14	0,0549				
9	1	3	0,6554	3,080	0,040	0,069	
7	0,33	1	0,2897				

1. Рассчитываем значения элементов обобщенной матрицы сравнений группы режимов полёта КА по формуле (43):

$$a_{1,2}^{2,4} = \sqrt[5]{0,14 * 0,2 * 0,11 * 0,14 * 0,11} = 0,1382,$$

$$a_{1,3}^{2,4} = \sqrt[5]{0,2 * 0,33 * 0,14 * 0,2 * 0,2} = 0,2071, \quad a_{2,1}^{2,4} = \sqrt[5]{7 * 5 * 9 * 7 * 9} = 7,2365,$$

$$a_{2,3}^{2,4} = \sqrt[5]{3 * 3 * 3 * 3 * 5} = 3,3227, \quad a_{3,1}^{2,4} = \sqrt[5]{5 * 3 * 7 * 5 * 5} = 4,8287,$$

$$a_{3,2}^{2,4} = \sqrt[5]{0,33 * 0,33 * 0,33 * 0,33 * 0,2} = 0,3010$$

2. Рассчитываем значения приоритетов элементов иерархической структуры.

2.1. Рассчитываем значения дополнительного столбца:

$$d_1 = 1 * 0,1382 * 0,2071 = 0,0286, \quad d_2 = 7,2365 * 1 * 3,3227 = 24,0447,$$

$$d_3 = 4,8287 * 0,3010 * 1 = 1,4534.$$

2.2. Рассчитываем значения главного собственного вектора матрицы сравнения:

$$w^4_1 = \sqrt[3]{0,0286} = 0,3059, w^4_2 = \sqrt[3]{24,0447} = 2,8863, w^4_3 = \sqrt[3]{1,4534} = 1,1327.$$

2.3. Рассчитываем сумму значений элементов главного собственного вектора и значения приоритетов элементов иерархической структуры:

$$W^4 = 0,3059 + 2,8863 + 1,1327 = 4,3249,$$

$$w^{3,4}_1 = 0,3059 / 4,3249 = 0,0707, w^{3,4}_2 = 2,8863 / 4,3249 = 0,6674,$$

$$w^{3,4}_3 = 1,1327 / 4,3249 = 0,2619.$$

2.4. По формулам (40, 41, 42) рассчитываем значения  $I_{max}$ , ИС и ОС. Обобщённая матрица сравнений и результаты расчёта согласованности представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Обобщённая матрица сравнений для характеристики «Режим полёта КА» и результаты расчёта согласованности

Обобщённая матрица сравнений

n	1	2	3	доп. столбец	собств. вектор	норм. соб. вектор
1	1	0,1382	0,2071	0,0286	0,3059	0,0707
2	7,2365	1	3,3227	24,0447	2,8863	0,6674
3	4,8287	0,3010	1	1,4534	1,1327	0,2619
$\Sigma$	13,065	1,439	4,5298		4,3249	1,000
				<b>ИС</b>	<b>ОС</b>	<b><math>I_{max}</math></b>
				0,035	0,061	3,071

Значение ОС = 0,061 < 0,1 свидетельствует о приемлемой согласованности мнений группы экспертов для данной матрицы сравнений.

Предположим, что проведено ранжирование (присвоение значений рангов) 7-ми элементов ( $I=7$ ) – весовых коэффициентов в порядке возрастания их значимости для группы из 5-ти экспертов ( $H=5$ ), результаты ( $z_{hi}$ ,  $h = \overline{1,5}$ ,  $i = \overline{1,7}$ ) представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты ранжирования весовых коэффициентов и расчёта рангов

Номер эксперта $h$ и ранги	Номер весового коэффициента $i$						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4	3	2	6	1	5	7
2	6	3	2	5	1	4	7
3	4	2	1	6	3	5	7
4	4	3	2	5	1	6	7
5	3	4	2	6	1	5	7
$z_i$	21	15	9	28	7	25	35
$z_{i,ср.}$	21/5	15/5	9/5	28/5	7/5	25/5	35/5

Для каждого весового коэффициента экспертизы по формулам (56, 58) вычисляем:

- суммарное значение рангов ( $z_i$ )

$$z_1=4+6+4+4+3=21, z_2= 3+3+2+3+4=15, z_3= 2+2+1+2+2=9, z_4 = 6+5+6+5+6=28, z_5 = 1+1+3+1+1=7, z_6 = r_6 =5+4+5+6+5=25, z_7 = 7+7+7+7+7=35,$$

- среднее арифметическое рангов ( $\bar{z}$ )

$$\bar{z} = \frac{21 + 15 + 9 + 28 + 7 + 25 + 35}{7} = 20 .$$

Далее вычисляем:

- отклонения от среднего арифметического

$$z_1 - \bar{z} = 21 - 20 = 1, z_2 - \bar{z} = 15 - 20 = -5, z_3 - \bar{z} = 9 - 20 = -11, z_4 - \bar{z} = 28 - 20 = 8, z_5 - \bar{z} = 7 - 20 = -13, z_6 - \bar{z} = 25 - 20 = 5, z_7 - \bar{z} = 35 - 20 = 15,$$

- квадраты отклонений от среднего арифметического

$$(z_1 - \bar{z})^2 = 1, (z_2 - \bar{z})^2 = 25, (z_3 - \bar{z})^2 = 121, (z_4 - \bar{z})^2 = 64, (z_5 - \bar{z})^2 = 169, (z_6 - \bar{z})^2 = 25, (z_7 - \bar{z})^2 = 225,$$

- сумму квадратов отклонений от среднего арифметического

$$S = 1+25+121+64+169+25+225=630$$

- дисперсионный коэффициент конкордации Кендалла (59)

$$W(5) = \frac{12 * 630}{5^2 * (7^3 - 7)} = \frac{12 * 630}{25 * (343 - 7)} = 0,9$$

При  $W(n)=0,9$  согласованность мнений экспертов считается высокой [3].

Этап 6. Ранжирование экспертных оценок

Ранжирование экспертных оценок проводится на основании данных, представленных в таблице 13.

Для каждого весового коэффициента вычисляем:

– по формуле (56) суммарные значения рангов ( $z_i$ )

$$z_1=4+6+4+4+3=21, z_2=3+3+2+3+4=15, z_3=2+2+1+2+2=9, z_4=6+5+6+5+6=28, \\ z_5=1+1+3+1+1=7, z_6=5+4+5+6+5=25, z_7=7+7+7+7+7=35,$$

– по формуле (62) определим средние значения ранга каждого весового коэффициента

$$z_{1. cp} = 21/5, z_{2. cp} = 15/5, z_{3. cp} = 9/5, z_{4. cp} = 28/5, z_{5. cp} = 7/5, z_{6. cp} = 25/5, z_{7. cp} = 35/5.$$

