

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Санкт-петербургский Федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук»  
(СПб ФИЦ РАН)

На правах рукописи



**УШАКОВ Виталий Анатольевич**

**КОМБИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность – 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Заслуженный деятель науки РФ,  
Лауреат премии правительства РФ  
в области науки и техники,  
доктор технических наук, профессор  
**СОКОЛОВ Борис Владимирович**

Санкт-Петербург – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ И ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	21
1.1 Анализ современного состояния исследований в области решения задач планирования информационных процессов при функционировании подвижных объектов.....	21
1.2 Концептуальная модель информационного взаимодействия подвижных объектов.....	27
1.3 Содержательная постановка задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов .....	34
1.4 Формальная постановка задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов .....	36
1.5 Анализ и обоснование возможных путей решения сформулированной задачи .....	44
1.6 Методологические и методические основы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов .....	46
1.7 Выводы по главе 1 .....	49
2 ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	51
2.1 Уточненная постановка задачи оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов .....	51
2.2 Статическая модель планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов.....	53
2.3 Динамическая модель планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов .....	58

2.4	Особенности межмодельного согласования при планировании информационных процессов с использованием статической и динамической моделей .....	69
2.5	Выводы по главе 2 .....	70
3	КОМБИНИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	73
3.1	Алгоритм планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов с использованием статической модели.	74
3.2	Алгоритм поиска программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов с использованием динамической модели .....	75
3.3	Алгоритмы оценивания робастности планов информационного взаимодействия группировки подвижных объектов .....	77
3.4	Обобщенная процедура планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов с использованием комбинированных моделей .....	85
3.5	Выводы по главе 3 .....	87
4	ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	90
4.1	Обоснование требований, предъявляемых к облику прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии подвижных объектов ..	90
4.2	Программная реализация прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения, описание его спецификации и модулей .....	92
4.3	Решение задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки маломассоразмерных космических аппаратов .....	101

4.4	Решение задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки наземных транспортно-технологических средств в цифровом пространстве аэропорта .....	113
4.5	Рекомендации по дальнейшему практическому использованию разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения и его программного прототипа при решении задач программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов ...	127
4.6	Выводы по главе 4 .....	129
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	134
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	138
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
	СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА .....	162
	СПИСОК ТАБЛИЦ.....	165
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Список основных публикаций соискателя по теме диссертации.....	166
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Копии актов реализации .....	170
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Описание процедуры оптимизации в рамках прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения .....	176
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Результаты расчетов для группировки интеллектуальных транспортно-технологических средств.....	178

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время широкое применение на практике получили различные виды и классы подвижных объектов, в качестве которых могут рассматриваться космические аппараты [42], летательные аппараты [10,19], в том числе и беспилотные летательные аппараты [103], наземные робототехнические комплексы, морские подвижные объекты (как надводные, так и подводные) робототехнические комплексы [156] и так далее. Они, как правило, для выполнения поставленных целевых задач объединяются в группировки, так как информационно-технологические возможности каждого отдельного подвижного объекта весьма ограничены.

Развитие подвижных объектов, функционирование которых связано с обработкой и передачей больших объемов данных, информации и знаний, приводит к необходимости использования в контуре управления таких систем специального подмножества подвижных элементов, обеспечивающих периодический мониторинг состояния заданного класса контролируемых объектов, а также непосредственную передачу полученных данных и информации через соответствующие подвижные объекты, входящих в состав конкретной группировки, а также доставку обработанных данных и информации конечным потребителям. Рассматриваемые процессы приводят, как правило, к увеличению информационной и энергетической нагрузки на элементы группировки, компенсация которой осуществляется за счет непрерывной структурно-функциональной адаптации технологий и программ функционирования группировки подвижных объектов к изменениям внешней среды. В указанных условиях существенно повышаются требования к качеству управления функционированием как отдельными подвижными объектами, так и в целом группировкой подвижных объектов.

В качестве примеров таких группировок в диссертации будут рассматриваться несколько вариантов объединения подвижных объектов, а именно группировка маломассогабаритных космических аппаратов и группировка интеллектуальных транспортно-технических средств. При этом подвижные

объекты, входящие в данные группировки, имеют в своем составе аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие информационное взаимодействие подвижных объектов друг с другом, в ходе которого указанные объекты получают данные (информацию) о состоянии контролируемых объектов, принимают (ретранслируют), хранят, обрабатывают их на своих вычислительных средствах, входящих в состав аппаратно-программного комплекса, а также передают их конечному потребителю. Анализ показывает, что структура и параметры такой группировки изменяются как из-за движения подвижных объектов, так и из-за необходимости выполнения определенных пространственно-временных, технических и технологических ограничений, а также воздействия ряда внутренних и внешних возмущающих факторов.

Наблюдаемая **структурная динамика группировки подвижных объектов** придает особую актуальность постановки и решения не только задач планирования и управления перемещением подвижных объектов, но и задачи управления информационными процессами, включающими в себя процессы сбора, хранения, обработки и передачи информации как о состоянии самой группировки, образованной данными объектами, так и состояния наземных объектов, наблюдение за которыми осуществляет данная группировка. При этом, возрастает важность решения двух взаимосвязанных подклассов задач управления информационными процессами. Это, во-первых, задача синтеза (выбора, оптимизации) наилучшей технологии организации информационных процессов для рассматриваемой группировки при условии, что известна ее структурная динамика (решены задачи согласованного (кооперативного) движения подвижных объектов) и, во-вторых, задача программного управления (планирования) информационными процессами для синтезированной технологии управления указанными процессами. Данные задачи можно отнести к классу задач оперативного многокритериального выбора технологий и программ управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов в составе заданной группировки [110,131,176].

**Степень разработанности темы.** Проведенный анализ показал, что к настоящему времени интересные научные и практические результаты были получены в следующих направлениях исследований задач структурно-функционального синтеза: «выбор технической структуры подвижных объектов при известных законах функционирования основных элементов и подсистем [84,104,176,182]; оптимизация функциональной структуры подвижных объектов или синтез программ управления ими при известной технической структуре [37,38,66,104,158]; параллельный полиструктурный синтез подвижных объектов» [51,64,84,176].

На сегодняшний день разработано множество специальных методов, алгоритмов и прикладных методик [41,43,75,76,77,80,148] для решения задач, которые возникали на практике при управлении подвижными объектами. Существенные научные и практические результаты в рамках перечисленных направлений исследований были получены на базе развития теории расписаний и математического программирования, оптимального управления такими отечественными учеными как Ю.П. Зимин, И.Н. Иванилов, А.Я. Лернер, Н.Н. Моисеев, В.С. Танаев, В.С. Шкурба [75,76,106,107,160]. Зарубежные ученые: Р.Л. Акофф, М. Атанс, Т. Басар, Р. Беллман, А. Брайсон, Дж.Л. Кохон, Д.Д. Силяк, М. Сингх, Г. Олсдер, А. Титли, П. Фалб [1,2,5,24,25,37,38,39,43], также внесли свой вклад в рассматриваемое направление. Несмотря на масштабность выполненных исследований и количество публикаций, в представленных выше работах, к сожалению, недостаточное внимание было уделено вопросам создания методов и алгоритмов, позволяющих корректно формально описывать и исследовать на различных уровнях детализации (например, концептуальном, алгоритмическом, программном уровнях) информационное взаимовлияние элементов и подсистем друг на друга в рамках рассматриваемых объектов управления. При этом предлагаемые в перечисленных работах подходы были направлены на поиск частных решений задач планирования отдельных операций, входящих в состав информационных процессов в подвижных объектах (например, операций сбора и передачи данных, операций обработки данных и т.п.).

Таким образом, анализ выполненных научных работ показал частный характер полученных результатов и отсутствие разработок в области создания комбинированных моделей, методов и алгоритмов выбора технологий и программ управления информационными процессами.

Очевидно, что решить задачу синтеза технологии и программ управления информационными процессами невозможно без опоры на принципы и методы системного анализа и комплексного моделирования [3,154,161]. Данными вопросами занимались многие известные российские и иностранные ученые: Н.П. Бусленко, С.А. Долбановский, В.В. Калашников, В.Н. Калинин, Дж. Клир, Б. Куо, Д. Мако, М. Месарович, Н.Н. Моисеев, Ф.И. Перегудов, Д. Табак, Я. Такахара, А.Д. Цвиркун, У.Р. Эшби и другие [64,84,104,106,107,124,158,177,178,182].

Их работу продолжили такие отечественные ученые как С.В. Емельянов, С.В. Микони, Ю.И. Рыжиков, Б.В. Соколов, Ф.П. Тарасенко, Р.М. Юсупов и другие исследователи [105,120,124,161,183], которые развили и расширили основы теории КМ. Среди них можно выделить подходы, базирующиеся на методах общей и прикладной теории оптимального управления, предложенные М. Атансом, Р. Беллманом, В.Н. Калининим, Б.А. Резниковым, П. Фалбом и др. [37,38,39,80]. Развитию перечисленных моделей и методов [68,69,70,72,85,108,109,111,122,146,148] применительно к решению задач управления информационными процессами посвящено данное диссертационное исследование.

Следует подчеркнуть, что в предыдущих научных исследованиях была обоснована необходимость дальнейшего развития основ многокритериального оперативного синтеза не только технологий, но и программного управления [69,129,131]. Это особенно важно при наблюдаемом бурном росте сложности используемых, внедряемых и развиваемых интеллектуальных информационных систем поддержки принятия решений [93,131]. Данные системы широко используются в бортовых системах управления различных классов сложных динамических объектов, к которым, в частности, относятся рассматриваемые в



диссертации подвижные объекты. Таким образом, **научно-техническая задача** разработки комбинированных моделей и алгоритмов планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, которую как будет показано далее, из-за большой размерности и структурной сложности целесообразно декомпозировать на задачи синтеза технологий (планов) сбора, хранения и обработки данных и программного управления информационными процессами. Данная задача в настоящее время приобретает особую **научную важность и практическую значимость**, так как при ее математическом описании и последующем решении в рамках традиционных подходов, базирующихся на методах, моделях, алгоритмах, используемых в исследовании операций, возникают непреодолимые трудности формального и вычислительного характера. В диссертационной работе для проведения обоснованной декомпозиции решаемых группировкой подвижных объектов задач по управлению информационными процессами, связанными с мониторингом и прогнозированием состояния контролируемых объектов, предложено разработать и комбинированно использовать статическую и динамическую модели, описывающие рассматриваемую предметную область, а также соответствующие алгоритмы, позволяющие синтезировать планы функционирования указанных объектов.

**Цель диссертационной работы** состоит в повышении качества управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов, на основе разработки и реализации комбинированных моделей и алгоритмов планирования операций приема, передачи, хранения и обработки поступающих данных о состоянии контролируемых объектов.

В диссертации основными показателями качества управления информационными процессами являются показатель общего объема обработанных (потерянных) данных и информации, показатель, характеризующий суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения заданных операций, входящих в информационный процесс, показатель, характеризующий робастность (нечувствительность) синтезированных планов выполнения информационных

процессов при взаимодействии подвижных объектов для интервально заданных возмущающих воздействий.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

– провести системный анализ современного состояния исследований в области информационного взаимодействия группировки подвижных объектов, разработать методологические и методические основы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов и провести содержательную и формальную постановки задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов;

– провести полимодельное описание задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов и разработать обобщенные алгоритмы ее решения;

– разработать и исследовать специальное модельно-алгоритмическое обеспечение и соответствующий прототип программы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов для различных предметных областей.

**Объектом исследования** являются информационные процессы, происходящие при взаимодействии группировки подвижных объектов.

**Предметом исследований** являются комбинированные модели и алгоритмы, оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов.

**Научная новизна** результатов, полученных при решении поставленных задач, состоит в следующем:

1. На основе анализа структурных особенностей задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, которая в диссертации сформулирована как большеразмерная нестационарная многокритериальная задача теории расписаний и описана в терминах теории оптимального программного управления, предложена ее

последовательная декомпозиция на задачу агрегированного планирования операций, входящих в информационный процесс без привязки их ко времени и задачу детального планирования указанных операций с привязкой ко времени. Достоинство данной декомпозиции состоит в том, что при ее реализации с использованием соответствующих моделей и алгоритмов удается на конструктивном уровне учесть все основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с функционированием группировки подвижных объектов, при формальном описании которых в рамках исходной постановки задачи возникают трудности.

2. Разработан новый вариант интеграции статических и динамических моделей планирования информационных процессов на основе использования математического аппарата исследования операций [50,88] и теории оптимального управления. Оригинальность и новизна разработанных моделей состоит в том, что удается взаимно компенсировать недостатки и ограничения каждой из перечисленных моделей, усилив при этом их достоинства. Так в предложенной статической модели планирования информационных процессов просто учитываются такие факторы, как потери данных, а также ограничения, связанные с разрывностью выполняемых операций. В динамической модели проводится детальное описание процессов распределения и обработки данных с привязкой к конкретным моментам времени, что затруднительно описать в статической модели. [168]
3. Предложены комбинированные алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, включающие в себя алгоритм решения большеразмерной задачи линейного программирования с ограничениями, имеющими блочно-диагональную структуру, а также алгоритм, решения задачи оптимального программного управления (планирования). Данные алгоритмы базируются на методе последовательных приближений Крылова-Черноусько и отличаются возможностью декомпозиции исходной большеразмерной задачи планирования

информационных процессов по числу подынтервалов постоянства структуры, а также возможностью описать взаимодействие между этими декомпозированными задачами (моделями) на основе обобщенной интерактивной многоэтапной итерационной процедуры, в которой в качестве параметров координации используются краевые условия и сопряженные переменные.

4. Разработан программный прототип специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, позволяющий в отличие от существующих программ планирования осуществлять одновременно синтез как наилучшего плана (технологии) приема, передачи, хранения и обработки данных и информации при взаимодействии подвижных объектов, так и программ оптимального управления информационными процессами в рамках рассматриваемого взаимодействия.

В целом **научная новизна** результатов, полученных в диссертации, состоит в разработке полимодельного описания и комбинированных алгоритмов решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, при использовании которых происходит, во-первых, эффективная взаимная компенсация недостатков и ограничений свойственных каждой из предложенных статической и динамической моделей и соответствующих алгоритмов поиска программ управления информационными процессами, по сравнению с вариантами, если их использовать независимо, и, во-вторых, максимальное использование возможностей данных моделей и алгоритмов при синтезе соответствующих планов. Также осуществлена практическая реализация концепции комплексного (системного) моделирования при решении задач оперативного оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов в различных предметных областях, которая подтвердила положительный интегративный эффект от комбинированного использования разнотипных моделей.

**Теоретическая значимость работы** заключается в новой системно-кибернетической интерпретации решаемой в диссертации задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, базирующейся на фундаментальных и прикладных результатах, полученных в теории оптимального управления и исследовании операций, и с использованием которой удалось разработать комбинированный математический аппарат для решения сложной большеразмерной, нестационарной, многокритериальной задачи теории расписаний в условиях интервально заданных возмущающих воздействий.

**Практическая значимость работы** заключается в повышении качества управления операциями приема, ретрансляции, хранения и обработки данных и информации при взаимодействии группировки подвижных объектов на основе автоматизации и оптимизации решения задачи оперативного планирования рассматриваемых информационных процессов. При этом в качестве основных показателей эффективности управления информационными процессами в диссертации выбраны показатели общего объема обработанных и потерянных данных и информации. Практическая реализация концепции комплексного (системного) моделирования осуществлена при решении задач оперативного оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов в различных предметных областях, которая подтвердила положительный интегративный эффект от комбинированного использования разнотипных моделей.

**Методология и методы диссертационного исследования** базируются на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных к настоящему моменту времени в системном анализе, в теории расписаний, в современной теории оптимального управления СДО (в том числе, с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина), в исследовании операций (в том числе, методах непрерывного и целочисленного математического программирования), а также в теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов (в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов).

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1 Последовательная декомпозиция большеразмерной нестационарной многокритериальной задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, обеспечивающая ее разбиение на задачу агрегированного планирования операций, входящих в информационный процесс без привязки их ко времени и задачу детального планирования указанных операций с привязкой ко времени.;
- 2 Полиmodelное описание задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, включающее статическую и динамическую модели планирования и позволяющее взаимно компенсировать недостатки и ограничения каждой из перечисленных моделей и усилить их достоинства;
- 3 Алгоритмы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов на основе комбинированного использования методов исследования операций и оптимального программного управления при синтезе планов, а также программ управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов.

**Соответствие диссертации научной специальности.** Представленные результаты соответствуют специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

**Степень достоверности и обоснованности научных положений** подтверждаются следующим:

— проведен всесторонний анализ отечественных и зарубежных публикаций в рамках исследуемой предметной области и при решении задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов;

— выполнен обзор российских и иностранных публикаций в рамках исследуемой предметной области;

— корректность результатов решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов подтверждается применением математического аппарата исследования операций и современной теории оптимального управления;

— в ходе участия в значительном количестве профильных конференций выполнена всесторонняя апробация диссертационного исследования;

— полученные результаты в ходе диссертационного исследования согласуются с результатами, полученными с применением альтернативных моделей.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы были использованы в СПб ФИЦ РАН в рамках следующих проектов и НИР:

— государственное задание СПИИРАН 0073-2018-0003 на проведение НИР по теме: «Методология и технологии интеграции существующих и перспективных государственных и коммерческих информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла» (2018 год);

— государственное задание СПИИРАН 0073-2019-0004 на проведение НИР по теме: «Методология и технологии интеграции существующих и перспективных государственных и коммерческих информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла» (2019-2021 годы);

— грант РФФИ «Аспиранты» в рамках научного проекта № 19-38-90221 «Разработка и исследование методов и алгоритмов оперативного многокритериального оценивания и анализа показателей качества автоматизированной системы управления подвижными объектами на основе построения областей достижимости в пространстве системотехнических параметров» (2019-2022 годы);

— грант РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01505 «Разработка и исследование методов и алгоритмов проактивного управления восстановлением

работоспособности бортовых систем сложных динамических объектов при возникновении нештатных ситуаций» (2020 г.);

— грант РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01046 «Комбинированные методы и алгоритмы комплексного моделирования, многокритериального оценивания и оптимизации показателей живучести и эффективности функционирования сложных объектов, обладающих структурно-функциональной избыточностью» (2021 г.);

— в АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «ПЕТРОКОМЕТА» в ОКР «Русь» при создании единого виртуального электронного паспорта космической ракеты-носителя (ЕВЭП КРН);

— в учебном процессе в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП).

**Апробация результатов.** Основные результаты данной диссертационной работы были представлены и получили положительную оценку (апробированы) на нескольких международных и всероссийских конференциях, среди которых:

— 8th Computer Science On-line Conference 2019 (CSOC-2019), онлайн, Злин, Чехия, 24-27 апреля 2019 г.;

— XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019), посвященное 80-летию Института проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), ИПУ РАН, Москва, Россия, 17-20 июня 2019 г.;

— 9th Computer Science On-line Conference 2020 (CSOC-2020), онлайн, Злин, Чехия, 23-26 апреля 2020 г.;

— the European Modeling and Simulation Symposium 2020 (EMSS-2020) в рамках International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference (I3M), онлайн, Греция, 16-18 сентября 2020 г.;

— научный семинар «Модели и методы исследования информационных систем на транспорте» на базе кафедр «Информационные и вычислительные



системы» и «Высшая математика», ПГУПС (онлайн), Санкт-Петербург, Россия, 11-12 ноября 2020 г.;

— XLV Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства «КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ», МГТУ им. Н.Э. Баумана (онлайн), Москва, Россия, 30 марта – 02 апреля 2021;

— XII молодежная школа-семинар «Управление и обработка информации в технических системах» в рамках XVI Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», Южный федеральный университет (онлайн), п. Нижний Архыз – п. Домбай, Карачаево-Черкесская Республика, Россия, 05-09 апреля 2021 г.;

— XXV международная научная и учебно-практическая конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» (SAEC-2021), СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия, 13-14 октября 2021 г.;

— международный форум «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве», ГУАП, Санкт-Петербург, Россия, 10-11 ноября 2021 г.;

— IV международный семинар по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред, ИДСТУ СО РАН, Иркутск, Россия, 4-8 июля 2022 г.;

— 8-я Международная Научно-практическая конференция «Технологическая перспектива: новые рынки и точки экономического роста», СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, 10-11 ноября 2022 г.

**Личный вклад соискателя** в опубликованных работах отражают содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту. Публикация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем Б.В. Соколовым и членами лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПб ФИЦ РАН, причем вклад соискателя был существенным. Представленные к защите результаты получены лично автором. В [110] соискателем было предложено использовать статическую

модель планирования информационных процессов совместно с агентной моделью для решения задач синтеза оптимального информационно-вычислительного процесса в гетерогенной информационно-вычислительной сети. В [93] соискателем были предложены методологические основы создания и использования интегрированных систем поддержки принятия решений. В [72] соискатель принимал участие в составлении формальной постановки задачи и разработке неформальной декомпозиции задачи планирования модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах и в форме электронного издания, среди них пять работ в рецензируемых журналах из «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» и 5 работ индексируются в SCOPUS/WoS. В состав публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК вошли: публикация в журнале «Морские интеллектуальные технологии» (2022 г.), публикация в журнале «Авиакосмическое приборостроение» (2022 г.) и три публикации в разных номерах журнала «Известия высших учебных заведений. Приборостроение» (2019, 2020, 2021 гг.).

**Структура и объем работы.** Основной текст диссертации изложен на 181 листах, включая 5 таблиц, 42 рисунка, и содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений, список иллюстративного материала, список таблиц, 4 приложения и список литературы (184 наименований).

**Краткое содержание работы.** Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, проанализирована степень разработанности темы, сформулированы цели, задачи, методы и методология исследования, научная новизна результатов, представлены положения, выносимые на защиту, сведения о реализации и апробации работы, сформулированы теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в диссертации, приведены основные результаты работы.

**В первой главе** проведен системный анализ задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Описана концептуальная модель информационного взаимодействия подвижных объектов. Представлены содержательная и формальная постановки задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов и ее декомпозиция. Разработаны методические и методологические основы решения задачи планирования информационных процессов. Проведен анализ возможных путей решения сформулированной задачи, обоснованы и выбраны направления ее исследования и решения.

**Во второй главе** приведена уточненная постановка поставленной задачи, представлено полимодельное описание задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов. В состав полимодельного описания входят статическая модель планирования информационного взаимодействия подвижных объектов и динамическая модель планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Кроме того, в данной главе описаны и проанализированы особенности межмодельного согласования при планировании информационных процессов.

**В третьей главе** описаны разработанные (модифицированные) диссертантом комбинированные алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, включающие в себя алгоритмы синтеза плана (технологии) сбора и обработки данных, получаемых группировкой подвижных объектов с использованием статической модели, а также программ управления информационными процессами на основе динамической модели, алгоритмы оценивания робастности планов и программного управления информационного взаимодействия группировки подвижных объектов и, наконец, обобщенная многоэтапная процедура расчета плана информационного взаимодействия группировки подвижных объектов, объединяющая все ранее разработанные частные модели и алгоритмы.

**В четвертой главе** описаны результаты разработки и исследования прототипа программного модуля, предназначенного для подтверждения

корректности и адекватности предложенного специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Приведены примеры решения задач оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировок маломассоразмерных космических аппаратов, а также наземных транспортно-технологических средств в цифровом пространстве аэропорта.

В **заключении** диссертации представлены основные выводы, новые теоретические и практические результаты, полученные в процессе диссертационного исследования, а также определены перспективы дальнейших исследований.

# 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ И ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Информационные процессы (ИнП)** — процесс создания, сбора, обработки, накопления, хранения, поиска, распространения и использования информации. [60,61]

При **обработке** происходит изменение информации и ее преобразование в новую. **Хранение информации** подразумевает последующую обработку и передачу полученных данных. **Передача информации** имеет двусторонний характер от источника к приемнику и всегда проходит через определенные каналы.

## 1.1 Анализ современного состояния исследований в области решения задач планирования информационных процессов при функционировании подвижных объектов

В настоящее время при проектировании, внедрении, эксплуатации и развитии автоматизированных систем управления (АСУ) различными классами подвижных объектов (ПдО) одной из актуальных проблем была и остается проблема автоматизации принятия решений (ПрР), в том числе, и проблема автоматизации процессов планирования. Далее, говоря о планировании в широком смысле, будем предполагать, что оно представляет собой целенаправленный, организованный и непрерывный процесс выделения различных элементов и аспектов сложных объектов (СлО), к числу которых относятся и рассматриваемые нами ПдО, определения их состояния и взаимодействия в данное время, прогнозирования их развития на некоторый период времени в будущем, а также составление и программирования набора действий и планов, направленных на достижение желаемых результатов [1,84]. Известно, что планирование как этап ПрР обладает целым рядом специфических черт, среди которых можно выделить следующие [1,35]:

– планирование [35]– это процесс принятия предварительного решения об облике организации и механизмах ее функционирования, обеспечивающих на заданном интервале времени достижение поставленных целей;

– результатом планирования является система взаимосвязанных решений, распределенных как в пространстве, так и во времени, оказывающих влияние друг на друга; при этом, в силу общности ресурсов, используемых для выработки и поддержки программных траекторий, функция планирования непосредственно связана с функцией регулирования;

– процесс планирования постоянно приближается к завершению, но никогда не достигает его по двум причинам: во-первых, существует возможность бесконечно пересматривать ранее принятые решения, хотя из-за необходимости предпринимать конкретные действия по достижению поставленных целей требуется все-таки рано или поздно остановиться на каком-то варианте решения; во-вторых, планирование осуществляется в течение определенного промежутка времени, в ходе которого может измениться как сама организация, так и внешняя среда, поэтому сформированные планы нуждаются в постоянной корректировке;

– планирование направлено на предотвращение ошибочных действий и уменьшение неиспользованных возможностей.

В общем случае при планировании приходится решать следующие классы задач [1,84,120,125,127]:

1 определение целей и задач, стоящих перед СЛО, то есть определение состояний, желательных для данной организации, и определение времени, к которому должны быть достигнуты данные цели и задачи;

2 определение средств достижения этих целей и задач;

3 определение ресурсов и источников получения ресурсов для реализации планов, а также разработка принципов, методов и методик распределения ресурсов между элементами и подсистемами СЛО;

4 разработка (синтез) облика СЛО (и, прежде всего, ее основных структур), а также механизмов (алгоритмов) ее функционирования,

обеспечивающих непрерывность комплексного процесса планирования и реализации плановых решений.

На рисунке 1.1 применительно к АСУ ПДО проведена более подробная классификация задач планирования. Сам процесс планирования можно рассматривать как сложную систему. Эта система имеет назначение, функции, потоки, структуру, желаемый результат. При этом процесс планирования должен быть сам спланирован. Любой план имеет три общие компоненты: начальное состояние, цель (или конечное состояние) и средства (ресурсы), обеспечивающие связь этих состояний.

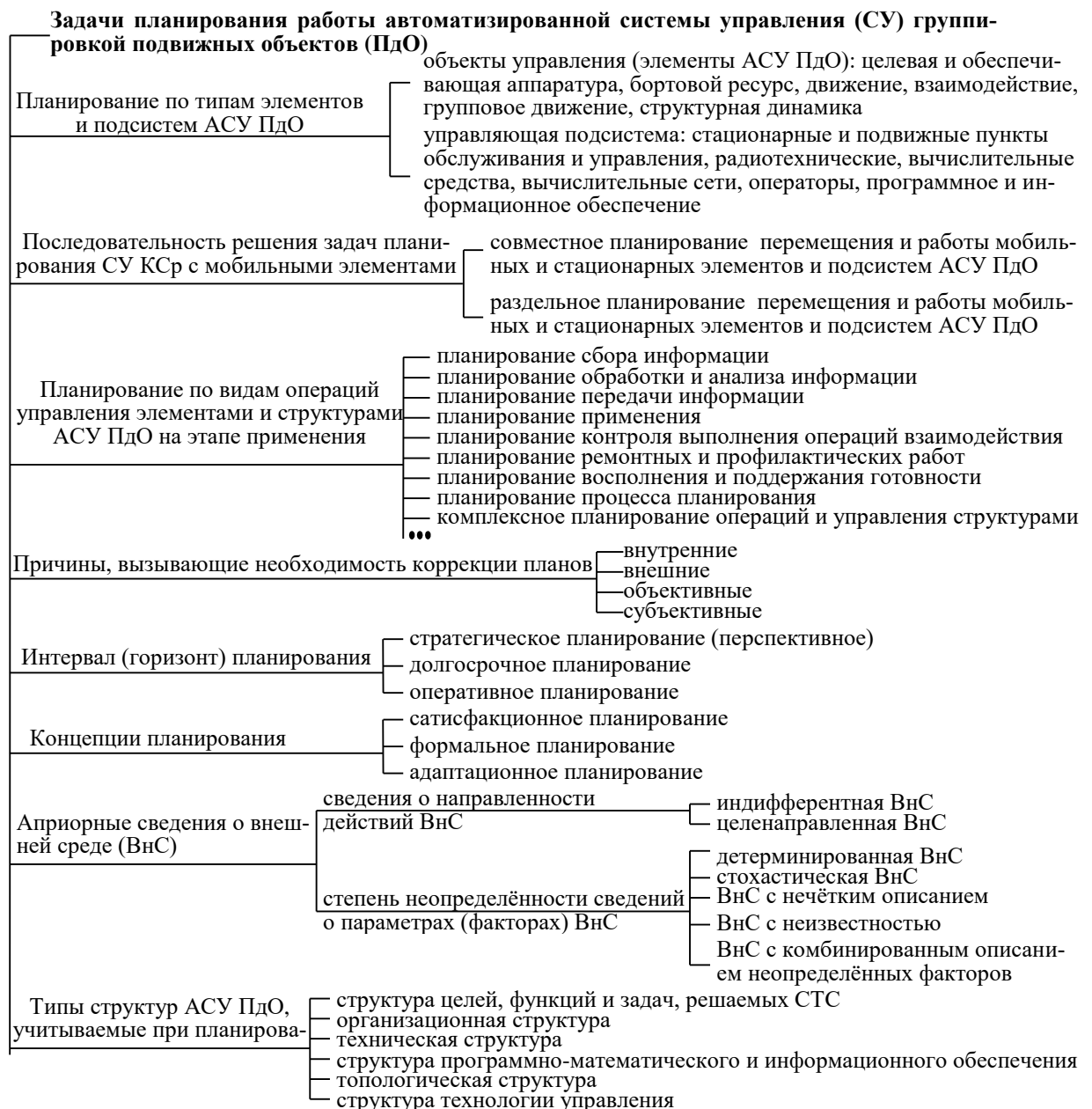


Рисунок 1.1 – Классификация задач планирования работы АСУ ПДО [120]

К настоящему времени сформировалось три подхода (три философии, методологии) планирования [1,84]: сатисфакционное (инкрементальное), формальное и системное планирование.

Формальное планирование делает акцент на предсказании развития обстановки (в терминах математических моделей), сатисфакционное – на реакции СЛО на воздействия внешней среды, при системном планировании стремятся способствовать взаимодействию СЛО с внешней средой. При системном планировании проблемы не решаются, а скорее, разрешаются и постоянно переопределяются через процесс обучения и адаптации. Поэтому в рамках диссертации процесс планирования трактуется не как дискретная деятельность, а как непрерывно развивающийся адаптивный процесс. В работах [1,13,24,107,128] данный вид планирования назван *адаптационным*. При этом адаптация планов проводится на основе апостериорной, текущей и априорной информации (адаптация к «прошлому», «настоящему», «будущему»).

К настоящему времени в рамках перечисленных выше методологий планирования были разработаны многочисленные теории планирования для различных предметных областей (ПрО) [1,13,48, 81,118,121,154]. В рамках данной диссертации основное внимание будет уделяться процессам информационного взаимодействия (ИнВ) [83] ПДО, поэтому при дальнейшем анализе современного состояния исследований в рассматриваемой ПрО ограничимся лишь рассмотрением вопросов составления программ управления (планов работы, расписаний) ПДО, входящими в состав соответствующей АСУ ПДО. В этой области накоплен значительный опыт в решении отдельных частных задач планирования работ и распределения ресурсов для отдельных элементов и подсистем АСУ ПДО [16] в различных условиях обстановки. К указанным задачам относятся задачи планирования работы различных типов технических средств и соответствующих программных комплексов, обеспечивающих их функционирование, вычислительных телекоммуникационных средств, задачи планирования работы операторов АСУ ПДО и т.п. [15]. При автоматизации решения данных классов задач широко использовались как математические модели и методы (прежде всего,



модели и методы математического программирования, имитационные модели), так и логико-алгебраические, логико-лингвистические модели и методы [24,48,107,118,121,128,150]. На рисунке 1.2 представлено большинство из указанных методов и алгоритмов решения рассматриваемых классов задач теории расписаний [36,97]. Однако, к сожалению, при таких подходах к решению частных задач планирования работ в АСУ ПДО зачастую не выполнялись основные требования системного подхода, что конкретно проявлялось в значительной несогласованности процессов функционирования элементов и подсистем, входящих в состав АСУ ПДО, возникновении «пиковых» информационных нагрузок в комплексах средств автоматизации, отсутствии ориентации задач планирования на повышение эффективности применения бортовых и наземных комплексов управления ПДО.

Кроме того, при указанном подходе к решению задач планирования не учитывались современные тенденции и перспективы развития АСУ Гр ПДО, связанные с их интеграцией и возможными вариантами **управления структурной динамикой** данных систем [15,147]. Следует подчеркнуть, что задачи управления структурной динамикой относятся к классу задач структурно-функционального выбора СЛО, для решения которых также предложено достаточно большое методологий и технологий, базирующихся на идеях фиксации каких-либо одних структур и параметров, а также оптимизации других параметров и структур. Однако при реализации такого рода эвристических декомпозиций на практике возникали различного рода пиковые информационные нагрузки, приводящие к невыполнению целевых задач (ЦЗ), поставленных перед Гр ПДО [15,147]. Кроме того, рассматриваемые задачи структурно-функционального синтеза СЛО и процессов их функционирования решались, как правило, на этапах их проектирования, где фактор времени не имел существенного значения. В рамках данного диссертационного исследования фактор времени имеет существенное и определяющее значение, поскольку речь идет об оперативном планировании [65] информационных процессов (ИМП), включающих в себя процессы приема,

передачи, хранения, обработки и потери данных и информации о различных контролируемых объектах (КнО).

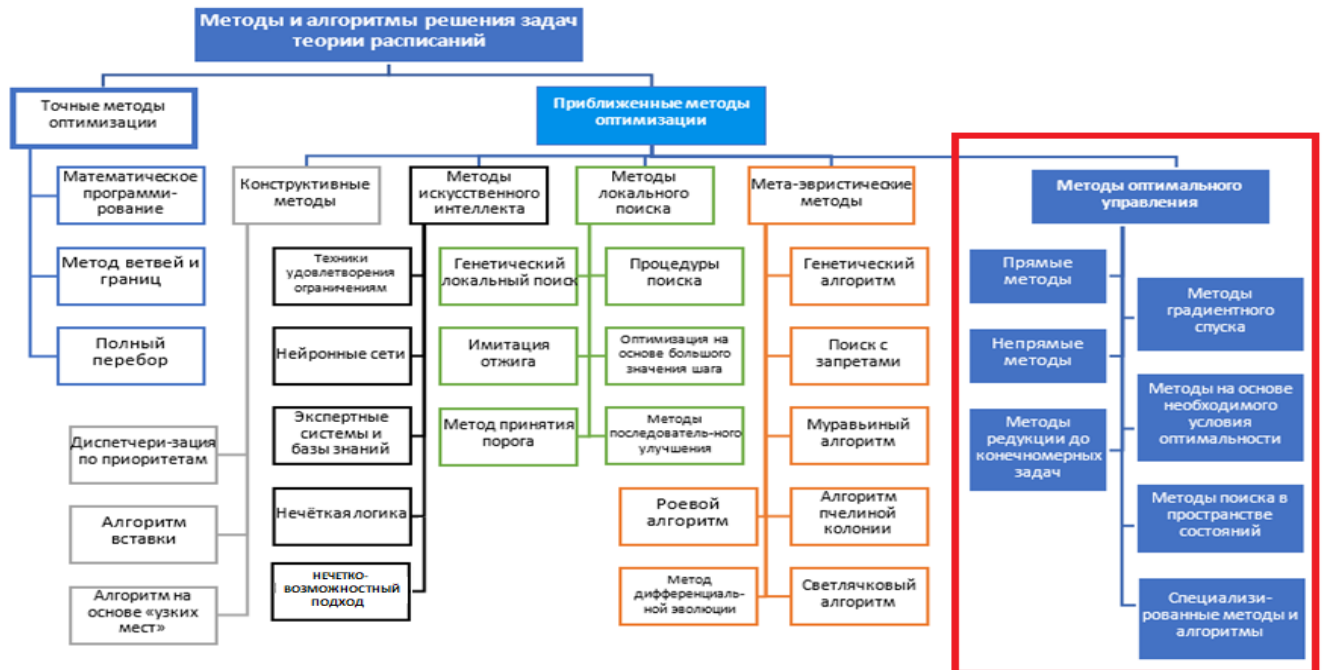


Рисунок 1.2 – Место разрабатываемых в диссертации методов и алгоритмов решения задач оптимального оперативного планирования ИнП [69]

Предлагаемый в данной диссертации системно-кибернетический подход, основанный на динамической интерпретации процессов управления ИнВ ПДО, позволяет реализовывать методологию **системного (адаптивного) планирования**. К настоящему времени в теории оптимального управления (ТОУ), лежащей в основе предлагаемой методологии, получены многочисленные новые фундаментальные и прикладные результаты. К ним, в первую очередь, следует отнести исследования в области **оптимального управления, дифференциальных игр, стохастических систем, оценивание состояния СЛО** (новые научные результаты в данной области были получены научными школами, которые возглавляли такие отечественные и зарубежные ученые как Р. Беллман, А.Г. Бутковский, Р. Габасов, Ф.М. Кириллова, Н.Н. Красовский, В.Ф. Кротов, А.Б. Куржанский, А.А. Меликян, Н.Н. Моисеев, Ю.С. Осипов, Д.Е. Охоцимский, Л.С. Понтрягин, В.С. Пугачев, А.И. Субботин, А.А. Фельдбаум, Ф.Л. Черноушко, Т.М. Энеев,) [38,39,91,106,107,128,181], в области **систем с переменной структурой, скользящие режимы, гибридные системы** (Е.А. Барбашин,

С.В. Емельянов, С.К. Коровин, А.Б. Куржанский, Ю.А. Митропольский, А.Д. Мышкис, А.М. Самойленко, В.И. Уткин, P.Antsaklis, J.Aubin, M.Branicky, P.Varaiya, G.Saridis, S.Sastry), в области **адаптивного, робастного управления, ЛМН-метода** (С. Бойд, Дж. Виллемс, Г. Зеймс, А.А. Красовский, А. Немировский, Ю.Е. Нестеров, Б.Т. Поляк, В.Ю. Рутковский, В.Л. Харитонов, В.А. Якубович), в **области устойчивости нелинейных систем, методов пространства состояний, управляемости, наблюдаемости, фильтрации сигналов** (М.А. Айзерман, А.А. Андронов, В.И. Зубов, Р. Калман, А.А. Красовский, Н.Н. Красовский, В. Лакшмикантам, А.М. Летов, А.М. Лурье, Д. Люенбергер, А.М. Ляпунов, В.М. Матросов, А. Митчел, Е.С. Пятницкий, В.В. Румянцев, Н.Г. Четаев, Д. Шильяк) [91].