– по формуле (63) определим значения отклонений мнений каждого эксперта от среднего мнения группы относительно значимости каждого весового коэффициента:

$$\Delta z_{1,1} = |z_{1,1} - |z_{1. cp}|| = |4 - 21/5| = 1/5; \Delta z_{1,2} = |z_{1,2} - |z_{2. cp}|| = |3 - 15/5| = 0; \\ \Delta z_{1,3} = |z_{1,3} - |z_{3. cp}|| = |2 - 9/5| = 1/5; \Delta z_{1,4} = |z_{1,4} - |z_{4. cp}|| = |6 - 28/5| = 2/5; \\ \Delta z_{1,5} = |z_{1,5} - |z_{5. cp}|| = |1 - 7/5| = 2/5; \Delta z_{1,6} = |z_{1,6} - |z_{6. cp}|| = |5 - 25/5| = 0; \\ \Delta z_{1,7} = |z_{1,7} - |z_{7. cp}|| = |7 - 35/5| = 0; \Delta z_{2,1} = |z_{2,1} - |z_{1. cp}|| = |6 - 21/5| = 9/5; \\ \Delta z_{2,2} = |z_{2,2} - |z_{2. cp}|| = |3 - 15/5| = 0; \Delta z_{2,3} = |z_{2,3} - |z_{3. cp}|| = |2 - 9/5| = 1/5; \\ \Delta z_{2,4} = |z_{2,4} - |z_{4. cp}|| = |5 - 28/5| = 3/5; \Delta z_{2,5} = |z_{2,5} - |z_{5. cp}|| = |1 - 7/5| = 2/5; \\ \Delta z_{2,6} = |z_{2,6} - |z_{6. cp}|| = |4 - 25/5| = 5/5; \Delta z_{2,7} = |z_{2,7} - |z_{7. cp}|| = |7 - 35/5| = 0; \\ \Delta z_{3,1} = |z_{3,1} - |z_{1. cp}|| = |4 - 21/5| = 1/5; \Delta z_{3,2} = |z_{3,2} - |z_{2. cp}|| = |2 - 15/5| = 5/5; \\ \Delta z_{3,3} = |z_{3,3} - |z_{3. cp}|| = |1 - 9/5| = 4/5; \Delta z_{3,4} = |z_{3,4} - |z_{4. cp}|| = |6 - 28/5| = 2/5; \\ \Delta z_{3,5} = |z_{3,5} - |z_{5. cp}|| = |3 - 7/5| = 8/5; \Delta z_{3,6} = |z_{3,6} - |z_{6. cp}|| = |5 - 25/5| = 0; \\ \Delta z_{3,7} = |z_{3,7} - |z_{7. cp}|| = |7 - 35/5| = 0; \Delta z_{4,1} = |z_{4,1} - |z_{1. cp}|| = |4 - 21/5| = 1/5; \\ \Delta z_{4,2} = |z_{4,2} - |z_{2. cp}|| = |3 - 15/5| = 0; \Delta z_{4,3} = |z_{4,3} - |z_{3. cp}|| = |2 - 9/5| = 1/5; \\ \Delta z_{4,4} = |z_{4,4} - |z_{4. cp}|| = |5 - 28/5| = 3/5; \Delta z_{4,5} = |z_{4,5} - |z_{5. cp}|| = |1 - 7/5| = 2/5; \\ \Delta z_{4,6} = |z_{4,6} - |z_{6. cp}|| = |6 - 25/5| = 5/5; \Delta z_{4,7} = |z_{4,7} - |z_{7. cp}|| = |7 - 35/5| = 0; \\ \Delta z_{5,1} = |z_{5,1} - |z_{5. cp}|| = |3 - 21/5| = 6/5; \Delta z_{5,2} = |z_{5,2} - |z_{2. cp}|| = |4 - 15/5| = 5/5; \\ \Delta z_{5,3} = |z_{5,3} - |z_{3. cp}|| = |2 - 9/5| = 1/5; \Delta z_{5,4} = |z_{5,4} - |z_{4. cp}|| = |6 - 28/5| = 2/5; \\ \Delta z_{5,5} = |z_{5,5} - |z_{5. cp}|| = |1 - 7/5| = 2/5; \Delta z_{5,6} = |z_{5,6} - |z_{6. cp}|| = |5 - 25/5| = 0; \\ \Delta z_{5,7} = |z_{5,7} - |z_{7. cp}|| = |7 - 35/5| = 0.$$

Согласно (65) формируем матрицу отклонений ( $\Delta Z$ ) мнений экспертов по каждому весовому коэффициенту (таблица 14).

Таблица 14 – Матрица отклонений мнений экспертов

	1	2	3	4	5	6	7	$\leftarrow i, h \downarrow$
$\Delta Z =$	1/5	0	1/5	2/5	2/5	0	0	1
	9/5	0	1/5	3/5	2/5	5/5	0	2
	1/5	5/5	4/5	2/5	8/5	0	0	3
	1/5	0	1/5	3/5	2/5	5/5	0	4
	6/5	5/5	1/5	2/5	2/5	0	0	5

– по формуле (66) определяем суммы отклонений мнений экспертов от среднего мнения по всем весовым коэффициентам:

$$\Delta k_1 = \Delta z_{1,1} + \Delta z_{1,2} + \Delta z_{1,3} + \Delta z_{1,4} + \Delta z_{1,5} + \Delta z_{1,6} + \Delta z_{1,7} = 1/5 + 0 + 1/5 + 2/5 + 2/5 + 0 + 0 = 6/5,$$

$$\Delta k_2 = \Delta z_{2,1} + \Delta z_{2,2} + \Delta z_{2,3} + \Delta z_{2,4} + \Delta z_{2,5} + \Delta z_{2,6} + \Delta z_{2,7} = 9/5 + 0 + 1/5 + 3/5 + 2/5 + 1 + 0 = 20/5,$$

$$\Delta k_3 = \Delta z_{3,1} + \Delta z_{3,2} + \Delta z_{3,3} + \Delta z_{3,4} + \Delta z_{3,5} + \Delta z_{3,6} + \Delta z_{3,7} = 1/5 + 1 + 4/5 + 2/5 + 8/5 + 0 + 0 = 20/5,$$

$$\Delta k_4 = \Delta z_{4,1} + \Delta z_{4,2} + \Delta z_{4,3} + \Delta z_{4,4} + \Delta z_{4,5} + \Delta z_{4,6} + \Delta z_{4,7} = 1/5 + 0 + 1/5 + 3/5 + 2/5 + 1 + 0 = 12/5,$$

$$\Delta k_5 = \Delta z_{5,1} + \Delta z_{5,2} + \Delta z_{5,3} + \Delta z_{5,4} + \Delta z_{5,5} + \Delta z_{5,6} + \Delta z_{5,7} = 6/5 + 1 + 1/5 + 2/5 + 2/5 + 0 + 0 = 16/5,$$

– по формуле (67) определяем сумму отклонений всех экспертов по всем весовым коэффициентам:

$$\Delta k = \Delta k_1 + \Delta k_2 + \Delta k_3 + \Delta k_4 + \Delta k_5 = 6/5 + 20/5 + 20/5 + 12/5 + 16/5 = 74/5,$$

– по формуле (68) определяем средние отклонения каждого эксперта по всем весовым коэффициентам от суммы отклонений мнений всех экспертов:

$$\overline{\Delta k_1} = |\Delta k_1 - \Delta k| = |6/5 - 74/5| = 68/5,$$

$$\overline{\Delta k_2} = |\Delta k_2 - \Delta k| = |20/5 - 74/5| = 54/5,$$

$$\overline{\Delta k_3} = |\Delta k_3 - \Delta k| = |20/5 - 74/5| = 54/5,$$

$$\overline{\Delta k_4} = |\Delta k_4 - \Delta k| = |12/5 - 74/5| = 62/5,$$

$$\overline{\Delta k_5} = |\Delta k_5 - \Delta k| = |16/5 - 74/5| = 58/5,$$

– ранжируем номера экспертов в порядке возрастания средних отклонений мнений каждого эксперта от среднего по группе, что соответствует убыванию качества мнений экспертов, результаты заносим в таблицу 15.

Таблица 15 – Результаты ранжирования экспертов

$h$	1	2	3	4	5
$\overline{\Delta k_h}$	68/5	54/5	54/5	62/5	58/5
$\overline{\Delta k_h^*}$	54/5	54/5	58/5	62/5	68/5
$h^*$	1* - 2*	1* - 2*	3*	4*	5*

Наибольшее отклонение мнений имеет эксперт номер 5 ( $h^* = 5$ ).

Этап 7. Оценка согласованности иерархий

Рассмотрим согласованность относительно элемента «пилотируемые» (уровень №3 («Параметры характеристик КА») элемент номер 1) иерархической структуры, представленной на рисунке 6.

Предположим, что на предыдущих этапах определены:

- вектор-строка приоритетов 3-го уровня («Группы операций»): (0,16; 0,12; 0,13; 0,13; 0,05; 0,12; 0,3);

- индекс согласованности 3-го уровня: 0,07;

- вектор-столбец индексов согласованности 4-го уровня: 0,01; 0,01; 0,2; 0,08; 0,025; 0; 0,105.

По формуле (72) определяем значение реального индекса согласованности иерархии относительно рассматриваемого элемента

$$\text{РИСИ} = 0,07 + (0,16; 0,12; 0,13; 0,13; 0,05; 0,12; 0,3) \begin{bmatrix} 0,01 \\ 0,01 \\ 0,2 \\ 0,08 \\ 0,025 \\ 0 \\ 0,105 \end{bmatrix} = 0,14195.$$

По формуле (73) определяем значение случайного индекса согласованности иерархии относительно рассматриваемого элемента

$$\text{СИСИ} = 1,32 + (0,16; 0,12; 0,13; 0,13; 0,05; 0,12; 0,3) \begin{bmatrix} 1,12 \\ 0 \\ 0,58 \\ 1,24 \\ 1,24 \\ 0,58 \\ 0,9 \end{bmatrix} = 2,1374.$$

По формуле (74) определяем значение отношение согласованности иерархии

$$\text{ОСИ} = 0,14195/2,1374 = 0,06.$$

Поскольку  $\text{ОСИ} < 0,1$ , то иерархия считается согласованной. Полагаем, что остальные проверки согласованности иерархии дали положительные результаты.

Этап 8. Расчёт приоритетов элементов иерархической структуры

Для обобщённой матрицы сравнений параметров характеристики «Режим полёта КА» рассчитываем значения нормализованного собственного вектора, являющиеся приоритетами элементов указанных параметров характеристики. Обобщённая матрица сравнений и результаты расчёта приоритетов представлены в таблице 12.

Согласно (76) на основании соответствий групповых порядковым номерам и связям вершин иерархической структуры исходных данных (рисунок 6) устанавливаем следующее соотношение индексов рассчитанных приоритетов:

$$w^{3,4}_1 \rightarrow w^{3,4}_{15,4}, w^{3,4}_2 \rightarrow w^{3,4}_{16,4}, w^{3,4}_3 \rightarrow w^{3,4}_{17,4}.$$

В соответствии с (78) для рассчитанных приоритетов устанавливаем значения приоритетов элементов матриц уровней связей:

$$k^{3,4}_{15,4} = w^{3,4}_{15,4} = 0,0707, k^{3,4}_{16,4} = w^{3,4}_{16,4} = 0,6674, k^{3,4}_{17,4} = w^{3,4}_{17,4} = 0,2619.$$

Аналогично рассчитываются и индексируются значения приоритетов других элементов иерархической структуры. Результаты формирования исходных матриц уровней связей рассматриваемой иерархической структуры (рисунок 6) представлены в таблицах 16–19.

Таблица 16 – Исходная матрица уровней связей характеристик КА ( $K^2$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1
1	0,4369
2	0,0651
3	0,0531
4	0,0998
5	0,059
6	0,2861

Таблица 17 – Исходная матрица уровней связей параметров характеристик КА ( $K^3$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6
1	<b>0,3703</b>	0	0	0	0	0
2	<b>0,4024</b>	0	0	0	0	0
3	<b>0,0665</b>	0	0	0	0	0
4	<b>0,0124</b>	0	0	0	0	0
5	<b>0,0326</b>	0	0	0	0	0
6	<b>0,0543</b>	0	0	0	0	0
7	<b>0,0615</b>	0	0	0	0	0
8	0	<b>0,728</b>	0	0	0	0
9	0	<b>0,272</b>	0	0	0	0
10	0	0	<b>0,5076</b>	0	0	0
11	0	0	<b>0,2536</b>	0	0	0
12	0	0	<b>0,1</b>	0	0	0
13	0	0	<b>0,1</b>	0	0	0
14	0	0	<b>0,0388</b>	0	0	0
15	0	0	0	<b>0,0707</b>	0	0
16	0	0	0	<b>0,6674</b>	0	0
17	0	0	0	<b>0,2619</b>	0	0
18	0	0	0	0	<b>0,51</b>	0
19	0	0	0	0	<b>0,2638</b>	0
20	0	0	0	0	<b>0,1296</b>	0
21	0	0	0	0	<b>0,0329</b>	0
22	0	0	0	0	<b>0,0637</b>	0
23	0	0	0	0	0	<b>0,0761</b>
24	0	0	0	0	0	<b>0,2947</b>
25	0	0	0	0	0	<b>0,5913</b>
26	0	0	0	0	0	<b>0,0379</b>

Таблица 18 – Исходная матрица уровней связей характеристики «Режим работы ТС НАКУ» ( $K^4$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	0	0	0	0	0	<b>0,1</b>	0	0	<b>0,06</b>	0	<b>0,28</b>	0	0	0	<b>0,1</b>	0	0	<b>0,3</b>	0	0	<b>0,05</b>	0	<b>0,03</b>	0	0	0
2	0	0	0	0	0	<b>0,28</b>	0	0	<b>0,07</b>	0	<b>0,1</b>	0	0	0	<b>0,43</b>	0	0	<b>0,44</b>	0	0	<b>0,12</b>	0	<b>0,06</b>	0	0	0
3	0	0	0	0	0	<b>0,43</b>	0	0	<b>0,43</b>	0	<b>0,44</b>	0	0	0	<b>0,27</b>	0	0	<b>0,11</b>	0	0	<b>0,43</b>	0	<b>0,44</b>	0	0	0
4	0	0	0	0	0	<b>0,08</b>	0	0	<b>0,11</b>	0	<b>0,06</b>	0	0	0	<b>0,07</b>	0	0	<b>0,06</b>	0	0	<b>0,28</b>	0	<b>0,29</b>	0	0	0
5	0	0	0	0	0	<b>0,06</b>	0	0	<b>0,28</b>	0	<b>0,07</b>	0	0	0	<b>0,08</b>	0	0	<b>0,05</b>	0	0	<b>0,06</b>	0	<b>0,15</b>	0	0	0
6	0	0	0	0	0	<b>0,03</b>	0	0	<b>0,02</b>	0	<b>0,02</b>	0	0	0	<b>0,03</b>	0	0	<b>0,02</b>	0	0	<b>0,02</b>	0	<b>0,01</b>	0	0	0
7	0	0	0	0	0	<b>0,02</b>	0	0	<b>0,03</b>	0	<b>0,03</b>	0	0	0	<b>0,02</b>	0	0	<b>0,02</b>	0	0	<b>0,04</b>	0	<b>0,02</b>	0	0	0

Таблица 19 – Исходная матрица уровневых связей характеристики «Режим работы ТС НАКУ» ( $K^5$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7
1	<b>0,1276</b>	0	0	0	0	0	0
2	<b>0,3026</b>	0	0	0	0	0	0
3	<b>0,153</b>	0	0	0	0	0	0
4	<b>0,275</b>	0	0	0	0	0	0
5	<b>0,1418</b>	0	0	0	0	0	0
6	0	<b>0,7241</b>	0	0	0	0	0
7	0	<b>0,2759</b>	0	0	0	0	0
8	0	0	<b>0,33</b>	0	0	0	0
9	0	0	<b>0,32</b>	0	0	0	0
10	0	0	<b>0,35</b>	0	0	0	0
11	0	0	0	<b>0,0811</b>	0	0	0
12	0	0	0	<b>0,0563</b>	0	0	0
13	0	0	0	<b>0,2105</b>	0	0	0
14	0	0	0	<b>0,2496</b>	0	0	0
15	0	0	0	<b>0,1065</b>	0	0	0
16	0	0	0	<b>0,296</b>	0	0	0
17	0	0	0	0	<b>0,1497</b>	0	0
18	0	0	0	0	<b>0,1755</b>	0	0
19	0	0	0	0	<b>0,2014</b>	0	0
20	0	0	0	0	<b>0,156</b>	0	0
21	0	0	0	0	<b>0,1796</b>	0	0
22	0	0	0	0	<b>0,1378</b>	0	0
23	0	0	0	0	0	<b>0,4458</b>	0
24	0	0	0	0	0	<b>0,2395</b>	0
25	0	0	0	0	0	<b>0,3147</b>	0
26	0	0	0	0	0	0	<b>0,57</b>
27	0	0	0	0	0	0	<b>0,27</b>
28	0	0	0	0	0	0	<b>0,16</b>
29	0	0	0	0	0	0	<b>0,1</b>

### Заключительные этапы

Этап 9. Расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА

1. Множество активных элементов ИС неразрешённых запросов на проведение сеансов связи с КА «Стерх-11» и «Канопус-В» и значений их приоритетов, сформированные в соответствии с формулами (79–82), представлены в таблицах 20–24.