В данной диссертации из всего многообразия перечисленных методологий, моделей, методов и алгоритмов воспользуемся только теми, которые обеспечивают поиск оптимальных программных управлений нестационарных конечномерных дифференциальных динамических систем (ДС), а также оценку робастности указанных планов [15,147]. На рисунке 1.2 данные методы отмечены синим цветом и выделены красной рамкой.

## 1.2 Концептуальная модель информационного взаимодействия подвижных объектов

Предлагаемая в диссертации концептуальная модель **информационного взаимодействия подвижных объектов** базируется на следующих основных концептах и отношениях их связывающих.

Концепт «**Подвижный объект**» (ПдО), который обобщает особенности описания и практической реализации мобильных аппаратно-программных платформ, на базе которых создаются и функционируют различные типы ПдО [8,13,120]. В зависимости от типа ПдО могут перемещаться и взаимодействовать в космосе, в воздухе, на земле, в воде или на поверхности воды. Примерами ПдО могут служить пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (БпЛА),

пилотируемые и автоматические космические аппараты (КА), мобильные наземные, подводные, надводные робототехнические комплексы из которых могут формироваться однородные, либо разнородные группировки (Гр) ЛА, БпЛА, КА, РТК.

В состав любого ПдО входит аппаратно-программный комплекс (АПК), ориентированный на решение целевых, обеспечивающих и вспомогательных задач, которые определяются предназначением каждого конкретного ПдО. Как правило, один ПдО в силу своих ограниченных возможностей, определяемых конечными запасами энергетических и информационных ресурсов, не способен на длительном интервале времени выполнять сложные ЦЗ, связанные, например, с глобальным (локальным) непрерывным (дискретным) контролем состояния заданных объектов (участка местности). Поэтому из отдельных ПдО формируются Гр, позволяющие за счет гибкого ситуационного перераспределения целей, задач, ресурсов между ПдО обеспечить гарантированное выполнение поставленных ЦЗ, связанных с наблюдением за состоянием КнО.

Важную роль при выполнении рассматриваемых ЦЗ с использованием Гр ПдО играют соответствующие **информационные технологии (ИТ)** и **информационные процессы (ИнП)**, в составе которых выделяют процессы (операции) сбора ПдО данных о состоянии КнО, их предварительной (первичной) и вторичной обработки, хранения и потери (если нет возможности хранить, обрабатывать, передать указанные данные и информации (обработанных данных) другим ПдО), а также процессы передачи и приема данных и информации КнП.

Далее введем концепт **«операция»**, под которой будем понимать «действие или систему действий, объединенных общим замыслом и единой целью. При этом каждая операция, во-первых, связана с информационным, вещественным и энергетическим обменом ПдО с внешней средой, и, во-вторых, с расходом ресурсов. Содержание каждой операции и ее специфика находят свое отражение в задании соответствующих параметров, характеризующих: результаты выполнения операций (например, такие параметры как объем, качество, время выполнения

операций и так далее), расход ресурсов, информационные, энергетические и материальные потоки, сопровождающие выполнение операции» [120].

Определим концепт **«ресурсы»**, к которым относятся «средства и предметы труда, средства производства, разнообразные технические системы, оборудование, материалы, энергия, транспорт, денежные средства и т.п. К ресурсам можно также отнести время, отводимое на операцию, и людей – участников операции» [120].

В диссертации будем использовать также концепт **«задача»** – «желаемый результат деятельности, достигаемый за намеченный (заданный) интервал времени и характеризующийся набором количественных данных или параметров этого результата. Таким образом, **цель** становится задачей, если указан (задан, принят) срок ее достижения и конкретизированы количественные характеристики желаемого результата» [120].

Будем также использовать концепт **«поток»**, «характеризующийся текущим и требуемым объемом (уровнем), интенсивностью передачи (приема), скоростью изменения уровня потока, качественными параметрами потока» [120].

Важное место в диссертации занимает концепт **«структура»**, под которой будем понимать «характеристику устойчивых связей и способов взаимодействия элементов системы (группировки) ПдО, определяющую ее целостность. Применительно к Гр ПдО будем, в первую очередь, различать следующие основные виды структур: структуру целей, функций и задач, выполняемых каждым отдельным ПдО и в целом Гр ПдО и их СУ; организационную структуру; техническую структуру; топологическую структуру; структуру информационного, математического и программного обеспечения (ПО); структуру технологии управления основными элементами и подсистемами Гр ПдО на различных этапах ее жизненного цикла. С использованием перечисленных видов структур задаются различные классы отношений между основными элементами соответствующей Гр ПдО, которые, в свою очередь, определяются теми пространственно–временными, техническими, технологическими, энергетическими, материальными, информационными и тому подобными ограничениями, которые характерны для каждой конкретной ПрО» [129].

Одной из основных особенностей ИнП, рассматриваемых в диссертации, является то, что они происходят в условиях структурной динамики Гр ПдО, вызываемой различными причинами (объективными, субъективными, внешними, внутренними или их комбинациями) [120]. На рисунке 1.3 представлено обобщенное описание структурной динамики Гр ПдО.

В рамках данной диссертации мы рассмотрим две ПрО, где наблюдается существенная структурная динамика Гр ПдО. Первая ПрО связана с управлением ИнП [173] при взаимодействии маломассоразмерных космических аппаратов (МКА). Одна из основных причин структурной динамики Гр МКА вызвана их орбитальным движением, в ходе которого изменяются условия и ограничения, определяющие возможность ИнВ МКА друг с другом и наземными объектами. На рисунке 1.4, показано возможное пространственное положение Гр МКА. При этом следует отметить, что в ходе указанного орбитального движения возникают интервалы времени, в рамках которых можно говорить (с некоторой степенью погрешности) о постоянстве топологической структуры возможных информационных взаимодействий для некоторых подмножеств МКА. Это дает основания, как будет показано далее, для проведения декомпозиции исследуемой задачи оперативного планирования ИнП. На рисунке 1.5 представлены возможные варианты постоянства топологической структуры рассматриваемой Гр МКА.

В [146] было предложено под планированием информационных операций при функционировании Гр ПдО (в данном случае МКА и ИТТС), как одной из функций управления ИнП, понимать «процесс формирования системы взаимосвязанных решений, распределенных как в пространстве, так и во времени, оказывающих влияние друг на друга; при этом, в силу общности ресурсов ПдО, используемых для выработки и поддержки программных траекторий (планов), функция планирования непосредственно связана с функцией регулирования. Результатом оперативного планирования ИнП будет являться план выполнения ИнП».

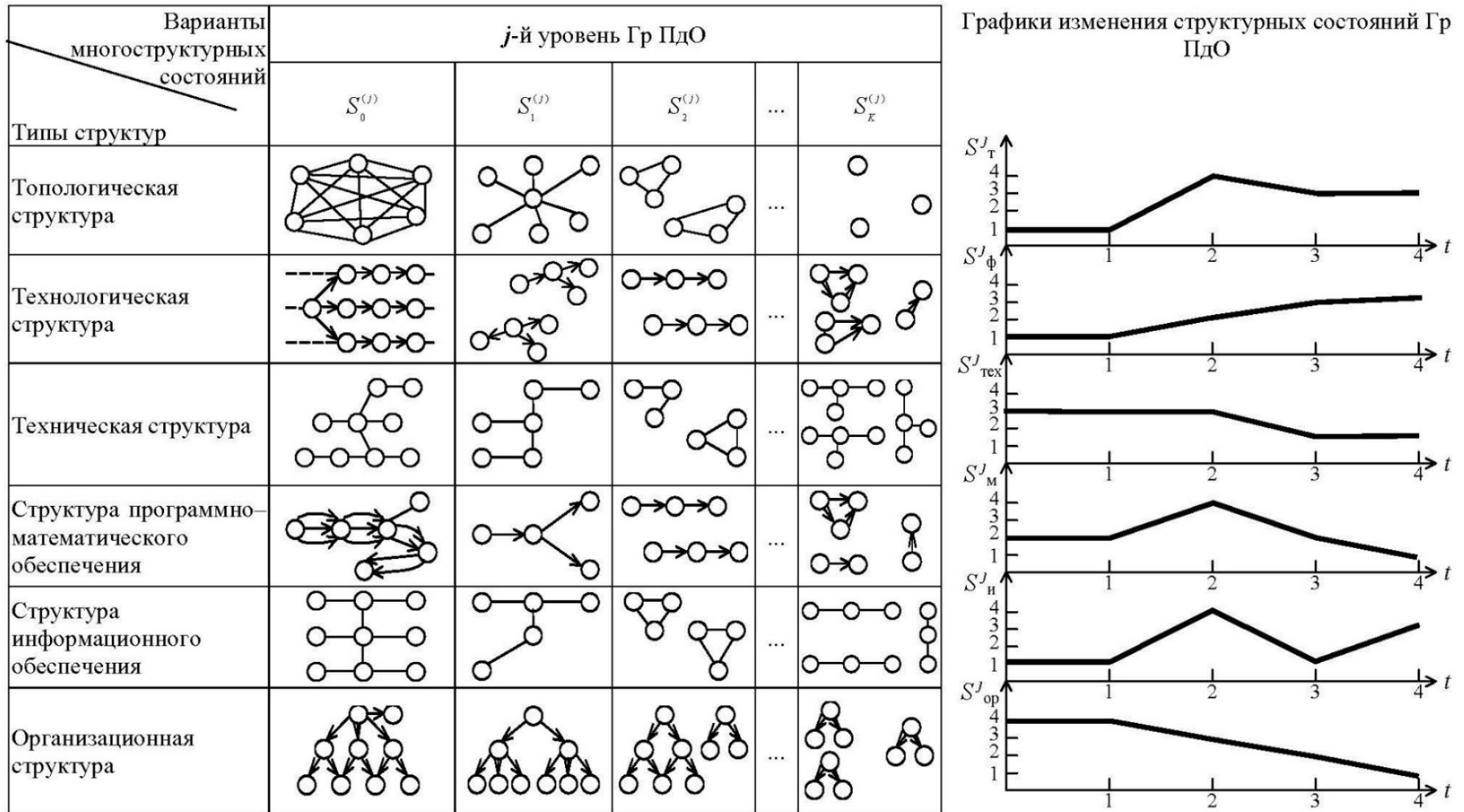


Рисунок 1.3 – Варианты многоструктурной динамики Гр ПдО [120]

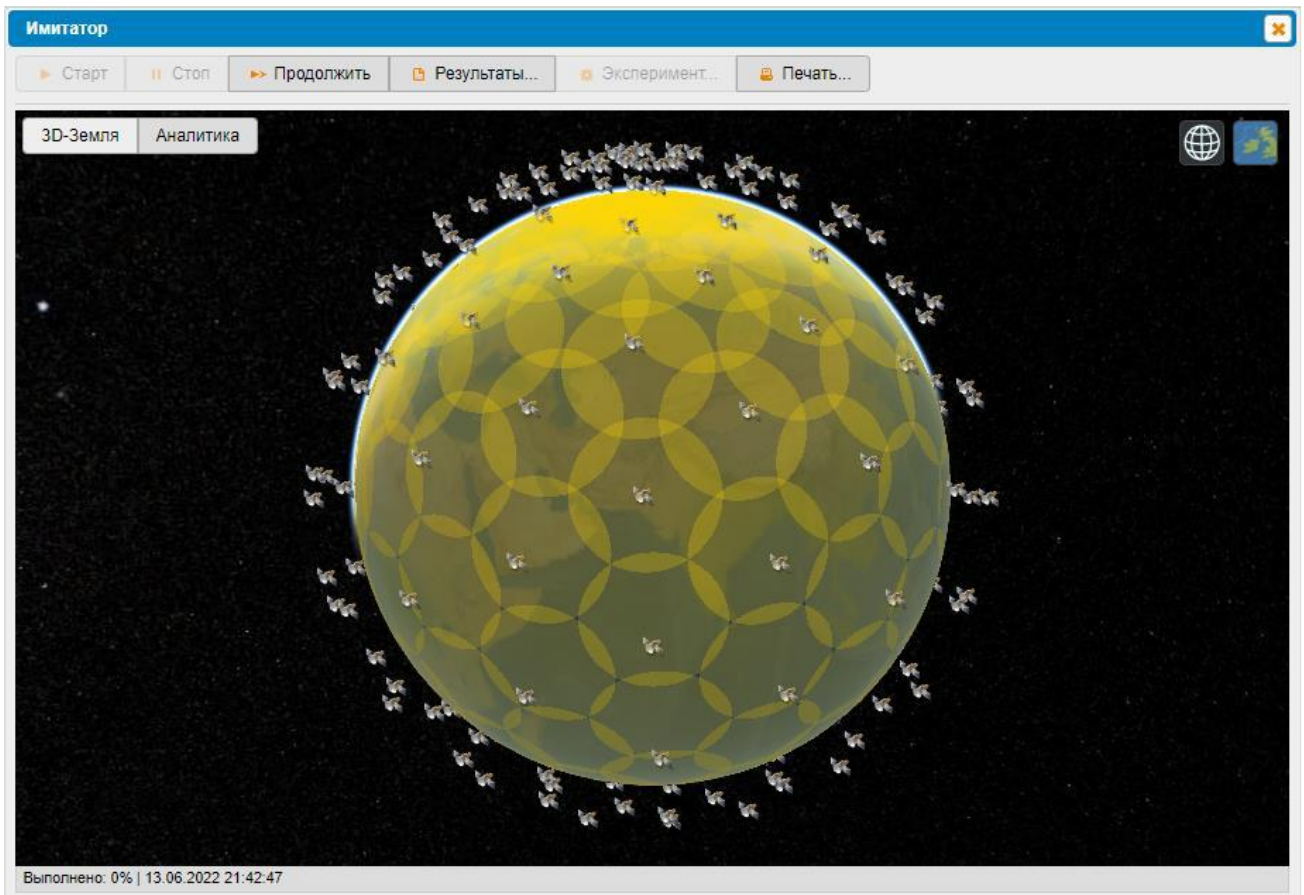


Рисунок 1.4 – Пространственное перемещение орбитальной Гр МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [79]

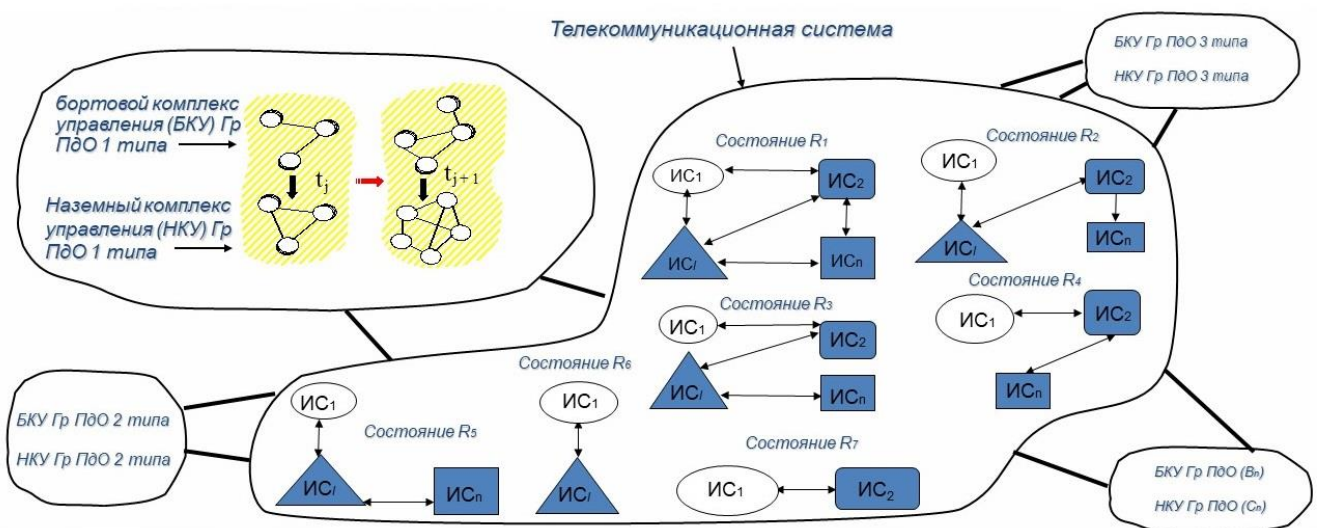


Рисунок 1.5 – Варианты постоянства топологической структуры Гр МКА, обеспечивающей их ИнВ [152]

Следует отметить, что из-за структурной динамики МКА возможны различные последовательности выполнения во времени информационных операций, связанных с приемом, передачей, обработкой, хранением, потерей соответствующих данных и информации. Поэтому в общем случае, задачу



планирования ИнП мы будем трактовать шире, рассматривая наряду с расчетом собственно плана выполнения ИнП, также и синтез ИТ, в состав которых входят перечисленные информационные операции.