2. Рабочие матрицы уровневых связей  $K^2 - K^5$ , сформированные в соответствии с формулами (83) и (84) с учётом активных элементов ИС, для неразрешённых запросов на проведение сеансов связи с КА «Стерх-11» и КА «Канопус-В» представлены в таблицах 25–30.

Таблица 20 – Активные элементы 4-го уровня ИС КА «Стерх-11» и КА «Канопус-В»

$p \downarrow, q \rightarrow$	б	КА
1	$\exists_{1,6}^{4,a}$	«Канопус-В»
2	$\exists_{2,6}^{4,a}$	
7	$\exists_{7,6}^{4,a}$	
4	$\exists_{4,6}^{4,a}$	«Стерх-11»
5	$\exists_{5,6}^{4,a}$	

Таблица 21 – Активные элементы 2, 3 и 5-го уровней ИС КА «Стерх-11» и КА «Канопус-В»

Космический аппарат	«Стерх-11»	«Канопус-В»
Наименование характеристики, параметра	$\exists_{p,q}^{r,a}$	$\exists_{p,q}^{r,a}$
Тип КА	$\exists_{1,1}^{2,a}$	$\exists_{1,1}^{2,a}$
Метео/ДЗЗ	$\exists_{6,1}^{3,a}$	$\exists_{6,1}^{3,a}$
Разовые команды (101)		$\exists_{1,1}^{5,a}$
Факультативный (132)		$\exists_{28,7}^{5,a}$
Сеансы управления с ОВОУ (160)		$\exists_{6,2}^{5,a}$
Фазирование и коррекция (107)	$\exists_{12,4}^{5,a}$	
Телеметрия (112)	$\exists_{17,5}^{5,a}$	
Сверка шкал времени (116)	$\exists_{13,4}^{5,a}$	

Таблица 22 – Приоритеты активных элементов характеристик и параметров характеристик КА ( $K^2, K^3$ )

Характеристики КА		КА «Стерх-11»		КА «Канопус-В»	
Наименование	$k_{p,q}^{2a}$	Параметры	$k_{p,q}^{3a}$	Параметры	$k_{p,q}^{3a}$
Тип КА	$k_{1,1}^{2,a} = 0,4369$	Метео/ДЗЗ	$k_{6,1}^{3,a} = 0,0543$	Метео/ДЗЗ	$k_{6,1}^{3,a} = 0,0543$

Таблица 23 – Приоритеты активных элементов характеристики «Группы режимов работы ТС НАКУ» ( $K^4$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	б	
1	0,1	КА «Канопус-В»
2	0,28	
7	0,02	
4	0,08	КА «Стерх-11»
5	0,06	

Примечание: таблица составлена с учётом связей с активными элементами 3-го уровня, указанными в таблице 22.

Таблица 24 – Приоритеты активных элементов параметров характеристики «Группы режимов работы ТС НАКУ» ( $K^5$ )

КА «Стерх-11»		КА «Канопус-В»	
Фазирование и коррекция (107)	$k_{12,4}^{5,a} = 0,0563$	Разовые команды (101)	$k_{1,1}^{5,a} = 0,1276$
Телеметрия (112)	$k_{17,5}^{5,a} = 0,1497$	Факультативный (132)	$k_{28,7}^{5,a} = 0,1600$
Сверка шкал времени (116)	$k_{13,4}^{5,a} = 0,2105$	Сеансы управления с ОВОУ (160)	$k_{6,2}^{5,a} = 0,7241$

Таблица 25 – Рабочая матрица уровневых связей параметров характеристик КА «Стерх–11» ( $K^3$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	<b>0,0543</b>	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0

Таблица 26 – Рабочая матрица уровневых связей параметров характеристик КА "Канопус-В" ( $K^3$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	<b>0,0543</b>	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0



Таблица 29 – Рабочая матрица уровневых связей параметров характеристики «Группы режимов работы ТС НАКУ» для КА «Стерх–11» ( $K^5$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	<b>0,0563</b>	0	0	0
13	0	0	0	<b>0,2105</b>	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	<b>0,1497</b>	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 30 – Рабочая матрица уровневых связей параметров характеристики «Группы режимов работы ТС НАКУ» для КА "Канопус-В" ( $K^5$ )

$p \downarrow, q \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7
1	<b>0,1276</b>	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	<b>0,7241</b>	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	<b>0,16</b>
29	0	0	0	0	0	0	0

Этап 9. Используя аппарат перемножения матриц средствами Excel по формуле (85) рассчитываем значения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА «Стерх-11» и с КА «Канопус-В»

$pr_1 = 0,00070$  (с КА «Стерх-11»),  $pr_2 = 0,00517$  (с КА «Канопус-В»).

Этап 10. Предоставление ресурсов технических средств НАКУ для реализации запросов на проведение сеансов связи с КА в соответствии с приоритетами

1. Ранжируем значения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА

При ранжировании рассчитанных значений приоритетов запросов на проведение СС получаем упорядоченные значения приоритетов:  $pr_1^* = 0,00517$ ,  $pr_2^* = 0,00070$  и соответствующий список запросов с новыми номерами в порядке убывания приоритетов: 1\* (КА «Канопус-В»), 2\* (КА «Стерх-11»).

2. Распределение ресурсов ТС НАКУ в соответствии с приоритетами запросов

В соответствии с приоритетами запросов средство №201 на период 12.05.00 – 12.16.00 27.11.2015г. предоставляется для проведения СС с КА «Канопус-В» (СС включается в ПЗС), запрос на проведение СС с КА «Стерх-11» отклоняется (СС исключается из ПЗС) (рисунок 12), на КИП направляется дополнительное распоряжение на задействование средств (рисунок 13), в Центры управления полётами (ЦУП) КА «Канопус-В» и «Стерх-11» направляются коррекции выписок из ПЗС (соответственно рисунки 14 и 15). Указанные действия выполняются с использованием программных средств планирования ЦСАКП. В соответствии с распоряжением и выпиской из ПЗС для ЦУП КА «Канопус-В» средство №201 (ПЭВМ АПК КИС) и средства ЦУП (ПЭВМ АПК ЦУП КА «Канопус-В») включают в работу 27.11.2015г. в 12.05.00) для проведения СС с КА «Канопус-В». Работа ЦУП КА «Стерх-11» со средством №201 в это время отменяется (рисунки 13 и 15). В связи с отсутствием свободных ЗРВ в текущие сутки сеанс связи с КА «Стерх-11» переносится на следующие сутки.

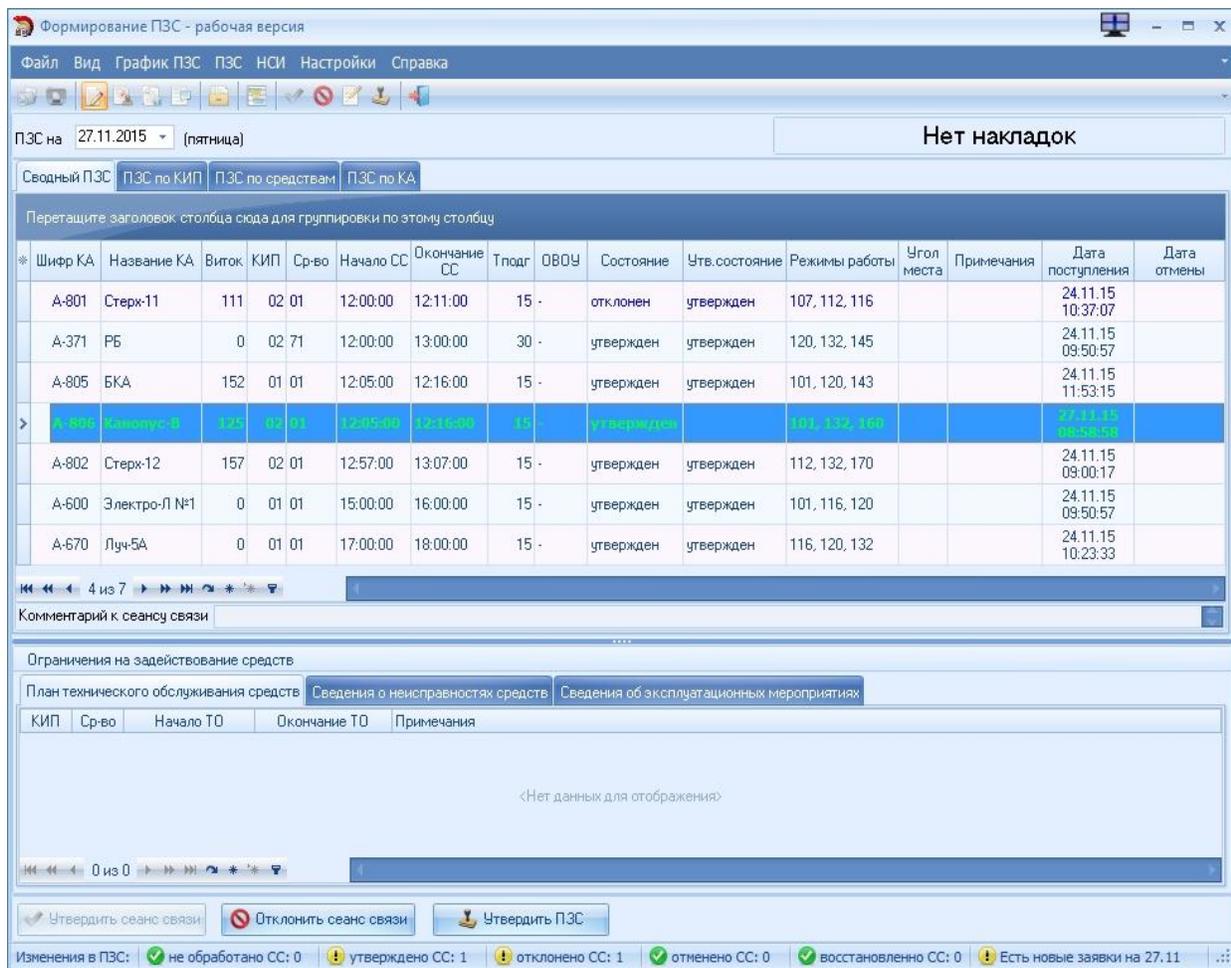


Рисунок 12 – ПЗС без накладок

Исх. №  
от 27.11.2015г.

Утверждаю  
Должность  
\_\_\_\_\_/И.О.Фамилия/  
"27" ноября 2015г.

Дополнительное распоряжение на задействование средств  
для Центрального КИП (№ 02) на 27.11.2015 г.

Объект	Виток	Зона Р/В	Ср-ва	Угол места	Режим работы	Примечание (Т подг.)
1	2	3	4	5	6	7
А-801	111	12:00:00 - 12:11:00	01		107, 112, 116	отклонен; Тподг = 15мин.
А-806	125	12:05:00 - 12:16:00	01		101, 132, 160	включен; Тподг = 15мин.

специалист по планированию

/ И.О.Фамилия /

Рисунок 13 – Дополнительное распоряжение на задействование средств

Исх. №  
от 27.11.2015г.

Коррекция выписки из плана задействования средств  
для ЦУП КА "Канопус-В" на 27.11.2015 г.

Объект	Виток	Номер КИП	Ср-ва	Зона Р/В	Угол места	Режим работы	Примечание (Т подг.)
1	2	3	4	5	6	7	8
А-806	125	2	01	12:05:00 - 12:16:00		101, 132, 160	включен; Тподг = 15мин;

начальник отдела / И.О.Фамилия /  
 начальник лаборатории / И.О.Фамилия /  
 специалист ЦСАКП по планированию / И.О.Фамилия /  
 сменный руководитель полётом / И.О.Фамилия /

Рисунок 14 – Коррекция выписки из ПЗС для ЦУП КА «Канопус-В»

Исх. №  
от 27.11.2015г.

Коррекция выписки из плана задействования средств  
для ЦУП КА "Стерх" на 27.11.2015 г.

Объект	Виток	Номер КИП	Ср-ва	Зона Р/В	Угол места	Режим работы	Примечание (Т подг.)
1	2	3	4	5	6	7	8
А-801	111	2	01	12:00:00 - 12:11:00		107, 112, 116	отклонен; Тподг = 15мин;

начальник отдела / И.О.Фамилия /  
 начальник лаборатории / И.О.Фамилия /  
 специалист ЦСАКП по планированию / И.О.Фамилия /  
 сменный руководитель полётом / И.О.Фамилия /

Рисунок 15 – Коррекция выписки из ПЗС для ЦУП КА «Стерх»

## 4.6 Выводы по четвёртой главе

1. Разработаны общие положения и постановка задачи по определению порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при оперативном и текущем планировании на основе значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА с учётом особенностей оперативного и текущего планирования.

2. Разработан алгоритм планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА, учитывающий наличие достаточных ресурсов времени свободных зон радиовидимости и свободных фрагментов зон радиовидимости для реализации запросов при возникновении спорных ситуаций по задействованию наземных средств. Для алгоритма определены условия применения, ограничения и допущения по применению, перечень взаимодействующих программ аппаратно-программного комплекса ЦСАКП, используемая и формируемая информация.

3. Разработанный алгоритм обеспечивает возможность разработки программных средств для автоматизации процесса планирования задействования наземных средств взаимодействия с КА, включая определение порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при возникновении спорных ситуаций, и, тем самым, сокращение временных затрат на принятие решений.

4. Приведено краткое описание возможности использования разработанных формальных моделей и алгоритмов при автоматизации процесса принятия решений по определению порядка задействования наземных средств взаимодействия.

5. Приведен пример определения порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами при возникновении реальной спорной ситуации по задействованию наземного средства.

6. Разработанные с учётом нормативных документов материалы могут быть использованы для разработки документации по программному обеспечению.

## Глава 5. Оценка возможности выполнения требований к принятию решений

### 5.1 Оценка возможности выполнения требований к обоснованности

Требования к обоснованности решений обеспечиваются: возможностью привлечения в состав экспертной группы не менее 7-ми и не более 20-ти квалифицированных специалистов; комплексным учётом максимально возможного для учёта количества разнообразных и взаимосвязанных факторов качественного характера; согласованностью экспертных данных (суждений каждого эксперта, мнений группы экспертов и иерархий иерархической структуры), оцениваемой значением отношения согласованности, равным не более 0,1; работой экспертов по заполнению матриц отношений, матриц сравнений, матриц уровневых связей, по оценке согласованностей экспертных данных и расчёту значений приоритетов факторов и запросов на проведение сеансов связи в соответствии с требованиями метода анализа иерархий; возможностью объяснения вариантов решений на основе экспертных данных; использованием в качестве решающего правила первоочередного обслуживания запросов с наивысшими приоритетами.