Второй прикладной задачей, решенной в диссертации, является задача планирования ИпП при функционировании Гр наземных транспортно-технологических средств в цифровом пространстве аэропорта. В данной прикладной области структурная динамика информационных взаимодействий вызвана запретами на радиоизлучение, которые ограничиваются при взлете и посадке самолетов в аэропорту, а также ограничениями, накладываемыми технологией функционирования технических служб современного аэропорта. На рисунке 1.6 представлены примеры вариантов структурной динамики информационных взаимодействий для данной ПрО. Проведем содержательную и формальную постановку задач диссертационного исследования, опираясь на предложенную концептуальную модель.

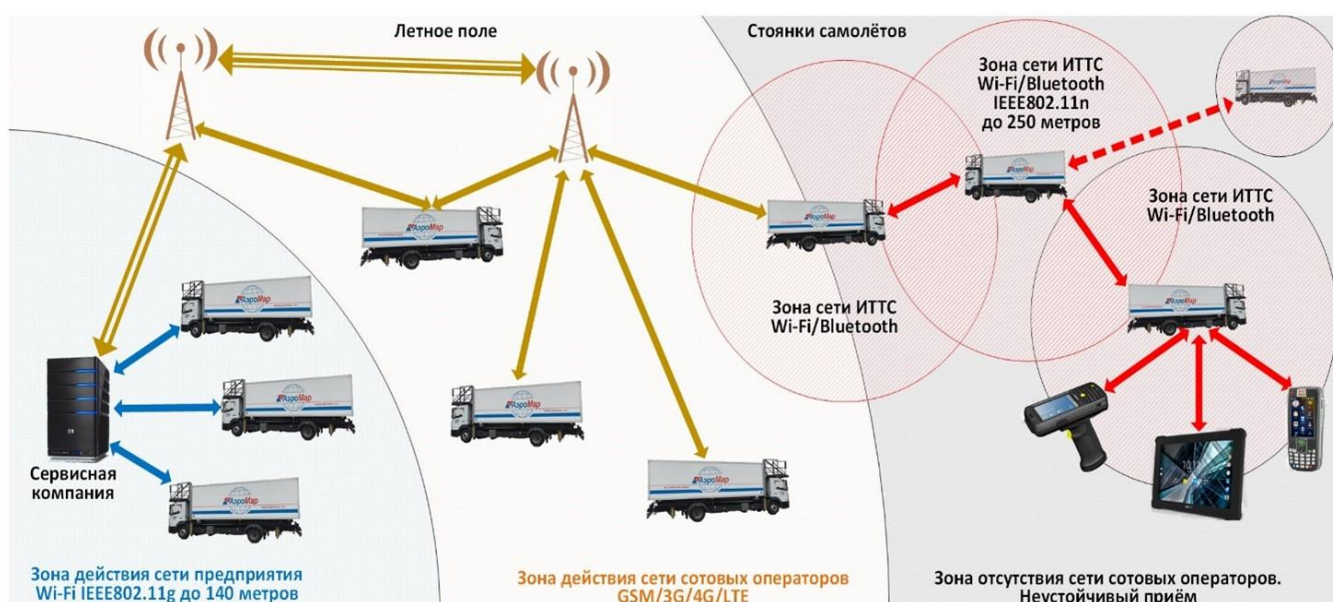


Рисунок 1.6 – Пример структурной динамики ИнВ Гр ИТТС

### **1.3 Содержательная постановка задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов**

При решении задачи, описанной в параграфе 1.2, будем предполагать, что известна Гр ПдО, где для каждого конкретного объекта известны: максимальные объемы запоминающих устройств (ЗУ) ПдО; максимальные производительности вычислительных средств (ВСр) ПдО; максимальные пропускные способности каналов приема/передачи данных между ПдО; минимально/максимально возможные значения интенсивности (скорости) приема/передачи и обработки данных в ПдО; пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных в ПдО. Кроме того, нам известны следующие параметры операций, которые определяют структуру соответствующих ИнП, а именно планируемые объемы информации о состоянии КнО, которые поступают в ПдО; длительность подынтервалов постоянства структур ПдО на конкретном интервале времени; директивные сроки окончания выполнения операций, входящих в ИнП; штрафные функции за нарушение директивных сроков и сами структуры возможного ИнВ ПдО на каждом из подынтервалов. Предполагается, что каждый ПдО оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой (аппаратно-программным комплексом (АПК)), предназначенной для выполнения основных операций, входящих в ИнП, а именно операций хранения, приема, передачи и обработки данных. Предполагается, что из-за ограниченной пропускной способности каналов передачи данных, а также ограниченных вычислительных ресурсов и объемов запоминающего устройства (ЗУ) бортового компьютера (БК) каждого ПдО, входящего в Гр, возможны потери данных и информации (обработанных данных).

Предполагается, что определены основные пространственно-временные, технические, технологические, организационно-финансовые ограничения, учитывающие как специфику соответствующего класса ПдО, в качестве которых могут рассматриваться, например, наземные, воздушные, надводные, подводные, космические ПдО, так и той среды, где они функционируют. Предполагается (как уже указывалось ранее) также, что задана система показателей качества

управления как каждым ПдО в отдельности, а также показатели качества управления перечисленными ИнП при их взаимодействии в рамках конкретной Гр.

Предполагается, что на борту каждого ПдО, входящего в Гр, имеется ЗУ, приемно-передающее устройство, устройство обработки данных с соответствующим программно-математическим и информационным обеспечением. В качестве примера такой Гр рассмотрим сеть ПдО, каждый из которых может решать как задачи получения информации о состоянии КнО, так и задачи обработки, хранения, передачи (ретрансляции), полученных обработанных (необработанных) данных и информации конечным потребителям (КнП).

В виду много альтернативности организации рассматриваемых ИнП особую актуальность приобретает задача выбора наилучшей технологии и соответствующего плана (программы) управления ИнП, обеспечивающих повышение оперативности и качества управления данными ИнП в интересах обеспечения своевременного и обоснованного ПрР о состоянии КнО.

Суть решаемой в диссертации новой научно-технической задачи состоит в следующем. Необходимо, используя перечисленные исходные данные, а также учитывая все перечисленные ранее пространственно-временные, технические, технологические ограничения, определяющие специфику функционирования Гр ПдО, построить программу управления ИнП (план), которая в ходе своей реализации обеспечит наилучшее (с точки зрения заданных целевых функций (ЦФ)) качество информационных процессов при взаимодействии ПдО. К указанным показателям качества будем относить показатель общего объема переданных и обработанных данных, показатель, характеризующий потери данных, показатель, характеризующий качество обработанных данных и своевременность обработки данных.

Предварительный анализ показывает, что исследуемая задача планирования (программного управления) ИнП является большеразмерной, характеризуется сложными нелинейными нестационарными пространственно-временными техническими и технологическими ограничениями, а также требует особого

подхода к учету факторов неопределенности, вызванных воздействиями факторов внешней среды и ее многокритериальным описанием [105]. Поэтому для ее решения в 3 главе диссертации будет предложена обобщенная многоэтапная декомпозиционно-координационная процедура, включающая в себя этап поиска плана выполнения ИнП при функционировании Гр ПдО на основе СМ с привязкой к конкретным информационным ресурсам, а также этап поиска детальных программ управления ИнП на основе динамической модели (ДМ) с привязкой каждой операции, входящей в соответствующий процесс ко времени и ресурсу.

Сформулировав содержательную постановку задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО перейдем к формальной постановке указанной задачи.

#### **1.4 Формальная постановка задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов**

Проведенный анализ показал, что в общем случае для решения задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО целесообразно использовать обобщенную логико-динамическую модель (ЛДМ), которая содержит ЛДМ управления операциями, входящими в ИнП, при взаимодействии ПдО, ЛДМ управления информационными потоками в системе управления (СУ) динамической сетью ПдО.

В основу такого рода формального описания процессов приема, передачи и обработки данных и информации для различных классов СУ динамической сетью ПдО может быть положена их динамическая интерпретация, позволившая с единых методологических, методических и технологических позиций рассмотреть исследуемую управляемую структурную динамику.

Пусть на каждом ПдО  $A_j$ ,  $j \in N$ , где  $N$  – множество их номеров, имеется унифицированный АПК, обеспечивающий реализацию всех возможных операций, входящих в ИнП. Также пусть каждый ПдО оборудован буферным накопителем данных объемом  $V_j$ .

Для оценки потенциальных возможностей АПК ПдО по передаче данных в каждый момент времени  $t$  на интервале управления  $T = [t_0, t_f]$ , где  $t_0, t_f$  – заданные моменты времени начала и конца интервала, можно воспользоваться ориентированным размеченным графом без циклов  $\Gamma(t) = (N, E(t))$ , где  $N$  рассматривается как множество ПдО графа  $E: T \rightarrow N \times N$  – многозначное отображение, сопоставляющее каждому моменту времени  $t \in T$  некоторое множество пар из  $N \times N$  – дуг графа, характеризующих потенциальные возможности передачи или приема однородных данных. Наряду с графом  $\Gamma(t)$ , описывающим в каждый момент времени  $t$  структуру системы, будем рассматривать три заданных функциональных отображения:

$\Psi: E(t) \rightarrow \mathbb{R}^+$  – характеризует пропускные способности дуг графа (каналов передачи данных)

$\chi^{(ex)}: N \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$  – характеризует интенсивность поступления данных в ПдО от внешних источников;

$\varphi: N \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$  – характеризует интенсивность обработки данных в ПдО;

где  $\mathbb{R}^+$  – множество неотрицательных действительных чисел. В дальнейшем эти функции будем обозначать как  $\psi_{ij}(t)$ ,  $i, j \in N$ ;  $\chi_j(t)$ ,  $j \in N$ ;  $\varphi_j(t)$ ,  $j \in N$ .

Причем  $\chi_j^{(ex)}(t) \equiv 0$ ,  $j \in N \setminus N_0$ , где  $N_0$  – номера ПдО из  $A_0$ ;  $\varphi_j(t) \equiv 0$ ,  $j \in N \setminus N_K$  где  $N_K$  – множество номеров объектов из  $A_K$ .

Будем искать количественные значения распределения  $X(t) = \{x_{ij}^{(ex)}(t)\}$ ,  $i, j \in N$ ,  $t \in T$  данных между ПдО, поступление которых задается функцией  $\chi_j^{(ex)}(t)$ ,  $i \in N$ . Задача планирования ИнП в этом случае состоит в поиске количественных значений распределения объемов, передаваемых по каналам Гр ПдО данных, объемов данных и информации, полученных в результате их

обработки, хранения и потери. Причем осуществляется поиск такого распределения информационных потоков, которое позволяет максимизировать объем обработанных данных и минимизировать их потери. Этот срок определяется запасом энергоресурса на ПДО, который расходуется на передачу данных; такой расход задается функцией  $p: X(t) \rightarrow \mathbb{R}^+$ . Хотя энергоресурс ПДО пополняется периодически, но интервал пополнение ситуационно зависит от выполнения каждым ПДО операций.

Под  $x_{ij}(t)$  будем понимать количество данных, переданных к моменту времени  $t$  от  $i$ -го ПДО к  $j$ -му. Тогда  $X(t) = \{x_{ij}(t)\}$  характеризует состояние передачи данных в Гр к моменту  $t$ . Через  $u_{ij}(t)$  обозначим интенсивность (скорость) передачи данных от  $i$ -го объекта к  $j$ -му в момент времени  $t$ , очевидно, что

$$0 \leq u_{ij}(t) \leq \psi_{ij}(t). \quad (1.1)$$

Скорость поступления данных в момент  $t$  в  $j$ -й ПДО из других ПДО определяется как

$$\dot{x}_j^{(+)}(t) = \sum_{j \in N} \dot{x}_{ij}(t), \quad (1.2)$$

соответственно скорость передачи данных из  $j$ -го ПДО

$$\dot{x}_j^{(-)}(t) = \sum_{f \in N} \dot{x}_{jf}(t). \quad (1.3)$$

Обозначим через  $y_j(t)$  количество данных, хранимых в ЗУ  $j$ -го объекта в момент  $t$ , тогда

$$0 \leq y_j(t) \leq V_j. \quad (1.4)$$

Через  $z_j(t)$  обозначим количество данных, потерянных в  $j$ -м ПДО к моменту  $t$ ,

$$0 \leq z_j(t), 0 \leq \dot{z}_j(t). \quad (1.5)$$

Тогда для каждого ПдО  $j \in N$  должно выполняться следующее равенство (условие баланса):

$$\chi_j^{(ax)}(t) + \dot{x}_j^{(+)}(t) - \dot{y}_j(t) - \dot{z}_j(t) = \dot{x}_j^{(-)}(t) + \omega_j(t), t \in T, \quad (1.6)$$

где  $\chi_j(t)$  – скорость поступления данных в  $j$ -й ПдО;

$\omega_j(t)$  – скорость обработки данных в  $j$ -м ПдО,

$$0 \leq \omega_j(t) \leq \varphi_j(t), t \in T. \quad (1.7)$$

Используя обозначения, введенные в [6-8], и предполагая, что управление будет осуществляться только одним классом (группировкой) ПдО ( $\xi = 1$ ), можно

вести в рассмотрение следующие множества:  $A = \{A_1, \dots, A_n\}$  – множество ПдО,

$B^{(i)} = \{B_1^{(i)}, \dots, B_{\emptyset}^{(i)}, \dots, B_s^{(i)}\}$  – множество операций, входящих в ИнП и

выполняемых непосредственно на ПдО  $A_i$ , а также в ходе взаимодействия с

другими ПдО  $A_j$ ;  $i, j \in N = \{1, \dots, n\}, i \neq j$ . Кроме того, как уже указывалось ранее,

пусть на каждом ПдО имеется универсальный АПК (канал обслуживания), обеспечивающий выполнение всех операций (прием, хранение, обработку, передачу данных и информации), входящих в ИнП. В этом случае можно ввести

множество каналов обслуживания (КО):  $C = \{C_1, \dots, C_l\}$ .

Пусть для каждого ПдО  $A_i$  известен радиус-вектор  $\vec{r}_i(t)$ , характеризующий его положение в трехмерном пространстве (другими словами, известна модель движения ПдО:  $M^{(\partial)}$ ). В этом случае можно заранее определить потенциальные

зоны взаимодействия (контактный потенциал) каждой пары ПдО  $\langle A_i, A_j \rangle$ ,

используя следующую формулу:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \gamma + \left\{ R_{ij} - \left\| \bar{r}_i(t) - \bar{r}_j(t) \right\| \right\}, \quad (1.8)$$

где  $i, j \in N, \gamma_+(\delta) = 1$ , если  $\delta > 0$ ,  $\gamma_+(\delta) = 0$ , если  $\delta < 0$ ;  $R_{ij}$  – заданный радиус действия АПК канала обслуживания  $A_i, A_j$ . С учетом выше изложенного

могут быть предложены следующие ЛДМ, описывающие различные аспекты процесса управления Гр ПдО [129,131,146].

**Логико-динамическая модель управления операциями, входящими в ИнП (модель  $M^{(0)}$ ):**

$$M^{(0)} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{u}^{(0)}(\cdot) | \dot{x}_{i\varnothing}^{(0)} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij}(t) \cdot u_{i\varnothing j}^{(0)}; \quad x_{i\varnothing}^{(0)}(t_0) = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sum_{\varnothing=1}^{s_j} u_{i\varnothing}^{(0)} \leq c_j^{(0)}; \quad \sum_{j=1}^n \sum_{\varnothing=1}^{s_j} u_{i\varnothing j}^{(0)} \leq c_i^{(0)}; \\ \sum_{\alpha \in \Gamma_i} \sum_{\beta \in \Gamma_{i\varnothing}} u_{i\varnothing j}^{(0)} \left( b_{\alpha\beta}^{(0)} - x_{\alpha\beta}^{(0)} \right) = 0; \\ u_{i\varnothing j}^{(0)} \in \{0,1\}; \quad i, j = 1, \dots, n; \quad i \neq j \end{array} \right\}; \quad (1.9)$$

«где  $x_{i\varnothing}^{(0)}$  – переменная, характеризующая состояние выполнения операции

$B_{\varnothing}^{(i)}$ ;  $b_{\alpha\beta}^{(0)}$  – заданные объемы выполнения  $B_{\varnothing}^{(i)}$ ,  $B_{\beta}^{(\alpha)}$ ;  $u_{i\varnothing j}^{(0)}(t)$  – управляющее

воздействие,  $u_{i\varnothing j}^{(0)}(t) = 1$ , если  $B_{\varnothing}^{(i)}$  должна выполняться,  $u_{i\varnothing j}^{(0)}(t) = 0$  в

противоположном случае;  $\Gamma_i$  – множество номеров тех ПдО,  $B_{\beta}^{(\alpha)}$  операции

которых должны выполняться перед операцией  $B_{\varnothing}^{(i)}$ ;  $\Gamma_{i\varnothing}$  – множество операций,



непосредственно предшествующих  $B_{\wp}^{(i)}$ ;  $c_i^{(0)}$ ,  $c_j^{(0)}$  – заданные константы, характеризующие технические ограничения, связанные с функционированием динамической сети ПдО и СУ динамической сетью ПдО в целом» [152,155].

Как видно из (1.9) в ЛДМ управления операциями, входящими в ИнП, реализуемыми Гр ПдО, присутствуют динамические логические ограничения, определяющие порядок выполнения операций.