### 5.2 Оценка возможности выполнения требований к оперативности

В традиционном (существующем) варианте время  $t_1$  принятия решения можно рассчитать по формуле:

$$t_1 = t_{\text{ди}} + t_a + t_{\text{дп}} + t_{\text{ур1}}, \quad (113)$$

где  $t_{\text{ди}}$  – время доведения до руководителей полётами КА и ЛПР информации о возникших спорных ситуациях по задействованию НСВ;

$t_a$  – время анализа возникших спорных ситуаций, подготовки предложений (вариантов решения) руководителями полётов КА по разрешению возникших спорных ситуаций;

$t_{\text{дп}}$  – время доведения предложений по разрешению спорных ситуаций до ЛПР;

$t_{\text{ур1}}$  – время утверждения решения.

В зависимости от сложности возникшей спорной ситуации  $t_1$  составляет от 10 до 25-ти мин. при разрешении одной спорной ситуации.

При использовании предлагаемой методики время  $t_2$  принятия решения можно рассчитать по формуле:

$$t_2 = t_{\text{опоз}} + t_{\text{пзс}} + t_{\text{др}} + t_{\text{ур2}}, \quad (114)$$

где  $t_{\text{опзс}}$  – время определения порядка задействия средств при возникновении спорных ситуаций;

$t_{\text{пзс}}$  – время формирования плана задействия средств;

$t_{\text{др}}$  – время доведения ПЗС до лица, принимающего решения;

$t_{\text{ур2}}$  – время утверждения решения.

Экспертная оценка времени  $t_2$  составляет от 4-х до 7-ми минут независимо от количества возникших спорных ситуаций, из них:  $t_{\text{опзс}}$  – от 2-х до 3-х минут,  $t_{\text{пзс}}$  – от 10-ти до 15-ти сек.,  $t_{\text{др}}$  – до 1 мин.,  $t_{\text{ур2}}$  – от 1-ой до 2-х минут (п.4.3), что в любом случае обеспечит выполнение требования по оперативности даже в наиболее жёстком режиме – при текущем планировании ( $t_2 \leq 25$  мин. п.1.3). Из приведенных наибольшим является время определения порядка задействия средств, которое складывается из времени автоматической актуализации матриц уровневых связей, вычисления приоритетов запросов, реализация которых обусловила появление спорных ситуаций, перемещении реализации запросов с низшими приоритетами на другое время/средство. Учитывая обоснованность подготовленных решений время утверждения решения может быть меньше выше указанного.

Экономия времени относительно существующего варианта составит от 3-х до 21-ой минуты при разрешении одной спорной ситуации.

Возможность автоматизации процесса принятия решений позволит в будущем при необходимости сокращать время на принятие решений.

### 5.3 Выводы по пятой главе

1. Определены возможности выполнения требований к обоснованности принимаемых решений о порядке задействия наземных средств.

2. Экспертная прогнозная оценка времени принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами свидетельствует о возможности выполнения требований к оперативности принятия решений. Возможность автоматизации процесса принятия решений позволит в будущем при необходимости сокращать время на принятие решений.

## Заключение

В диссертации получено решение актуальной научно-технической задачи разработки методики принятия решений о порядке задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами, имеющее существенное значение для повышения качества и оперативности планирования задействования средств.

Получены следующие основные результаты.

1. Определены основные понятия, используемые при определении порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами: наземное средство взаимодействия (НСВ) с КА, спорная ситуация по задействованию НСВ, сеанс связи с КА, запрос на проведение сеанса связи с КА, приоритет запроса на проведение сеанса связи с КА.

2. На основе системного анализа существующего порядка задействования наземных средств взаимодействия с КА определены основные требования к принятию решений, выполнение которых обеспечит обоснованность и оперативность принятия решений.

3. Предложены условия, определяющие численность экспертной группы.

4. На базе метода анализа иерархий разработана методика назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА, включающая формальные модели подготовки согласованных данных и расчёта значений приоритетов запросов, позволяющие разработать программные средства для расчёта численных значений приоритетов запросов по согласованным экспертным данным. Разработан алгоритм эквивалентного преобразования иерархической структуры при объединении её элементов в группы, обеспечивающий в данном случае возможность использования матричных вычислений при расчёте значений приоритетов запросов. Существенным преимуществом методики является возможность заблаговременно выполнить наиболее трудоёмкую и ответственную работу по подготовке согласованных данных для расчёта значений приоритетов на основе обработки экспертной информации.

Новизна и практическая полезность разработанной методики подтверждена полученным патентом на изобретение.

5. Определён порядок задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами на основе приоритетов запросов с учётом особенностей различных режимов планирования задействования наземных средств, включающий алгоритм планирования, обеспечивающий совместно с разработанными формальными моделями возможность разработки программных средств, используемых при принятии решений. Новизна и практическая полезность разработанного порядка подтверждена полученным патентом на изобретение.

6. Приведена оценка возможности выполнения требований к обоснованности и оперативности принятия решений, свидетельствующие о возможности их выполнения при управлении КА. Возможность автоматизации процесса принятия решений позволит, при необходимости, в будущем сокращать время на их принятие.

7. Результаты работы используются в АО «ЦНИИмаш» при планировании задействования наземных средств взаимодействия для обеспечения управления космическими аппаратами.

Среди направлений для дальнейших исследований можно отметить доработку порядка задействования наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами с учётом прогнозируемых изменений космической и наземной обстановки.

Полученные результаты могут быть использованы для создания автоматизированной системы поддержки принятия решений, а также в качестве научно-методического задела по совершенствованию нормативно-правовой базы по планированию задействования НСВ для обеспечения управления КА.

**Перечень сокращений и условных обозначений**

АПК	- аппаратно-программный комплекс
ЗРВ	- зона радиовидимости
ИС	- иерархическая структура
КА	- космический аппарат
КИП	- командно-измерительный пункт
КИС	- командно-измерительная система
ЛПР	- лицо, принимающее решение
НАКУ	- наземный автоматизированный комплекс управления
НСЭН	- научного и социально-экономического назначения
ОГ	- орбитальная группировка
ОС	- отношение согласованности
ПЗС	- план задействования средств
РБ	- разгонный блок
РН	- ракетоноситель
ТМИ	- телеметрическая информация
НСВ	- наземное средство взаимодействия с КА
ЦУП	- Центр управления полётами
ТЦУ	- технологический цикл управления
ЦСАКП	- Центр ситуационного анализа, координации и планирования
ЭВМ	- электронно-вычислительная машина

### **Список терминов**

Наземное средство взаимодействия (НСВ) с КА – средство взаимодействия, обеспечивающее информационный обмен органов управления (ЦУП) непосредственно с объектами управления (КА) при управлении космическими аппаратами.

Спорная ситуация по задействованию НСВ – ситуация, при которой возникает необходимость задействования одного и того же средства взаимодействия с КА в одно и то же время для работы с несколькими космическими аппаратами.

Сеанс связи (СС) с КА – информационный обмен между космическим аппаратом и наземным средством взаимодействия на определённом временном интервале, сопровождающийся выдачей на борт и приёмом с борта КА различной информации.

Запрос на проведение СС с КА – совокупность сведений, определяющих параметры заказа средств взаимодействия для проведения одного сеанса связи с КА.

Приоритет запроса на проведение СС с КА – численное значение важности запроса, определяющее порядок проведения сеансов связи с КА.