**Динамическая модель управления информационными потоками в СУ динамической сетью ПдО – (модель  $M^{(n)}$ ):**

$$M^{(n)} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{u}^{(n)}(\cdot) | \dot{x}_{i\wp j\rho}^{(n,1)} = u_{i\wp j\rho}^{(n,1)}; \quad \dot{x}_{i\wp j\rho}^{(n,2)} = u_{i\wp j\rho}^{(n,2)}; \quad x_{i\wp j\rho}^{(n,\sigma)}(t_0) = 0; \\ x_{i\wp j\rho}^{(n,\sigma)}(t_f) \in \mathbb{R}^1; \quad \sigma = 1, 2; \quad 0 \leq u_{i\wp j\rho}^{(n,1)} \leq c_{i\wp}^{(n,1)} u_{i\wp j}^{(0)}; \\ u_{i\wp j\rho}^{(n,2)} \left( b_{i\wp\rho}^{(n)} - x_{i\wp j\rho}^{(n)} \right) = 0; \quad u_{i\wp j\rho}^{(n,2)} x_{ij}^{(0)} = 0; \quad u_{i\wp j\rho}^{(n,2)}(t) \in \{0, 1\}; \\ \sum_{i=1}^n \sum_{\wp=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{\mu} x_{i\wp j\rho}^{(n,1)} \left( u_{i\wp j\rho}^{(0)} + u_{i\wp j\rho}^{(n,2)} \right) \leq F_j^{(1)}; \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{s_i} u_{i\wp j\rho}^{(n,1)} \leq F_{j\rho}^{(2)}; \quad \sum_{\wp=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{\mu} u_{i\wp j\rho}^{(n,1)} \leq F_{ij}^{(3)} \end{array} \right. ; \quad (1.10)$$

«где  $x_{i\wp j\rho}^{(n,1)}$  – переменная, характеризующая текущий объем данных типа  $\rho$ ,

полученных  $A_j$  от  $A_i$  в ходе выполнения  $B_{\wp}^{(i)}$ ;  $x_{i\wp j\rho}^{(n,2)}$  – вспомогательная

переменная, характеризующая общую продолжительность (время) нахождения

данных типа  $\rho$  на ПдО  $A_i$ ;  $u_{i\wp j\rho}^{(n,1)}$  – интенсивность передачи данных  $\rho$  от  $A_i$  к  $A_j$

;  $c_{i\wp}^{(n,1)}$  – заданная константа, характеризующая максимально возможное значение

$u_{i\varnothing j\rho}^{(n,1)}$ ;  $u_{i\varnothing j\rho}^{(n,2)}$  – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если закончен прием данных,  $u_{i\varnothing j\rho}^{(n,2)} = 0$  в противоположном случае, либо в том случае, когда начинает выполняться операция  $B_j^l$ , следующая в технологическом цикле управления ПДО  $A_i$  непосредственно за  $B_{\varnothing}^{(i)}$ ;  $F_j^{(1)}$ ,  $F_{i\rho}^{(2)}$ ,  $F_{ij}^{(3)}$  – заданные величины, характеризующие соответственно максимально возможный объем данных, который может находиться на  $A_j$ ; пропускную способность  $A_j$ ; пропускную способность каналов  $c_i, c_j$ ;  $b_{i\varnothing\rho}^{(n)}$  – заданный объем данных типа « $\rho$ », который может передаваться с ПДО  $A_i$  в ходе выполнения  $B_{\varnothing}^{(i)}$ . Для ряда операций, связанных, прежде всего, с проведением измерений и оцениванием компонент вектора состояния ПДО, возможно задание дополнительных параметров, характеризующих точность определения состояния ПДО» [152,155].

Оценивание качества процессов управления ИнП можно проводить, используя различные частные (косвенные) показатели эффективности, такие, например, как

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\varnothing=1}^{s_i} \left[ \left( b_{i\varnothing}^{(0)} - x_{i\varnothing}^{(0)}(t) \right)^2 + \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^{t_f} \sigma_{i\varnothing}(\tau) u_{i\varnothing j}^{(0)}(\tau) d\tau \right], \quad i \neq j, \quad (1.11)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{\varnothing=1}^{s_i} \sum_{\rho=1}^{\mu} \int_{t_0}^{t_f} x_{i\varnothing j\rho}^{(n,2)}(\tau) d\tau, \quad i \neq j, \quad (1.12)$$

«где  $\sigma_{i\varnothing}(\tau)$  – монотонные функции времени, которые выбираются с учетом заданных директивных сроков начала (конца) выполнения операций, входящих в ИнП. Показатель (1.11) вводится в том случае, если необходимо, во-первых, оценить точность выполнения краевых условий, либо минимизировать потери,

вызванные невыполнением отдельных операций, входящих в ИнП, и, во-вторых, для оценивания суммарного штрафа за невыполнение директивных сроков проведения операций, входящих в ИнП. Критериальная функция (1.12) позволяет оценивать суммарные потери в оперативности обработки и передачи информации. Анализ описанных ЛДМ программного управления ИнП показывает, что с их помощью удалось в явном виде учесть такие базовые логические функции и соответствующие ограничения как «И», «ИЛИ», «альтернативное ИЛИ», «НЕ». Более того, данные функции были заданы в виде временных логик, с помощью которых описываются альтернативные сценарии реализации технологий управления ИнП» [131].

При этом введение данных функций и ограничений не приводит к выходу синтезируемых программных управлений ИнП в динамической сети ПдО (или, по-другому, планов их функционирования) из класса кусочно-непрерывных функций. Все это позволяет при решении задач синтеза технологий и программ ИнП в динамической сети ПдО на конструктивной основе использовать фундаментальные и прикладные результаты, полученные как в классической, так и современной ТОУ. Еще одно достоинство предложенного полимодельного комплекса состоит в том, что с его помощью можно единообразно (с использованием одних и тех же математических структур) формально описать как задачи КМ процессов проактивного (упреждающего) управления ИнП в динамической сети ПдО, так и задачи планирования их действий, коррекции планов (перепланирования), а также задачи оперативного управления и мониторинга их состояния, обеспечив, тем самым, корректную межмодельную координацию за счет использования единого языка описания рассматриваемых процессов.

С использованием представленных ЛДМ исходную задачу многокритериального оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО можно формально описать следующим образом. Необходимо на заданном интервале времени распределенную нестационарную динамическую сеть, управляемая структурная динамика которой описана ЛДМ (1.9) и (1.10), перевести

из начального структурного состояние в требуемое структурное состояние с учетом всех ограничений и наилучшим образом (с точки зрения выбранных показателей качества управления ИнП).

Рассматриваемая задача относится к классу большеразмерных нестационарных билинейных многокритериальных задач неклассического вариационного исчисления (оптимального управления) требует для своего решения особого подхода для учета и преодоления указанных трудностей.

Результаты данного параграфа представлены в статье [152] соискателя ученой степени.

### **1.5 Анализ и обоснование возможных путей решения сформулированной задачи**

Анализ моделей (1.9) и (1.10), а также результатов последних исследований указанных ЛДМ показывает, что использование методов ТОУ [47,89], развитых для данных моделей встречает ряд трудностей, прежде всего, алгоритмического характера, связанных с особенностями учета разрывности правых частей уравнений, разрывности процессов выполнения операций, входящих в ИнП, а также с особенностями учета логических ограничений, которые сводятся в конечном итоге к появлению соответствующих фазовых ограничений. Возможным путем построения эффективных алгоритмов поиска программ управления ИнП, в этом случае является декомпозиция исходных задач (1.9) и (1.10) на статическую и динамическую задачи планирования ИнП, для решения которых должны быть разработаны модели, методы и алгоритмы (о которых речь пойдет далее во 2 и 3 главах), базирующиеся на методологиях и технологиях, разрабатываемых в ТОУ и математическом программировании. В основу такой декомпозиции следует положить специфику функционирования Гр ПдО (а точнее, ее структурную динамику), заключающуюся в том, что несмотря на перемещение ПдО топологическая структура их информационных взаимодействий сохраняется постоянной в течение определенных интервалов времени (временных интервалов

постоянства рассматриваемой структуры). В течение таких интервалов телекоммуникационная связь между ПдО не прерывается [85].

Показано, что в СМ для каждого временного интервала постоянства структуры информационных взаимодействий зафиксировать характеристики соответствующей топологической структуры, а также другие параметры данной динамической сети. При этом можно показать, что ограничения на порядок выполнения операций, входящих в ИнП, их разрывность и нелинейность косвенно (неявно) учитываются в данной статической модели. Учет их в ДМ приводит к существенным алгоритмическим и вычислительным трудностям. В противоположность этому в ДМ планирования можно конструктивно описать ограничения, связанные с нестационарным характером использования складированных и нескладированных ресурсов, ограничения и показатели качества, связанные с временными факторами. Возможное разделение и учет ограничений в предлагаемых СМ и ДМ представлено на рисунке 1.7.

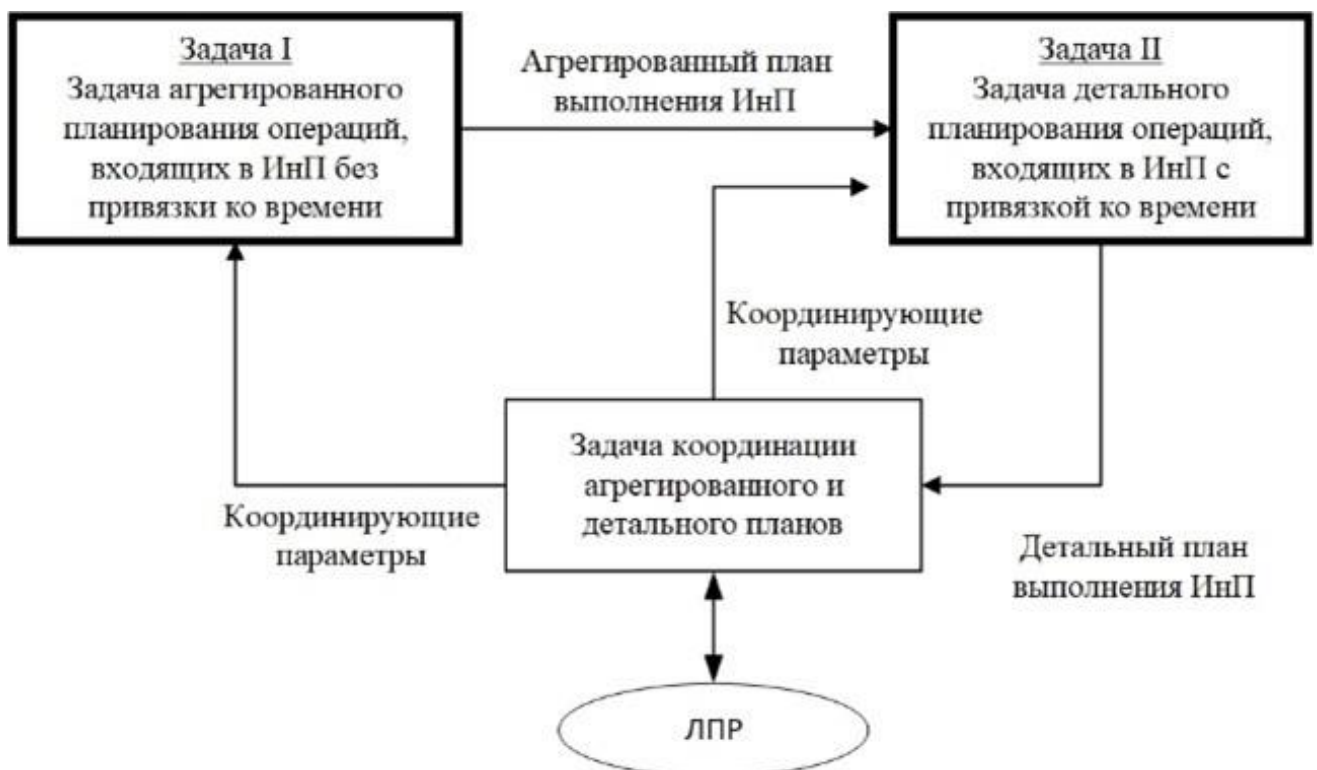


Рисунок 1.7 – Предлагаемая декомпозиция задачи планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО

Компенсацию разорванных связей в ходе последовательной декомпозиции предлагается восстанавливать в ходе решения многоэтапной координационно-

итерационной процедуры синтеза программ управления ИнП (см. далее параграф 3.4), поочередно используя для этого СМ и ДМ для формирования планов выполнения ИнП Гр ПдО и оценки их робастности [55,145]. Интеллектуализация управления ИнП реализуется при формировании первых приближений в методе последовательных приближений (МПП) Крылова-Черноузько.

Определив основные направления решения сформулированной ранее задачи планирования ИнП, рассмотрим на каких методологических и методических основах должна быть выполнена разработка соответствующего специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО).

### **1.6 Методологические и методические основы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов**

Предлагается при решении исследуемых в диссертационной работе задач ориентироваться на следующие фундаментальные системно-кибернетические концепции и принципы. Во-первых, при разработке моделей, описывающих процессы программного управления ИнП будем базироваться на концепции комплексного (системного) моделирования (КМ) Гр ПдО, которая предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного (статико-динамического) описания различных вариантов построения и использования Гр ПдО, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных проактивных (упреждающих) управленческих решений (в том числе и ориентированных на их реконфигурацию), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок» [149,152].

Также КМ [3,18,26,120,126] используется для преодоления проблемы возрастающей сложности реально существующих и создаваемых сложных динамических объектов (СДО) при построении и использовании их моделей, что

позволяет практически устранить необходимость длительных и дорогостоящих натуральных испытаний, отказаться от использования традиционных методов «проб и ошибок» [73]. Например, в [130] проанализированы возможные технологии синтеза сценариев моделирования структурной динамики СДО и рассмотрены особенности создания прототипа СМАО выбора сценариев моделирования СДО на различных этапах их жизненного цикла. В [74] было предложено полимодельное описание и технология КМ СДО.

В качестве второй концепции, использованной в разработке рассматриваемого СМАО, была выбрана концепция проактивного (упреждающего) управления структурной динамикой Гр ПДО в изменяющихся условиях, вызванных воздействием различных факторов (внешних, внутренних, объективных, субъективных и их комбинаций). Реализация данной концепции предполагает, «в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления Гр ПДО, ориентированного на оперативное реагирование уже произошедшие негативные события и недопущение их последующего развития, упреждающее предотвращение причин возникновения инцидентов за счет создания (либо целенаправленного поиска) в соответствующей системе проактивного (упреждающего) мониторинга и управления новых системно-функциональных резервов, обеспечивающих динамическое формирование принципиально новых возможностей по парированию возможных расчетных и нерасчетных нештатных и аварийных ситуаций, с использованием методологии и технологий КМ, а также многовариантного ситуационно-адаптивного прогнозирования. В работах [67,68,87,95,105,109,179] представлены конструктивные пути реализации данной концепции на основе построения и использования многомерных аппроксимированных областей достижимости (ОД) ЛДМ (или ДМ), описывающих рассматриваемую ПрО» [149,152]. Еще одной используемой при создании рассматриваемого СМАО планирования (управления) ИнП концепцией является «концепция интеллектуализации управления, предусматривающая в качестве условий эффективного управления Гр ПДО необходимость применения

интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных ИТ), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов» [149,152]. В разработанном СМАО конструктивно данная концепция может быть реализована за счет использования нечетко-возможностной свертки векторного показателя качества функционирования Гр ПдО, использованного в ЛДМ проактивного (упреждающего) управления ИнП [152].

Для применения концепции КМ при разработке прототипа СМАО предлагается выполнить комбинированное использование методов математического программирования (целочисленного линейного программирования (ЦЛП) и линейного программирования (ЛП)) и ТОУ СДО.

Ранее в параграфе 1.4 и далее во 2 главе будет продемонстрировано как концепции КМ и проактивного (упреждающего) управления реализуются за счет применения оригинальной последовательной декомпозиция большеразмерной нестационарной задачи планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО.

В качестве базовых принципов при решении рассматриваемых задач оперативного планирования предлагается использовать следующие основные системно-кибернетические принципы [39,53,54,113,153,175]: «принципы неокончательных решений, поглощения разнообразия, иерархической компенсации, дополнительности, полимодельности и многокритериальности, самоподобного рекурсивного описания и моделирования объектов исследования, гомеостатического баланса взаимодействия; преодоление принципа разделения; принципы декомпозиции и агрегирования; принцип рационального многокритериального компромисса при наличии неустранимых пороговых информационных и временных ограничений; принцип интерактивного итерационного формирования решения в условиях неопределенности и противоречивости исходной информации» [93].

Результаты данного параграфа представлены в статье [152] соискателя ученой степени.



## 1.7 Выводы по главе 1

1. Системный анализ современного состояния работ в области специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов показал, что они в большинстве случаев базируются либо на моделях и методах широко развиваемых в исследовании операций и комбинаторике, либо на эвристических подходах, основанных на биоинспирированных метафорах и технологиях. При этом учет структурной динамики группировки подвижных объектов переводит рассматриваемый класс задач управления информационными процессами в класс задач многокритериального структурно-функционального синтеза как самой динамической сети, образующейся из подвижных объектов, так технологий и программ управления соответствующими информационными операциями. При решении последнего класса задач, также используются эвристические подходы при которых синтезируется только какой-либо один тип структур при фиксации всех других типов структур группировки подвижных объектов. В целом все перечисленные классы задач планирования и управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов характеризуются высокой размерностью, нестационарностью, нелинейностью, неопределенностью условий реализации планов. Поэтому для решения такого рода задач требуется реализация концепции, принципов и технологий комплексного (системного) моделирования.

2. Проведена содержательная и формальная постановка задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов. Рассматриваемая задача относится к классу большеразмерных нестационарных билинейных многокритериальных задач неклассического вариационного исчисления (оптимального управления) требует

для своего решения особого подхода для учета и преодоления перечисленных ранее трудностей модельно-алгоритмического и вычислительного характера.

3. Предложен оригинальный способ последовательной декомпозиции большеразмерной нестационарной задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов. Новизна предложенной декомпозиции заключается в том, что в ходе ее реализации выполняется разбиение сложной пространственно-распределенной задачи выбора плана информационного взаимодействия подвижных объектов на две подзадачи, описывающие пространственную и временную составляющие исходной задачи. Пространственную составляющую исходной данной задачи предложено описывать с помощью статической модели планирования, в рамках которой для заданных участков постоянства пространственной структуры (сетевой топологии) группировки подвижных объектов происходит распределение информационных операций по ресурсам подвижных объектов без привязки их ко времени. Временную составляющую исходной задачи предложено описывать с помощью динамической модели, в рамках которой запланированные на статической модели информационные операции, входящие в состав информационных процессов, привязываются к конкретным ресурсам и времени.

4. Разработаны методологические основы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, базирующиеся на концепциях комплексного (системного) моделирования, проактивного (упреждающего) интеллектуального управления, также на системно-кибернетических принципах неокончательных решений, поглощения разнообразия, иерархической компенсации, дополнительности, полимодельности и многокритериальности, рационального многокритериального компромисса при наличии неустранимых пороговых информационных и временных ограничений; интерактивного итерационного формирования решения в условиях неопределенности и противоречивости исходной информации.

## **2 ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Для преодоления проблем, выявленных в результате проведенного системного анализа современного состояния работ в области СМАО решения задач планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО, и опираясь на учет структурной динамики Гр ПдО в данной главе предлагается разработать полимодельное описание указанной задачи, которое будет описано в данном параграфе.

### **2.1 Уточненная постановка задачи оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов**

Как было отмечено в главе 1 в настоящее время Гр ПдО являются распределенными, имеющими иерархически-сетевую топологическую структуру. При этом под действием различных входных воздействий (внешних, внутренних, объективных, субъективных или их комбинаций) наблюдается структурная динамика Гр ПдО не только топологической, но и других ее базовых структур, к которым, в первую очередь, относятся, техническая, функциональная структуры, а также структуры программно-математического, информационного обеспечения, организационная структура [102,105,109,122]. В этих условиях особую актуальность приобретают задачи расчета как программ управления ИнП, так и задачи расчета и оптимизации соответствующих показателей качества управления указанными ИнП [102,109]. Использование традиционных моделей и методов для оценки, анализа и оптимизации показателей качества управления указанными ИнП, сталкивается с серьезными трудностями, обусловленными большой размерностью пространства многоструктурных структурных состояний Гр ПдО, многоцелевым, многокритериальным, нестационарным, нелинейным характером ее функционирования, сложностью учета факторов неопределенности воздействия внешней среды. В связи со сказанным особую актуальность приобретает задача

разработки нового СМАО решения задач планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии Гр ПдО, которое также может использоваться для оценки, анализа и оптимизации показателей качества управления указанными ИнП.

Для решения задачи планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО в рамках концепции КМ в данной главе выполняется разработка полимодельного описания (см. рисунок 2.1), состоящего из следующих моделей:

- детерминированная ДМ планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии ПдО;
- детерминированная СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО.

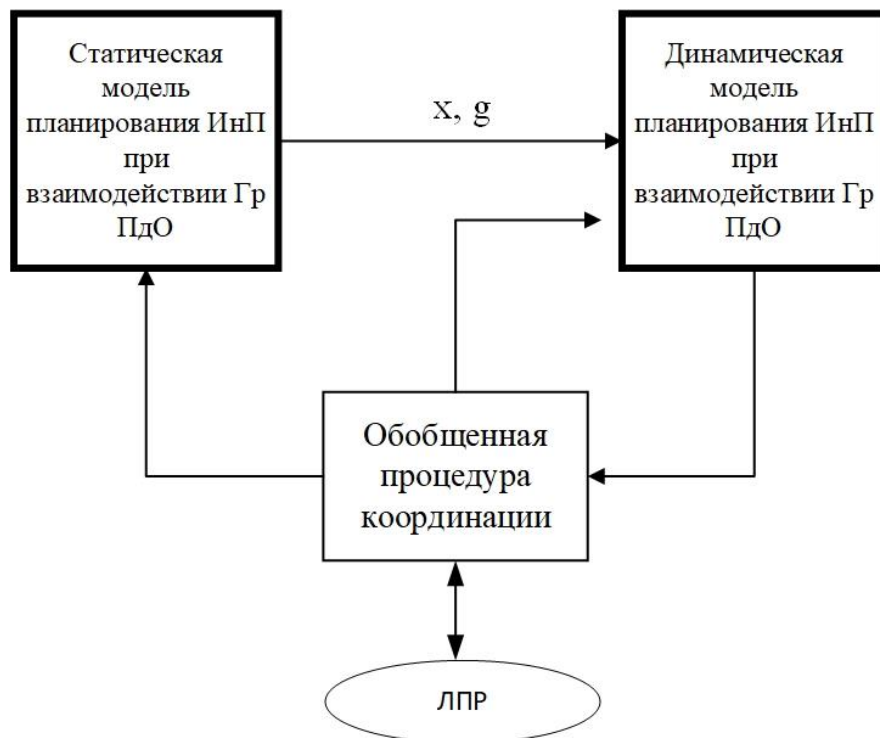


Рисунок 2.1 – Сценарий взаимодействия статической и динамической моделей планирования ИнП

В СМ выполняется формирование исходных объемов данных и информации, которые затем передаются в ДМ для привязки к ресурсам и времени соответствующих операций, входящих в состав ИнП, осуществляющих формирование указанных данных и информации. Таким образом в СМ результаты планирования привязаны к участкам постоянства структуры, в ДМ – ко времени. Также можно отметить, что благодаря разделению на две модели осуществляется разделение ограничений между моделями, так как на ДМ сложно учитывать одни

ограничения (например, фазовые и смешанные ограничения), а на СМ – другие. Далее будет показано, как благодаря предлагаемому в данной главе полимодельному описанию задачи планирования ИнП, с помощью СМ удастся учесть, то, что в ДМ учесть сложно и наоборот с помощью ДМ можно конструктивно описать те аспекты ИнП, которые трудно поддаются формализации в СМ сложно. С помощью полимодельного описания обеспечивается планирование функционирования АПК каждого ПдО.

Перейдем к описанию СМ планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО.

## **2.2 Статическая модель планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов**

Решение задачи синтеза технологии управления и плана выполнения операций, входящих в ИнП (или короче плана выполнения ИнП) Гр ПдО осуществляется с помощью СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО. При разработке СМ предполагалось, что каждый элемент Гр оборудован «унифицированным АПК, предназначенным для хранения, передачи и обработки информации и данных, известны технические характеристики АПК: объем ЗУ в каждом ПдО; производительность ВСр; пропускная способность каналов связи между ПдО» [109, 167].

Основными параметрами СМ, на основе которых определяются планы работы Гр, являются: объем информации, переданной из одного ПдО в другой на некотором интервале времени; «объем информации, который может быть (согласно плану работы Гр ПдО) записан в ЗУ ПдО на некотором интервале, либо обработан в данном ПдО, либо потерян в ПдО (из-за ограниченной пропускной способности Гр)» [167].

«Оптимизация технологии организации ИнП с использованием СМ осуществлялась исходя из максимизации показателя, характеризующего общий

объем информации, обработанной в рассматриваемой СУ, и минимизации показателя, характеризующего количество потерянной информации» [109].

В рамках предложенной формализации задача синтеза технологии ИнП Гр ПДО сводится к большеразмерной многокритериальной задаче ЛП с двухсторонними ограничениями [105].

Проведем дальнейшую детализацию теоретико-множественного формального описания процессов ИнВ Гр ПДО.

Пусть  $A$  – ПДО, где  $A_i, A_j \in \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , причем  $i, j$  – индексы ПДО, а  $n$  их количество;  $\rho$  – тип данных (поток), для которого параметр  $P$  – количество типов данных (потоков).

«Пусть структура и характеристики ПДО изменяются в дискретные моменты времени  $(0, t_1, t_2, \dots, T)$ , разбивающие весь интервал времени  $t \in (0, T]$  (интервал планирования) на подынтервалы (участки), соответствующие постоянству структуры Гр ПДО. Сопоставим произвольному подынтервалу  $\left[ t_{ol}, t_{fl} \right] = T_l^{(o,1)}$  номер  $l$  (его индекс), при этом  $l = 1, \dots, L$ , где  $L$  – количество участков, причем  $t_{ol}$  – начальный момент времени подынтервала постоянства структуры,  $t_{fl}$  – конечный момент времени участка постоянства структуры» [109, 167].

Для СМ [172] программа управления ИнП представляет собой план выполнения операций на заданных участках постоянства структур. Продолжим детализацию (начатую в параграфе 1.3) для СМ вводя дополнительные переменные, константы и ограничения. Введем обозначения для характеристик ПДО:  $V_j$  – максимально возможный объем ЗУ в  $A_j$  ПДО;  $\varphi_{jl}$  – максимальная интенсивность обработки данных в  $A_j$  ПДО;  $\psi_{ijl}$  – максимальная интенсивность передачи данных между  $A_i$  и  $A_j$  ПДО. Для проведения дальнейшей формализации добавим следующие переменные:  $x_{jl}^{(ex)}$  – количество данных, поступивших из

внешней среды в  $A_j$  ПдО на  $l$ -м подынтервале времени;  $x_{ij\rho l}$  – количество данных, переданных из  $A_i$  ПдО в  $A_j$   $\rho$ -го типа на  $l$ -м участке времени;  $y_{j\rho l}$ ,  $g_{j\rho l}$ ,  $z_{j\rho l}$  – «переменные, характеризующие каждая соответственно: объем данных  $\rho$ -го типа на  $l$ -м подынтервале, который может быть записан (согласно плану работы Гр ПдО) в ЗУ  $A_j$  ПдО, либо обработан» [109,167] (согласно характеристикам аппаратуры) в  $A_j$  ПдО, либо потерян в  $A_j$  ПдО (из-за ограниченной пропускной способности каналов связи). Кроме того, пусть  $M_{jl}^-$  – множество номеров ПдО, из которых в  $A_j$  ПдО на  $l$ -м участке времени передаются данные, а  $M_{jl}^+$  – множество номеров ПдО, в которые передаются данные из  $A_j$  ПдО на  $l$ -м подынтервале времени;  $s_\rho$  – коэффициент, характеризующий степень обработки информации. Также отметим, что  $I_1$  – показатель полноты обработки данных в Гр ПдО,  $I_2$  – показатель потери данных в Гр ПдО,  $I_0$  – обобщенный показатель качества планирования ИнП, а  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты важности показателей (задаются лицом, принимающим решение (ЛПР)).

Необходимо подчеркнуть, что в реальных условиях происходит обмен разнородными данными, имеющими различную степень важности и срочности. Для этого при введении соответствующих переменных будем учитывать, что обработанные данные – информация ( $\rho = 2$ ), необработанные данные – данные ( $\rho = 1$ ).

С учетом вышеизложенного предлагаемая СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО примет следующий вид:

ЦФ:

$$\alpha_1 I_1 - \alpha_2 I_2 = I_0 \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

$$\vec{x} \in \Delta$$

$$\text{где } I_1 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L g_{j\rho l}, \quad I_2 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L z_{j\rho l},$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0,$$

$$\bar{x} = \|x_{j\rho l}^{(ex)}, x_{ij\rho l}, y_{j\rho l}, g_{j\rho l}, z_{j\rho l}\|$$

$$\Delta = \begin{cases} \bar{x} | \sum_{\rho \in P} x_{j\rho l}^{(ex)} = \sum_{\rho \in P} \left( \sum_{i \in M_{jl}^{(+)}} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_{jl}^{(-)}} x_{ij\rho l} \right) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}; \quad 0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq V_j; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}; \quad 0 \leq z_{j\rho l}; \quad g_{j(\rho+1)l} = {}^s_{\rho} g_{j\rho l}; \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L \end{cases}$$

Математическая модель планирования ИнП при взаимодействии ПдО:

$$\sum_{\rho \in P} x_{j\rho l}^{(ex)} = \sum_{\rho \in P} \left( \sum_{i \in M_{jl}^{(+)}} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_{jl}^{(-)}} x_{ij\rho l} \right) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} + z_{j\rho l};$$

$$\rho = 1, 2, \dots, P; \quad (2.2)$$

Технические ограничения:

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}; \quad i, j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.3)$$

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq V_j; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.4)$$

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.5)$$

$$0 \leq z_{j\rho l}; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.6)$$

$$g_{j(\rho+1)l} = {}^s_{\rho} g_{j\rho l}; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (2.7)$$

При формировании плана работы Гр ПдО поиск наилучшей альтернативы осуществляется исходя из оптимизации  $I_0$  в ЦФ (2.1). Из анализа СМ следует, что предложенная формализация задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО



сводится к многокритериальной задаче ЛП большой размерности. Дополнительная особенность данной задачи управления состоит в том, что на переменные  $x_{ij\rho l}$ ,  $y_{j\rho l}$ ,  $g_{j\rho l}$  накладываются двухсторонние ограничения ((2.3) – (2.6)). «Кроме того, структурные особенности данной задачи позволяют ее декомпозировать по числу подынтервалов постоянства структуры, а взаимодействие между этими декомпозированными задачами (моделями) будет поддерживаться за счет переменных  $y_{j\rho l}$  и  $y_{j\rho(l-1)}$ , которые обеспечивают взаимосвязь между подынтервалами. Для преодоления проблемы многокритериальной неопределенности в задаче планирования ИнП применен вариант скаляризации векторного показателя качества планирования, основанный на линейной свертке частных показателей» [109,167]. Разбиение на подынтервалы постоянства структуры осуществляется исходя из физики решаемой задачи. Так, например, для КА, как одного из видов ПдО, данные участки определяются спецификой орбиты, на которой он находится, для БпЛА данные участки определяются принятым способом их применения.

Дальнейшая детализация полученного плана работы Гр ПдО предлагается выполнять уже с использованием детерминированной ДМ планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии ПдО. Для этого количество данных, запланированное в СМ для передачи между ПдО на каждом участке времени  $x_{ij\rho l}$ , а также объем данных, который запланирован в СМ для обработки в каждом ПдО на каждом подынтервале времени  $g_{j\rho l}$  передаются в виде краевых условий в разработанную ДМ, о которой речь пойдет в следующем параграфе.

Результаты данного параграфа представлены в статье [167] соискателя ученой степени.

### 2.3 Динамическая модель планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов

В основу формального описания ИнП была положена их динамическая интерпретация, позволившая с единых методологических, методических и технологических позиций рассмотреть исследуемую управляемую структурную динамику (см. параграф 1.4).

Детерминированная ДМ планирования (программного управления) процессов приема, передачи, обработки и хранения данных и информации, при взаимодействии ПдО [151] была разработана на основе [68,70,108,109]. В предлагаемой ДМ более детально представлена технология функционирования Гр ПдО, в рамках которой осуществляется описание ИнП с привязкой ко времени.

Продолжим детализацию для ДМ вводя дополнительные переменные, константы и ограничения.

#### Математическая модель программного управления ИнП при взаимодействии ПдО

$$\dot{x}_l^{(o,1)}(t) = u_l^{(o,1)}(t); \quad (2.8)$$

$$\dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad (2.9)$$

$$\dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = u_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \quad (2.10)$$

$$\dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad (2.11)$$

$$\dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t). \quad (2.12)$$

С помощью вспомогательной модели (2.8) осуществляется описание границ временных интервалов участков, на которых наблюдается постоянство структуры ИнВ Гр ПдО; (2.9) – потоковая модель программного управления приемом/передачей данных (информации); (2.10) – потоковая модель программного управления обработкой данных; (2.11) – вспомогательная модель, позволяющая определить направление приема/передачи данных; (2.12) –

вспомогательная модель, позволяющая определить в каком ПДО осуществляется обработка заданного типа (потока) данных.

Поясним параметры моделей (2.8) – (2.12):  $x_l^{(o,1)}$  – длительность нахождения Гр ПДО на  $l$ -м участке постоянства структуры;  $x_{ij\rho l}^{(n,1)}$  – количество данных типа  $\rho$ , переданных из  $A_i$  ПДО в  $A_j$  на  $l$ -м подынтервале;  $x_{j\rho l}^{(n,2)}$  – количество данных типа  $\rho$ , обработанных в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м участке;  $x_{ij\rho l}^{(n,3)}$  – вспомогательная переменная, которая равна длительности интервала времени приема/передачи данных типа  $\rho$  от  $A_i$  ПДО к  $A_j$  на  $l$ -м подынтервале;  $x_{j\rho l}^{(n,4)}$  – вспомогательная переменная, которая равна продолжительности обработки данных типа  $\rho$  в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м участке;  $u_l^{(o,1)}(t)$  – булева переменная, значение которой соответствует смене или сохранению текущего подынтервала постоянства структуры;  $u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  – интенсивность (скорость) приема/передача данных типа  $\rho$  от  $A_i$  ПДО к  $A_j$  на  $l$ -м участке;  $u_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$  – интенсивность (скорость) обработки данных типа  $\rho$  в  $A_j$  ПДО на  $l$ -м подынтервале;  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  – управляющее воздействие, используемое при принятии решения о начале (завершении) приема/передачи данных;  $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$  – управляющее воздействие, используемое при принятии решения о начале (завершении) обработки данных.

Таким образом, конечномерная дифференциальная ДС вида (2.8)–(2.12) представляет собой математическую модель программного управления ИнП при взаимодействии ПДО, которая позволяет детализировать план выполнения

операций, входящих в ИнП, полученный на СМ планирования ИнП при взаимодействии ПДО с привязкой его уже ко времени.

Проведем дальнейшую детализацию данной модели, вводя следующие технические и технологические ограничения:

$$u_l^{(o,1)}(t)(T_l^{(o,1)} - \dot{x}_l^{(o,1)}(t)) = 1; l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.13)$$

$$0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); i, j = 1, 2, \dots, n; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.14)$$

$$0 \leq u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{j\rho l}^{(n,2)} \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); j = 1, 2, \dots, n; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L; \quad (2.16)$$

$j \neq i$

$$\sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)} \xi_{ij}^{(b,1)}; \quad (2.17)$$

$$\sum_{\rho=1}^P u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{jl}^{(2)} \xi_j^{(b,2)}; \quad (2.18)$$

$$u_l^{(o,1)}(t) \in \{0, 1\}; \quad (2.19)$$

$$\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \in \{0, 1\}; \quad (2.20)$$

$$\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \in \{0, 1\}; \quad (2.21)$$

$$0 \leq \xi_{ij}^{(b,1)} \leq 1; \quad (2.22)$$

$$0 \leq \xi_j^{(b,2)} \leq 1. \quad (2.23)$$

Ограничение (2.13) задает упорядоченную последовательность временных подынтервалов, соответствующих постоянству структур. Неравенства (2.14) и (2.15) задают ограничения, накладываемые на максимальную и минимальную интенсивность (скорость) приема/передачи и обработки данных в ПДО

соответственно, где  $c_{ij\rho l}^{(n,1)}$  и  $c_{j\rho l}^{(n,2)}$  – заданные константы, выбранные таким образом, чтобы они соответствовали параметрам  $\psi_{ijl}$  и  $\varphi_{jl}$  из СМ. Ограничение (2.16) определяет технологию работы  $A_j$  ПдО, которая состоит в следующем: полученные от других ПдО данные типа  $\rho$  либо передаются в другие ПдО ( $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)=1$ ), либо обрабатываются в данном ПдО ( $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)=1$ ). Ограничения (2.17), (2.18) определяют текущие (дифференциальные) пропускные способности ПдО, где:  $d_{ijl}^{(1)}$  и  $d_{jl}^{(2)}$  – пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных ПдО соответственно, функции  $\xi_{ij}^{(b,1)}$ ,  $\xi_j^{(b,2)}$  ((2.22)-(2.23)) задают возможные варианты возмущающих воздействий (целенаправленных, индифферентных, неизвестных, либо их комбинаций) на соответствующие компоненты Гр ПдО со стороны внешней среды. Ограничения (2.19)-(2.21) определяют множество возможных значений, которые принимают переменные  $u_l^{(o,1)}(t)$ ,  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$ ,  $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ , где  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1, если принимается решение о передаче данных типа  $\rho$  из  $A_i$  ПдО в  $A_j$ , 0 – в противоположном случае;  $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$  – вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1, если принимается решение об обработке данных в  $A_j$  ПдО, 0 – в противоположном случае. При этом варианту  $\xi_{ij}^{(b,1)} = \xi_j^{(b,2)} = 1$  будет соответствовать ситуация отсутствия возмущающих воздействий, другая крайняя ситуация  $\xi_{ij}^{(b,1)} = \xi_j^{(b,2)} = 0$  возможна при условии, если внешняя среда в момент времени  $t$  полностью подавляет работу указанного элемента Гр ПдО. Все остальные

варианты результатов реализации сценариев воздействия возмущающей среды располагаются между двумя этими вариантами.