### Список литературы

1. Simon H., Newell A. Heuristic Problem Solving: The Next Advance in Operations Research. – Reprinted from Operations Research, vol. 6, No, Jan. – Feb., 1958.
2. Марцынковский Д.А., Владимирцев А.В., Марцынковский О.А. Руководство по риск-менеджменту. Ассоциация по сертификации «Русский Регистр» – Санкт-Петербург: Береста, 2007. – 330 с.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М: Радио и связь, 1993. – 320 с.
4. Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений. – М.: Знание, 1985. – 32 с. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. – Математика, кибернетика; № 10).
5. НТО № 851-0304/16/79 -5-1111-69/18. Системный проект по проблемным вопросам обеспечения космической деятельности. Сводный том. НИР «Вертикаль-Основа». Госконтракт № 851-0304/16/79 от 17.08.2016. ФГУП ЦНИИмаш, г. Королёв, 2018. – 241 с.
6. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: Учебник. – М.: Логос, 2000. – 296 с.: ил.
7. Дудко А. Н., Кучеров Б. А., Литвиненко А. О., Сохранный Е.П. Метод повышения оперативности задействования средств управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. «Космонавтика и ракетостроение», №1(86), 2016, с. 103-109.
8. Литвиненко А.О., Дудко А. Н. Применение метода ситуационного анализа при оперативном планировании задействования ТСУ НАКУ. VII научно-техническая конференция Центра управления полётами. ЦНИИмаш, 2017, с.277-284.
9. Поливников В. М. Распределение наземных средств управления космическими аппаратами методом последовательного исключения спорных

ситуаций. VII научно-техническая конференция Центра управления полётами. ЦНИИмаш, 2017, с.292-296.

10. Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Овечко В.М. Методологические подходы к решению проблем управления крупномасштабными группировками космических аппаратов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 2. URL:<http://engjournal/arise/adb/1463.html>.

11. Литвиненко А.О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления. – Труды МАИ, 2016, №86, URL:<http://www.mai.ru/science/trudy/hublished.php?ID=67829>.

12. Колпин М.А., Проценко П.А., Слащев А.В. Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами. // Труды МАИ, 2017, № 92, URL:<http://www.mai.ru/science/trudy/hublished.php?ID=77448>.

13. Патент 2175464 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 7/26. Способ назначения приоритетов запросам на переключение канала в системе подвижной связи / Парк Дзин-Соо (KR); заявитель и патентообладатель САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС КО., ЛТД. (KR), патентный поверенный Емельянов Е.И. – № 2000107891/09; заявл. 31.07.99; опубл. 27.10.01, Бюл. № 30.

14. Патент 2476026, Российская Федерация, МПК7 Н 04 W 72/12. Способ и устройство для назначения приоритетов логическим каналам / Саммур Мохаммед (СА), Терри Стефан Э. (US), Ван Цзинь (US), Олвера-Эрнандес Юлизис (СА); патентообладатель ИНТЕРДИДЖИТАЛ ПЕЙТЕНТ ХОЛДИНГЗ, ИНК (US). – № 2010136659/07; заявл. 27.01.09; опубл. 20.02.13, Бюл. № 5.

15. Патент 2491611 Российская Федерация, МПК7 G 06 F 7/00, G 06 F 21/56. Система и способ адаптивной приоритизации объектов антивирусной проверки / Зайцев О.В. (RU); патентообладатель Закрытое акционерное общество «Лаборатория Касперского (RU). – № 2011148294/08; заявл. 29.11.11; опубл. 27.07.13, Бюл. № 24.

16. Сохранный Е.П. Способы решения основных проблемных вопросов разрешения спорных ситуаций по задействованию наземных средств управления космическими аппаратами. Труды МАИ. 2019, № 108, URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/hublished.php?ID=109228>.

17. Дудко А.Н., Золотарёв А.Н., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод оптимальной организации обработки заявок на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. «Космонавтика и ракетостроение», №4(65), 2011, с. 84-91.

18. Дудко А.Н., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Использование метода ситуационного анализа при планировании задействования ТСУ НАКУ с целью обеспечения управления ОГ КА НСЭН. «Космонавтика и ракетостроение», №4(69), 2012, с. 128-141.

19. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов. «Космонавтика и ракетостроение», №1(74), 2014, с. 155-163.

20. Сохранный Е.П. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами. «Лесной вестник», №4, 2019, том 23, с. 98-105.

21. Золотарёв А.Н., Сохранный Е.П. О центре ситуационного анализа, координации и планирования работы средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. «Космонавтика и ракетостроение», №1(62), 2011, с.162 – 171.

22. Сохранный Е.П. Подготовка данных и расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Труды МАИ. 2020, № 111, URL:<http://www.mai.ru/science/trudy/hublished.php?ID=115156>.

23. Вороновский В.В., Дудко А.Н., Матюшин М.М., Сохранный Е.П., Усиков С.Б., Сохранная А.Е. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Формирование иерархической структуры исходных данных. «Космонавтика и ракетостроение», №1 (100), 2018, с 89-99.

24. Патент 2566171 Российская Федерация, МПК7 В 64 G 3/00. Способ разрешения конфликтных ситуаций при управлении полётами космических аппаратов /Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Овечко В.М., Паздников В.Ю., Сохранный Е.П. (РФ); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш). – № 2014101209/11; заявл. 16.01.14; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29.

25. Патент 2659773 Российская Федерация, МПК7 В 64 G 9/00. Способ назначения приоритетов запросам на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения/ Вороновский В.В., Дудко А.Н., Кулик М.С, Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Паздников В.Ю., Соловьёва Л.Ю., Сохранный Е.П., Усиков С.Б., Хроменков А.С. (РФ): заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». – № 2017138950; заявл. 09.11.17; опубл. 03.07.18, Бюл. № 19.

26. Кучеров Б.А., Сохранный Е.П., Дроздова Е.В., Романюгин Д.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611192. Программный комплекс информационного обмена центра ситуационного анализа, координации и планирования с абонентами. 2010 г.

27. Кучеров Б.А., Сохранный Е.П., Дроздова Е.В., Романюгин Д.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611191. Программный комплекс оперативного планирования задействования

средств наземного автоматизированного комплекса управления космическим аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. 2010 г.

28. Почукаев В.Н. Основные концептуальные положения баллистико-навигационного обеспечения полётов автоматических космических аппаратов. – М: Машиностроение-Полёт, 2018. – 155 с.

29. Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ от 19 апреля 2013 г. N Пр-906). URL:<https://legalacts.ru/doc/osnovnye-polozhenija-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/>

30. Временное положение по взаимодействию ЦСАКП с абонентами при оперативном планировании применения средств НАКУ КА НСЭН и измерений (первая очередь). ФГУП ЦНИИмаш, 2009. – 71 с.

31. Концепция развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений на период до 2025 года. Федеральное космическое агентство, 2013г. – 22 с.

32. Приказ № 5 от 30 января 2006 года «О работах по созданию в ЦУП ЦНИИмаш Центра ситуационного анализа, координации и планирования работ Гражданской компоненты Единого ГосНАКУ КА и измерений». Федеральное космическое агентство, 2006г.

33. Приказ №195 от 14 декабря 2009 года «О наземном автоматизированном комплексе управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений (первая очередь)». Федеральное космическое агентство, 2009г.

34. Кучеров Б.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015610757. Программа ведения базы данных по состоянию средств

наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений v.2.0. 2015г.

35. Кучеров Б.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615318. Программа отображения в табличном виде информации о состоянии средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. 2011г.

36. Кучеров Б.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615264. Программа отображения информации о состоянии орбитальной группировки космических аппаратов научного и социально-экономического назначения. 2011г.

37. Тертычный А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615259. Программа ведения базы данных по состоянию орбитальной группировки космических аппаратов научного и социально-экономического назначения. 2011г.

38. Тертычный А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615339. Программа статистической обработки данных по планированию задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. 2011г.

39. Тертычный А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615316. Программа статистической обработки данных о работе бортовой аппаратуры. 2011г.

40. Тертычный А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615315. Программа статистической обработки данных о работе средств мультисервисной системы связи и передачи данных. 2011г.

41. Тертычный А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011615341. Программа статистической обработки данных о работе

средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. 2011г.

42. Кучеров Б.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615310. Программа оперативного отображения процесса выполнения плана задействования средств автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. 2011г.