Для корректности описания разрабатываемой ДМ необходимо задать соответствующие краевые условия.

Для каждого подынтервала планирования будем предполагать, что начальные условия для выполнения каждой операции, входящей в состав ИТ, реализуемой в ходе взаимодействия ПдО принимают следующие значения:

$$x_l^{(o,1)}(t_{0l}) = x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{0l}) = x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{0l}) = x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{0l}) = x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{0l}) = 0. \quad (2.24)$$

В момент времени  $t = t_{fl}$  должны выполняться следующие соотношения:

$$x_l^{(o,1)}(t_{fl}) = T_l^{(o,1)}; \quad (2.25)$$

$$\sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) = x_{ijl}; \quad \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) = g_{jl}; \quad (2.26)$$

$$x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) \in \mathbb{R}^+; \quad x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) \in \mathbb{R}^+. \quad (2.27)$$

Соотношение (2.24) означает, что все временные участки постоянства структур ИнВ должны быть промоделированы, а (2.25)–(2.27) задают краевые условия, накладываемые на компоненты вектора  $x(t)$ , определяющего требуемое состояние ИнП при взаимодействии Гр ПдО, в момент времени  $t = t_{fl}$  (в момент окончания интервала планирования).

Для поиска оптимальных программ управления ИнП, реализуемых при взаимодействии ПдО, введем следующие показатели качества:

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L [T_l^{(o,1)} - x_l^{(o,1)}(t_{fl})]^2; \quad (2.28)$$

$$J_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \int_{t_{0l}}^{t_{fl}} \gamma_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) dt; \quad (2.29)$$

$$J_3 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \int_{0l}^{t_{fl}} \beta_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) dt; \quad (2.30)$$

$$J_4 = \frac{1}{2} \left[ \begin{aligned} & \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left( x_{ijl} - \sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) \right)^2 + \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^n \left( g_{jl} - \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) \right)^2 \end{aligned} \right]; \quad (2.31)$$

$$J_5 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left( T_l^{(o,1)} - x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) \right)^2; \quad (2.32)$$

$$J_6 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \left( T_l^{(o,1)} - x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) \right)^2. \quad (2.33)$$

Показатель (2.28) позволяет оценить полноту выполнения краевых условий при моделировании временных интервалов на которых наблюдается постоянство технической структуры, обеспечивающей взаимодействие ПдО. Показатель (2.29) – суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения операций, в рамках соответствующих ИнП ( $\gamma_{j\rho l}(t)$  – директивные сроки качества выполнения операций). Показатель (2.30) – суммарное интегральное качество выполненных операций, входящих в соответствующие ИнП ( $\beta_{j\rho l}(t)$  – штрафная функция). Показатель (2.31) позволяет оценить выполнение краевых условий (2.26) (по сути, функционал Майера). С помощью функционалов (2.32) и (2.33) удастся обеспечить равномерность (неравномерность) использования ресурсов ПдО для каждого подынтервала постоянства структур.

С учетом вышеизложенного задача поиска оптимальной программы управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО может быть сформулирована как следующая задача оптимального программного управления обобщенной ДС вида (2.8)–(2.12). Необходимо перевести указанную обобщенную ДС из заданного

начального состояния (2.24) в заданное конечное состояние (2.25)–(2.27) с учетом технических и технологических ограничений (2.13)–(2.23) наилучшим образом с точки зрения показателей качества вида (2.28)–(2.33). Если таких программ управления окажется несколько, необходимо из них выбрать наиболее предпочтительную с точки зрения обобщенного показателя качества программного управления ( $J_{об}$ ), который является ЦФ:

$$J_{об} = \sum_{m=1}^6 \lambda_m J_m, \text{ где } \sum_{m=1}^6 \lambda_m = 1, J_m = \frac{J_m}{J_m^*}. \quad (2.34)$$

В (2.34)  $m$  – индекс показателя качества;  $J_m$  – нормированное значение показателя качества  $J_m$ ;  $J_m^*$  – наилучшее (максимальное) значение показателя качества  $J_m$ ;  $\lambda_m$  – коэффициент важности показателя качества программного управления.

Рассматриваемая задача оптимального управления относится к задачам неклассического вариационного исчисления и может быть сведена к краевой задаче с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина [28,56,70,128,172]. Для этого необходимо сформировать функцию Гамильтона (Гамильтониан) и сопряженную систему дифференциальных уравнений, которые будут соответствовать основной системе дифференциальных уравнений, описывающих обобщенную ДС (2.8) – (2.12). Выполним данные операции, необходимые для последующей алгоритмизации планирования ИнП при взаимодействии ПдО.

В соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина каждой основной системе уравнений с использованием функции Гамильтона (2.45) может быть сопоставлена сопряженная система уравнений. Исходя из моделей (2.8) – (2.12) введем сопряженную систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{\eta}_l^{(o,1)}(t) = 0; \quad (2.35)$$

$$\dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = 0; \quad (2.36)$$



$$\dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = 0; \quad (2.37)$$

$$\dot{\eta}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = 0; \quad (2.38)$$

$$\dot{\eta}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = 0. \quad (2.39)$$

Краевые условия для (2.35)–(2.39) в момент времени  $t = t_{fl}$  определяются из условий трансверсальности (2.40)–(2.44). Для сопряженной системы дифференциальных уравнений краевые условия на «правом» конце определяются из следующих соотношений:

$$\eta_l^{(o,1)}(t_{fl}) = \lambda_3 (T_l^{(o,1)} - x_l^{(o,1)}(t_{fl})); \quad (2.40)$$

$$\eta_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) = \lambda_4 \left( x_{ijl} - \sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) \right); \quad (2.41)$$

$$\eta_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) = \lambda_4 \left( g_{jl} - \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) \right); \quad (2.42)$$

$$\eta_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) = \lambda_5 \left( T_l^{(o,1)} - x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) \right); \quad (2.43)$$

$$\eta_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) = \lambda_6 \left( T_l^{(o,1)} - x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) \right). \quad (2.44)$$

Каждая из сопряженных переменных соответствует переменной из основной системы дифференциальных уравнений. Исходя из анализа сопряженной системы дифференциальных уравнений видно, что краевые условия в момент времени  $t = t_{fl}$  равны краевым условиям в момент времени  $t = t_{0l}$ .

В соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина введем следующую функцию Гамильтона [41]:

$$H(x(t), \eta(t), u^*(t), t) = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) \rightarrow \max_{u \in Q} H(x(t), \eta(t), u^*(t)), \quad (2.45)$$

где  $x(t) = \|x_l^{(o,1)}(t), x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), x_{j\rho l}^{(n,2)}(t), x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t), x_{j\rho l}^{(n,4)}(t)\|$ ,

$$\eta(t) = \|\eta_l^{(o,1)}(t), \eta_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \eta_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \eta_{ij\rho l}^{(n,3)}(t), \eta_{j\rho l}^{(n,4)}(t)\|,$$

$$u(t) = \|u_l^{(o,1)}(t), u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), u_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)\|, Q - \text{область допустимых}$$

управлений, определяемая ограничениями (2.13)–(2.23),  $u^*(t)$  – вектор экстремального программного управления компоненты которого представляют собой частные программы управления, соответствующими операциями, входящими в состав ИнП, протекающих при взаимодействии ПДО.

Задача максимизации Гамильтониана (2.45) в нашем случае декомпозируется на 4 частные оптимизационные подзадачи (функции Гамильтона) (рисунок 2.2) следующего вида:

Подзадача  $H_1$ :

$$H_1 = \sum_{l=1}^L \dot{\eta}_l^{(o,1)}(t) u_l^{(o,1)}(t) \rightarrow \max; \quad (2.46)$$

$$u_l^{(o,1)}(t)(T_l^{(o,1)} - \dot{x}_l^{(o,1)}(t)) = 1; \quad (2.47)$$

$$0 \leq u_l^{(o,1)}(t) \leq 1. \quad (2.48)$$

Подзадача  $H_2$ :

$$H_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \eta_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \rightarrow \max; \quad (2.49)$$

$$j \neq i$$

$$0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad (2.50)$$

$$\sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)} \xi_{ij}^{(b,1)}. \quad (2.51)$$

Подзадача  $H_3$ :

$$H_3 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \eta_{j\rho l}^{(n,2)}(t) u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \rightarrow \max; \quad (2.52)$$

$$0 \leq u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{j\rho l}^{(n,2)} \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \quad (2.53)$$

$$\sum_{\rho=1}^P u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{jl}^{(2)} \xi_j^{(b,2)}. \quad (2.54)$$

Подзадача  $H_4$ :

$$H_4 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[ \eta_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \eta_{j\rho l}^{(n,4)}(t) \times \right. \\ \left. \times (\gamma_{j\rho l}(t) + \beta_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)) \right] \rightarrow \max; \quad (2.55)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad (2.56)$$

$j \neq i$

$$0 \leq \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq 1; \quad (2.57)$$

$$0 \leq \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1. \quad (2.58)$$

Максимизация функции Гамильтона  $H_1$  (2.46) позволяет на формальной основе найти конкретные подынтервалы времени, на которых сохраняется структура взаимосвязей ПдО.

Функция Гамильтона  $H_4$  (2.55) позволяет при решении оптимизационной задачи «о назначениях» определить на каких ПдО какие операции, входящие в состав ИнП должны выполняться в каждый конкретный момент времени. Подзадачу  $H_4$ , решаемую в каждый текущий момент времени, можно свести к задаче ЦЛП [101]. В результате решения оптимизационной задачи вычисляются

управляющие воздействия  $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  и  $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ , которые подставляются в модели (2.11) и (2.12) соответственно. Результаты решения подзадачи  $H_4$  являются входом в процедуры оптимизации подзадач  $H_2$  и  $H_3$ .

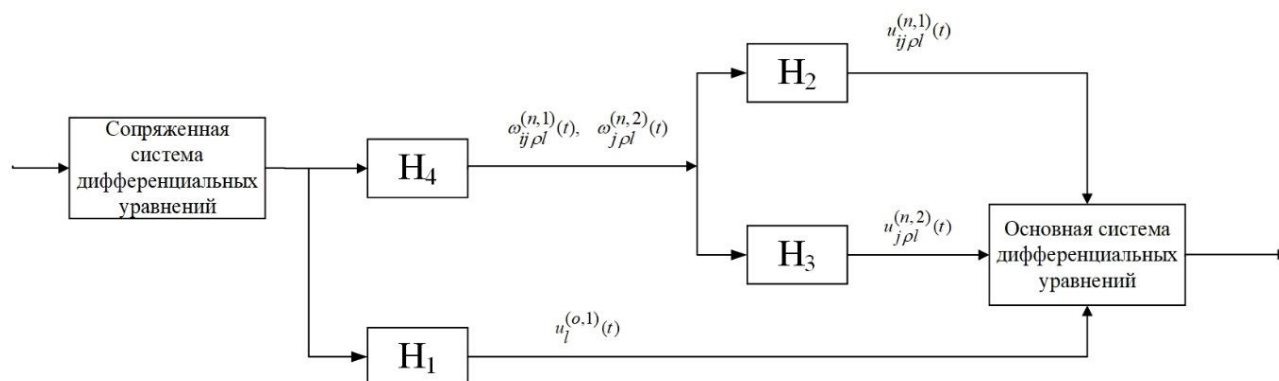


Рисунок 2.2 – Разделение функции Гамильтона на подзадачи

С использованием функции Гамильтона  $H_2$  формируется и решается подзадача планирования (программного управления) процессами приема/передачи данных. При этом в каждый момент времени выполняется максимизация Гамильтониана (2.49) на множестве ограничений (2.14). В итоге решения данной задачи ЛП [78,141] определяется с какой интенсивностью (скоростью)  $u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$  необходимо принимать/передавать из  $A_i$  ПДО в  $A_j$  данные типа  $\rho$  при ограничении на пропускную способность канала (2.17).

С использованием функции Гамильтона  $H_3$  решается подзадача обработки данных. В каждый момент времени производится максимизация Гамильтониана (2.52) на множестве ограничений (2.15) в следствие чего определяется с какой интенсивностью (скоростью)  $u_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$  необходимо обрабатывать данные типа  $\rho$  в  $A_j$  ПДО при ограничении на пропускную способность ВСр ПДО (2.18), что по сути является оптимизационной задачей ЛП.

Результаты решения задач ЛП, для которых в качестве ЦФ используются функции Гамильтона  $H_2$  и  $H_3$  в каждый момент времени подставляются в модели (2.9) и (2.10) в виде соответствующих программных управлений.

Таким образом в данном параграфе представлена новая детерминированная ДМ планирования ИнП, описывающая процессы приема, передачи, обработки и хранения данных при взаимодействии ПдО. Фактически задача программного управления ИнП с помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина сведена к двухточечной краевой задаче [69] и, как следствие, к решению в каждый момент времени на заданном интервале планирования задач ЦЛП и ЛП.

Результаты данного параграфа представлены в статье [167] соискателя ученой степени.

Вопрос межмодельного согласования при планировании ИнП с использованием СМ и ДМ будет рассмотрен в следующем параграфе.

#### **2.4 Особенности межмодельного согласования при планировании информационных процессов с использованием статической и динамической моделей**

Опираясь на содержательную постановку задачи планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО (параграф 1.3) и методологические основы решения указанной задачи (параграф 1.6) рассмотрим вопрос межмодельного согласования при планировании ИнП с использованием СМ и ДМ содержательно.

Содержание указанного межмодельного согласования сводится к следующему. На первом этапе предлагаемой процедуры межмодельного согласования с использованием СМ осуществляется формирование плана выполнения операций, входящих в ИнП, при взаимодействии Гр ПдО (параграф 2.1). В ходе расчета данного плана производится вычисление показателей качества ИнП, а именно показателя, оценивающего суммарный объем обработанной информации и показателя, оценивающего суммарный объем потерянной

информации. Решение соответствующей задачи ЛП предлагается выполнять с помощью библиотеки Matlab.

Затем полученные на СМ результаты планирования в виде объема данных, переданных между ПдО и объема данных, обработанных в ПдО на каждом участке постоянства структуры ИнВ Гр ПдО пересылаются в ДМ. Указанные данные являются краевыми условиями в указанной модели.

После этого выполняется формирование программы управления ИнП Гр ПдО с помощью ДМ планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО (параграф 2.3). При его формировании наряду с расчетом собственно программных управлений (планов) производится расчет показателей качества программного управления ИнП при взаимодействии ПдО. Для решения задач ЛП и ЦЛП в каждый момент времени на интервале планирования предлагается использовать соответствующие библиотеки Matlab.

В том случае, если при решении двухточечной краевой задачи вида (2.24)–(2.44) не будет наблюдаться сходимость соответствующих вычислительных процедур, то возможно два альтернативных варианта действий. Первый вариант связан с изменением исходных данных для СМ (изменения параметров АПК, которые могут программно перестраиваться, изменение сценариев структурной динамики, которые влияют на функциональное разнообразие вариантов синтеза управляющих воздействий). Второй вариант повышения скорости сходимости численных алгоритмов, базируется на комбинации вычислительных процедур и первый приближений при поиске программы управления ИнП с использованием ДМ.

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Разработано оригинальное полимодельное описание процесса оптимального управления информационными процессами, включающее в себя процессы приема, передачи, хранения и обработки данных в группировке

подвижных объектов. В состав полимодельного описания вошли взаимосвязанные статическая и динамическая модели. Они дополняют и усиливают описательные возможности друг друга. Так в статической модели планирования информационных операций при взаимодействии подвижных объектов достаточно просто учитываются такие факторы, как процессы потери данных, а также ограничения на пропускные способности каналов группировки подвижных объектов, которые в динамической модели требуют введения сложных фазовых ограничений. В динамической модели проводится детальное описание процессов распределения и обработки данных с привязкой к конкретным моментам времени, что затруднительно описать в статической модели. Более того, с помощью динамической моделью можно рассчитать и оптимизировать такие интегральные показатели качества управления информационными процессами как показатели равномерности и неравномерности использования ресурсов группировки подвижных объектов как на всем интервале управления, так и в каждый текущий момент времени. [168].

2. В рамках описанной в главе 1 задачи была разработана новая детерминированная динамическая модель планирования информационных процессов, включающими в себя модели программного управления процессами приема, передачи, обработки и хранения данных группировки подвижных объектов, которые также используются для расчета и оптимизации соответствующих показателей качества, а также обобщенного показателя качества, полученного в результате линейной свертки перечисленных частных показателей качества управления информационными процессами. Кроме того, была разработана статическая модель функционирования группировки подвижных объектов, топологическая структура которой изменялась по заданному сценарию на заданных интервалах времени. Из-за этого статическая модель имеет блочно-диагональную структуру, а сама задача оценивания, анализа и оптимизации показателей качества управления группировкой подвижных объектов, свелась к больше размерной задаче линейного программирования с двухсторонними

ограничениями. Результаты решения данной задачи (обобщенные объемы переданных, принятых, обработанных и сохраненных данных) передаются в динамическую модель в виде краевых условий, которые учитываются при решении задачи оптимального программного управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов. [168].

3. В статической модели происходит привязка операций, входящих в состав информационных процессов, к подвижным объектам, а в динамической модели проводится привязка уже распределенных по подвижным объектам информационных операций ко времени. Также за счет статической модели удалось отказаться от явного описания логических ограничений, используемых в логико-динамической модели, и, как следствие, перейти от сложной сопряженной системы уравнений и нелинейных ограничений, соответствующей последней модели, к упрощенной сопряженной системе уравнений и линейным ограничениям.

4. Одно из достоинств предложенного полимодельного комплекса состоит в том, что с его помощью можно единообразно (с использованием одних и тех же математических структур) формально описать как задачи комплексного (системного) моделирования процессов проактивного (упреждающего) управления информационными процессами при функционировании группировки подвижных объектов, так и задачи планирования их действий, коррекции планов (перепланирования), а также задачи оперативного управления и мониторинга их состояния, обеспечив, тем самым, корректную межмодельную координацию за счет использования единого языка описания рассматриваемых процессов [131].