43. Лазарев А. А. Алгоритмы в теории расписаний, основанные на необходимых условиях оптимальности. Исследования по прикладной математике. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 1984, вып. 10, с. 102-110.

44. Гурин Л. С., Дымарский Я. С., Меркулов А. Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. –М: Советское радио, 1968. – 463 с.

45. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложение. М: Мир, 1965. – 302 с.

46. Алексахина А. А., Дудко А. Н., Кучеров Б. А., Литвиненко А. О., Хроменков А. С. Метод превентивного разрешения спорных ситуаций при планировании задействования средств управления космическими аппаратами. «Космонавтика и ракетостроение», № 2(95), 2017, с. 46-54.

47. Алексахина А. А., Кучеров Б. А., Хроменков А. С. Использование существующих и перспективных информационных технологий при планировании задействования средств управления космическими аппаратами. «Космонавтика и ракетостроение», № 6(91), 2016, с. 140-148.

48. Кучеров Б.А. Перспективные направления использования информационных технологий при планировании задействования средств управления космическими аппаратами. Сборник статей VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов центра управления полётами, ЦНИИмаш, 2017, с. 284-292.

49. Кучеров Б.А. Система визуального и звукового оповещения в управлении группировкой космических аппаратов. // Прикладная информатика, 2014, №5(53), с. 25-32.

50. Хроменков А.С. Перспективы внедрения системы электронной подписи при информационном обмене в процессе планирования применения ТСУ НАКУ. Сборник статей VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов центра управления полётами, ЦНИИмаш, 2017, с. 453-459.

51. Федеральная космическая программа России на 2016-2025 годы. (Утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 23 марта 2016г. № 230).

52. Временное положение о наземном автоматизированном комплексе управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений (первая очередь). Федеральное космическое агентство. 2009. – 47 с.

53. Протокол информационного обмена между ЦСАКП и БЦУП КС «Ресурс-П», ФГУП ЦНИИмаш, 2016. – 38 с.

54. Протокол информационного взаимодействия ЦУП КА «Канопус-В» с ЦСАКП, ФГУП ЦНИИмаш, 2015. – 48 с.

55. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., А.А. Кукушкин. Под ред. А.А. Емельянова. Системный анализ в управлении: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

56. Максимов А. М., Райкунов Г. Г., Шучев В. Г. Научно-технические проблемы развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. «Космонавтика и ракетостроение», № 4 (65), 2011, с. 5-12.

57. Бобронников В.Т. Системный анализ в инженерных исследованиях: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 144 с.: ил.

58. Миллер Дж. А. Магическое число семь плюс минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию. Инженерная психология. М.: Прогресс, 1964.

59. Simon H A/ How big is a chunk. Science. 1974.

60. Менеджмент качества на современном предприятии. Под редакцией А.В. Владимирцева. – СПб.: Издание Ассоциации по сертификации «Русский Регистр», 2003. – 422 с.

61. Системно-технический анализ и исследование методического, программно-алгоритмического и аппаратного обеспечения многообъектовой автоматизированной системы оперативного управления полётами разнородных космических аппаратов научного и народно-хозяйственного назначения из единого ЦУП НАКУ НХ. НТО №10775. НЭР «НАКУ-НХ». – г. Калининград М.О., ЦНИИмаш, 1993.

62. Блягоз З.У., Попова А.Ю. Принятие решений в условиях риска и неопределённости // Вестник Адыгейского государственного университета. – 2008. - № 4. – С. 164-168.

63. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессивного анализа. Руководство для экономистов. Перевод с немецкого и предисловие В.М. Ивановой. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.

64. Создание наземного комплекса управления российско-белорусского КА ДЗЗ и КС на его основе (Шифр СЧ ОКР РБКС/НКУ). Эскизный проект. Пояснительная записка. Часть 1. Наземный комплекс управления российско-белорусского КА ДЗЗ и КС на его основе. ИВЯФ.461214.139 ПЗ. – АО «Российские космические системы», 2019. – 138 с.

65. Орлов А.И. Экспертные оценки. – Журнал «Заводская лаборатория». 1996. Т.62, No.1, с.54-60.

66. Шведенко В.Н., Староверова Н.А. Методы повышения точности расчёта компонентов вектора приоритетов иерархической системы альтернатив при проведении экспертных оценок. // Вестник ИГЭУ. 2009, вып.3 – с.93-95.

67. Огурцов А.Н., Староверова Н.А. Алгоритм повышения согласованности экспертных оценок в методе анализа иерархий // Вестник ИГЭУ, № 5, 2013, с.81-84.

68. Степанов В.Р. Основы теории принятия решений. Экспериментальное учебное пособие. – Чебоксары: Клио, 2004. – 134 с.

69. G.Dantzig. Number the Language of Science. The Macmillan Company, New York, 3 rd ed., 1939.

70. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. RACSAM. September 2008, Volume 102, Issue 2, pp 251-318 (Относительные измерения и их обобщение при принятии решений. Центральное место парных сравнений в математике при измерении неколичественных факторов в методе анализа иерархий/нейросетевых методах анализа).

71. Киреев В.С. Метод анализа иерархий Саати в системе оценки инновационности образовательных проектов. Московский инженерно-физический институт (государственный университет). – Программные продукты и системы, №4, 2011, с.188-190.

72. Медянкина И.П., Бобров Л.К. Метод анализа иерархий как инструмент выбора электронно-библиотечной системы // Научные и технические библиотеки, №4, 2015, с.5-14.

73. Резниченко О.С., Применение метода анализа иерархий для решения бизнес-задач многокритериального выбора/О.С. Резниченко, В.Г. Салина // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения, №2, 2013, с.43-47.

74. Винокуров А.С., Баженов Р.И. Использование метода анализа иерархий для принятия оптимального решения по выбору цифрового

фотоаппарата//Современная техника и технологии. №9, 2014 [Электронный ресурс]  
URL:<http://technology.snauka.ru/2014/09/4438>.

75. Цибизова Т.Ю., Карпунин А.А. Применение метода анализа иерархий в оценке качества процессов управления//Современные проблемы науки и образования. №2-1, 2015, URL:[www.science-education.ru/ru/article/view?id=20847](http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20847).

76. Кашеварова Н.А. Применение метода анализа иерархий для оценки значимости технических ноу-хау.//Инженерный журнал: наука и инновации, 2014, вып.4. URL:<http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1214.html>.

77. Принципы и методы информационно-библиотечного обеспечения учебного процесса в системе дистанционного образования: диссертация ... кандидата технических наук: 05.25.05 / Медянкина Ирина Петровна. – Москва, 2012. – 207 с.: ил.

78. Разработка организационно-экономического механизма перспективных патентных исследований на предприятиях космической отрасли: диссертация ... кандидата экономических наук: 08.00.05 / Кашеварова Наталия Александровна. – Москва, 2018. – 141 с.

79. Кацман В.Е., Косорукова И.В., Родин А.Ю., Харитонов С.В. Основы оценочной деятельности. – Московский финансово-промышленный университет «Синергия», 2012. – 336 с.

80. Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. — М.: Наука, 1976. – 736 с.

81. Денисова А.Л., Зайцев Е.В. Теория и практика экспертной оценки товаров и услуг: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – 72 с.

82. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.:Наука, 1970. – 194 с.

83. Петерс Д., Хайес Дж., Хифтье Г. Химическое разделение и измерение. – М.: Химия, 1978. – 816 с.

84. ГОСТ 19.701-90 (ИСО 58007-80). Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. Единая система программной документации. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 22 с.

85. ГОСТ 24.211-82. Требования к содержанию документа «Описание алгоритма». Единая система стандартов автоматизированной системы управления. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 5 с.

86. ГОСТ 24.301-80. Общие требования к выполнению текстовых документов. Система технической документации на АСУ. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 6 с.

87. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 5-е изд. – М.: Физматлит, 2004. – 560 с. – ISBN 5-9221-0524-8.