### **3 КОМБИНИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

После полимодельного описания процессов планирования ИнП при взаимодействии ПдО, необходимо перейти к решению задачи разработки алгоритмов поиска соответствующих планов. Синтезируемые технологии и программы управления ИнП должны в каждый момент времени удовлетворять ограничениям, накладываемым на компоненты вектора состояния ИнП при взаимодействии Гр ПдО; функциональным ограничениям на различные типы ресурсов ПдО; ограничениям на мгновенные значения управляющих воздействий, а также оптимизировать выбранные ЦФ (показатели качества управления ИнП).

В основу разработанных комбинированных алгоритмов планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО положена многоэтапная координационно-итерационная процедура синтеза планов выполнения ИнП, построенных на основе комбинированного использования статических и ДМ, описывающих данную ПрО и представленных во 2 главе диссертации.

Также можно отметить, что результатами решения рассматриваемых задач планирования помимо плана выполнения операций, входящих в ИнП, (на СМ) и программы управления ИнП (на ДМ) при взаимодействии Гр ПдО являются рассчитанные значения показателей качества процесса планирования ИнП при взаимодействии ПдО.

Перейдем к описанию алгоритмов формирования плана ИнП при взаимодействии ПдО с использованием как СМ, так и ДМ.

### 3.1 Алгоритм планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов с использованием статической модели

Проведенный анализ показал (см. [108,109]), что задача планирования ИнП при взаимодействии ПдО может быть сведена к многокритериальной задаче ЛП, имеет блочно-диагональную структуру матрицы ограничений, которая слабо заполнена (см. соотношения (2.1)–(2.7)), поэтому предлагается следующая декомпозиция процесса ее решения. Используя разработанную СМ предлагается реализовать следующий алгоритм построения плана выполнения операций, входящих в ИнП, Гр ПдО:

**Шаг 1.1.** Получение исходных данных от пользователя через интерактивный графический интерфейс или автоматически с помощью генератора исходных данных для формирования ограничений вида (2.3)–(2.7), а также задания планируемых объемов данных, поступающих в Гр извне на каждом участке постоянства структуры  $x_{jl}^{(ex)}$  и содержащих сведения о КнО.

**Шаг 1.2.**  $l=1$ . Интерпретация исходных данных для решения задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО, сведенной к многокритериальной задаче ЛП большой размерности.

**Шаг 1.3.** Решение многокритериальной задачи ЛП большой размерности.

**Шаг 1.4.** Формирование результатов решения задачи ЛП, полученных на  $l$ -ом подынтервале постоянства структуры (объем данных, который был сохранен в ЗУ на  $l$ -ом подынтервале на следующем участке будет храниться в  $y_{j\rho(l-1)}$ ), и представление их в удобном для последующего использования виде (в частности, на последующих подынтервалах постоянства структуры).

**Шаг 1.5.** Если  $l \leq L$ , то  $l=l+1$ , возврат на шаг 1.3 и повторение шагов 1.3–1.4, иначе переход на шаг 1.6.

**Шаг 1.6.** «Формирование и интерпретация выходных результатов, представление их в удобном для последующего использования виде (например, для

дальнейшего применения в ДМ планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии ПДО» [169].

**Шаг 1.7.** Визуализация структурной динамики ПДО, сформированной с помощью СМ.

Разработанные СМ и алгоритм планирования ИнП при взаимодействии ПДО, позволяют решать различные варианты задач планирования (программного управления) рассматриваемыми процессами для различных сценариев реализации соответствующей структурной динамики конкретной Гр ПДО. В результате решения указанных задач формируются массивы выходной информации о переданных данных между ПДО, а также сохраненных, обработанных и потерянных при информационном взаимодействии ПДО на каждом подынтервале постоянства структуры.

Результаты данного параграфа представлены в статье [167] соискателя ученой степени.

Перейдем к алгоритму поиска программного управления ИнП при взаимодействии ПДО с использованием ДМ.

### **3.2 Алгоритм поиска программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов с использованием динамической модели**

Обобщенный алгоритм поиска плана управления ИнП [151] базируется на МПП Крылова-Черноусько [94,140]). Данный алгоритм включает в себя следующие основные шаги:

**Шаг 2.1.** Запуск счетчика выполненных итераций, обозначим текущий номер итерации как  $r=1$ , где  $r$  – номер итерации. Задается диспетчерский (допустимый) план (программа управления ИнП, которая задается с участием ЛПР; в том числе может быть задан нулевой диспетчерский план  $u_{об}^{(discn)}(t) \equiv 0$ ). Под

диспетчерским планом понимаем допустимый (удовлетворяющий ограничениям) программа управления Гр ПДО на каждом подынтервале постоянства структур.

**Шаг 2.2.** Подсчитывается значение обобщенного показателя качества  $J_{об}$  по формуле (2.34) для момента времени  $t = t_{fl}$ , то есть получаются значения функционала (ЦФ), которые соответствуют диспетчерскому решению, реализованному на шаге 2.1. На этом заканчивается итерация с номером  $r = 1$ , и начинается итерация  $r = 2$ .

**Шаг 2.3.** Рассчитываются условия трансверсальности (2.40)–(2.44), которые переносятся с «правого» конца фазовой траектории движения обобщенной ДС вида (2.8)–(2.12) на «левый» конец.

**Шаг 2.4.** Осуществляется выход на основную фазу итерационного поиска плана выполнения операций, входящих в ИнП. В каждый момент времени, проводится максимизация функции Гамильтона вида (2.45), исходя из ограничений (2.13)–(2.23), и одновременно осуществляется поиск программного управления, как функции начальных условий и времени,  $u^{(r)}(t)$  для  $\forall t \in [t_{ol}, t_{fl}]$ . Найдя значения управляющих воздействий при максимизации функции Гамильтона  $H_4$ , которые позволяют начать проводить (см. рисунок 2.2) параллельно максимизацию функций Гамильтона  $H_2$  и  $H_3$ , в ходе которой определяем с какой интенсивностью (скоростью) осуществляется прием/передача данных и с какой интенсивностью (скоростью) осуществляется обработка данных. Вычисляется также значение обобщенного показателя качества  $J_{об}$  по формуле (2.34).

**Шаг 2.5.** В результате выполнения шагов 2.3–2.4 в момент времени  $t = t_{fl}$  определяются значения функций:  $x^{(r)}(t_{fl})$ ,  $\eta^{(r)}(t_{fl})$ , а затем осуществляется проверка условия:

$$\left| J_{об}^{(r)}(t_{fl}) - J_{об}^{(r-1)}(t_{fl}) \right| < \varepsilon, \quad (3.1)$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность.

Если выполняется условие (3.1), то осуществляется выход из цикла, вывод на экран графиков  $x^{(r)}(t)$ ,  $u^{(r)}(t)$ ,  $\eta^{(r)}(t)$ ,  $J_m(t)$ ,  $J_{об}(t)$ . Если данное условие не выполняется, то  $r = r + 1$ , переход на **шаг 2.3** и повторение **шагов 2.3–2.5** данного алгоритма.

Разработанные ДМ и алгоритм поиска программного управления ИнП при взаимодействии ПДО, позволяют решать различные варианты задач планирования (программного управления) рассматриваемыми процессами для различных сценариев реализации соответствующей структурной динамики конкретной Гр ПДО. В результате решения указанных задач формируется программа управления ИнП Гр ПДО. Тем самым удается привязать ко времени и детализировать план выполнения операций, входящих в ИнП, при взаимодействии Гр ПДО.

Результаты данного параграфа представлены в статье [167] соискателя ученой степени.

Перейдем к алгоритмам оценивания робастности планов и программного управления ИнВ Гр ПДО.

### **3.3 Алгоритмы оценивания робастности планов информационного взаимодействия группировки подвижных объектов**

Под робастностью будем понимать нечувствительность результатов планирования к изменению исходных данных. Рассмотрим комбинированные алгоритмы оценивания робастности [170,171] планов выполнения ИнП при взаимодействии Гр ПДО. При его разработке использовались результаты, которые были ранее получены в работах [119,131,181]. Предлагаемый алгоритм включает в себя следующие основные шаги:

**Шаг 3.1.** Подготовка переменных, полученных из СМ планирования ИнП при взаимодействии ПДО.

**Шаг 3.2.** Решение двойственной задачи ЛП.

**Шаг 3.3.** Поиск интервалов нечувствительности сформированных планов выполнения ИнП к изменению исходных данных (весовых коэффициентов в выражении ЦФ, параметров в ограничениях модели).

**Шаг 3.4.** Вывод на печать границ интервалов робастности для весовых коэффициентов в выражении ЦФ, параметров в ограничениях модели.

Границы интервалов робастности исходных данных и их допустимые изменения позволяют оценить робастность [55,145] (нечувствительность) полученного плана выполнения операций, входящих в ИнП, Гр ПдО и возможность сохранения плана при изменении его исходных данных без повторных вычислений.

Рассмотрим алгоритм формирования областей достижимости (ОД) [17,28,44,45] по возмущениям в пространстве показателей для оценки робастности полученных программ управления ИнП. Подробно порядок задания интервально-заданных возмущающих воздействий был рассмотрен в [131]. ОД ДС вида (2.8)–(2.12) под воздействием возмущений обозначим как:

$$D_{\chi}^{(\xi)}(t_f, t_0, X_0, \Xi, \vec{u}_i). \quad (3.2)$$

Отметим, что ОД [46,49,52,58] является фундаментальной характеристикой любой ДС. Если ОД [86,90,92,111] известна, ее основные характеристики, по существу, заменяют собой всю необходимую информацию о динамике системы, стабильности ее функционирования и производительности. «Знание ОД [164,181,180] управляемой системы позволяет оценить предельные возможности СУ, выбрать оптимальное или субоптимальное управление. ОД [159,163,165,171] несут в себе концентрированную информацию о структурной динамике, а также общеизвестно, что сведения об ОД и ее основных характеристиках, по существу, заменяют собой всю информацию, необходимую для решения задач оценивания возможностей любой ДС, устойчивости ее функционирования, синтеза вариантов создания и развития указанных систем. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что при решении всех перечисленных задач в условиях большой размерности векторов и системы ограничений, построение ОД представляет собой исключительно

сложную проблему. Поэтому на практике вместо непосредственного построения ОД осуществляют ее аппроксимацию различными способами [162]» [120].

На основе построения и аппроксимации ОД решаются многие задачи ТОУ [4,11,14,27], играющие важную роль при решении задач управления, наблюдения и прогнозирования. Так, точное или приближенное знание ОД [29,33,63,77] управляемой системы позволяет оценить предельные возможности СУ, выбрать оптимальное или субоптимальное управление.

Для оценивания робастности программы управления ИнП Гр ПдО используются функции  $\xi_{ij}^{(b,1)}$ ,  $\xi_j^{(b,2)}$  ((2.22)–(2.23)), которые задают возможные варианты возмущающих воздействий (целенаправленных, индифферентных, неизвестных, либо их комбинаций) на соответствующие компоненты Гр ПдО со стороны внешней среды, а также аппроксимированная ОД по возмущениям. Рассматривается двухмерный случай аппроксимации ОД по возмущениям, то есть для двух показателей качества ДМ.

В [57,129,131] было отмечено, что «множеству (3.2) в пространстве состояний соответствует множество точек (область) в пространстве значений показателей, оценивающих эффективность и устойчивость функционирования Гр ПдО, которое обозначим как:

$$D_J^{(\xi)}(t_f, t_0, X_0, \Xi, \bar{u}_i). \quad (3.3)$$

Чтобы повысить визуализацию дальнейшего изложения будем вести изложение для двух компонентов векторного показателя из разработанной ДМ, которые соответствуют показателям, характеризующим суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения операций, в рамках соответствующих ИнП ( $J_2$ ) и выполнение краевых условий ( $J_4$ ) в процессе планирования ИнП при взаимодействии ПдО.

Для построения ОД [91,115,169] (3.2) воспользуемся сокращенным вектором показателей качества функционирования Гр ПДО (состоящего из  $J_2$  и  $J_4$ ). Представим данный вектор в следующем виде:

$$\vec{J}' = \|J_2, J_4\|^T. \quad (3.4)$$

Пусть в пространстве показателей задана некоторая область  $P_J$  (рисунок 3.1).

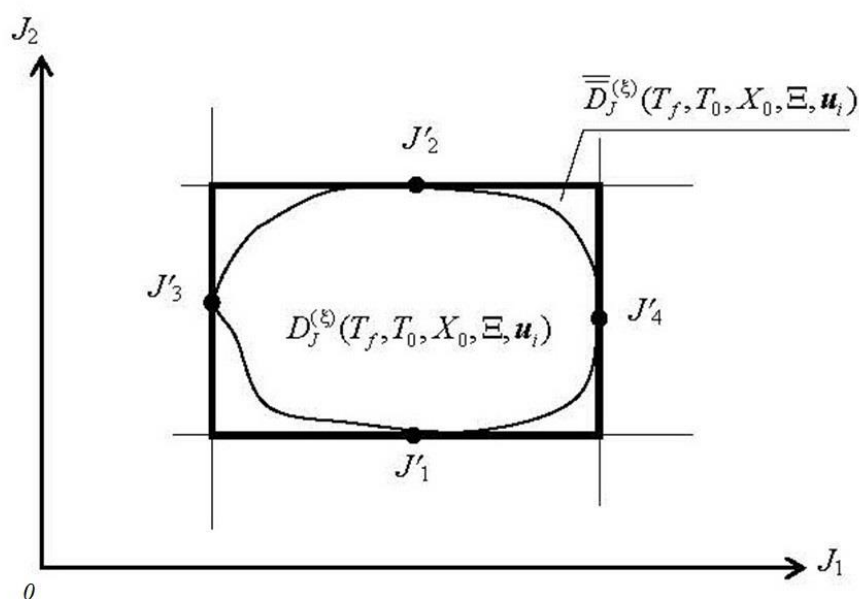


Рисунок 3.1 – Внешняя аппроксимация ОД ДС [129,131]

«Исследования показывают, что точное построение ОД [11,115,181,180] является чрезвычайно трудной (в вычислительном плане) задачей даже при использовании современных компьютеров и в практических приложениях обычно ограничиваются аппроксимацией ОД с требуемой точностью [114] вместо их непосредственного построения. В качестве примеров можно привести подходы к построению аппроксимации ОД, базирующиеся на решении соответствующих задач оптимального управления, на построении различных классов эллипсоидов [114] и т.п.» [57,129,131].

В данной диссертации построение и аппроксимация множества вида (3.3) основано на многократном решении задач планирования ИнП оптимизирующих



показатель качества управления ИнП следующего вида  $\vec{J} = \|J_2, J_4\|$ . Точность аппроксимации ОД определяется общим числом точек в пространстве ЦФ, для которых производится моделирование того или иного сценария реализации возмущающих воздействий и расчет соответствующих управляющих воздействий. В результате указанного моделирования можно получить внешнюю аппроксимацию множества (3.3), которую обозначим следующим образом:

$$\overline{D_J^{(\xi)}}(t_f, t_0, X_0, \Xi, \vec{u}_i). \quad (3.5)$$

Аппроксимация ОД должна осуществляться для каждой из программ управления Гр ПДО  $u_i$ , ( $i = 1, \dots, 4$ ) для каждого фиксированного сценария возмущающих воздействий  $\vec{\xi}_j(t)$ , ( $j = 1, \dots, m$ ).

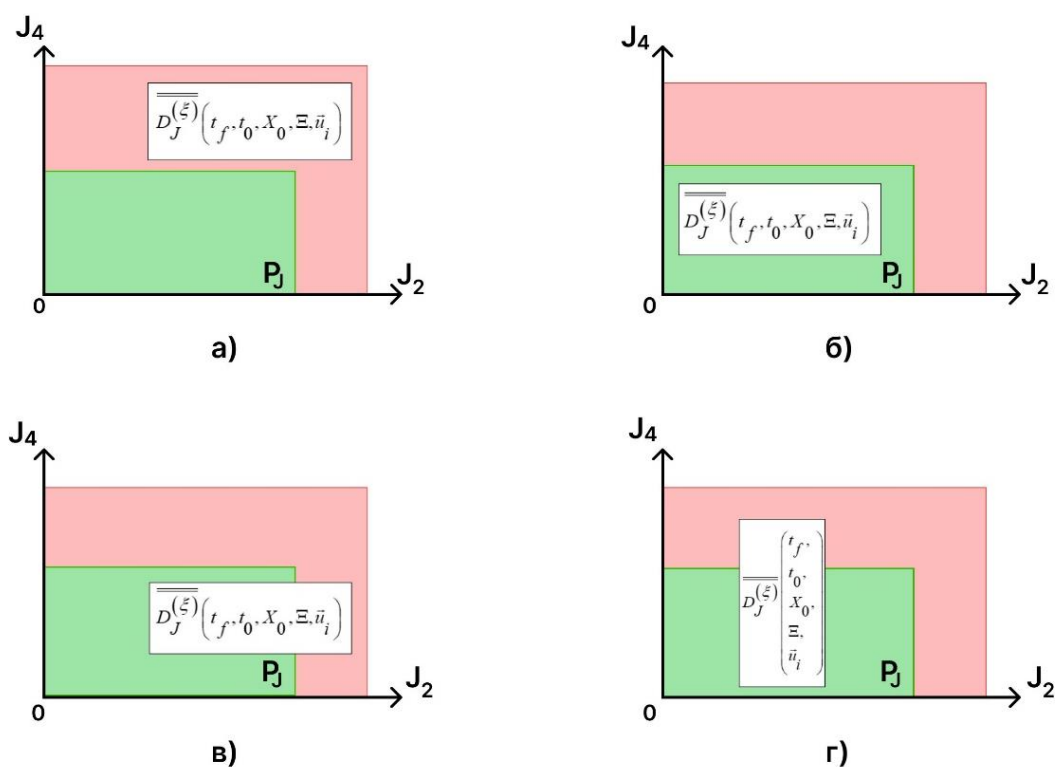


Рисунок 3.2 – Наиболее характерные случаи взаимного расположения ОД и недопустимых значений показателей качества

Существуют наиболее характерные случаи взаимного расположения областей  $P_J$  и  $\overline{D_J^{(\xi)}}$  (рисунок 3.2) для различных программ управления Гр ПдО.

При этом можно утверждать следующее:

– в случае (а) отклонение значений показателей качества программного управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО, вызванные возмущениями, недопустимы, а соответствующая программа управления – не робастна (чувствительна) к воздействию этих возмущений;

– в случае (б) возможные отклонения значений показателей качества программного управления ИнП (соответствующими показателями качества), вызванные возмущениями, являются допустимыми, а соответствующая программа управления ИнП робастна (нечувствительна) по отношению к воздействию возмущений;

– в случае (в) программа управления Гр ПдО чувствительна (нечувствительна) к воздействию возмущений, причем эти возмущения в большей степени влияют на показатель, характеризующий суммарное интегральное качество выполненных операций, входящих в соответствующие ИнП  $J_2$ ;

– в случае (г) программа управления Гр ПдО чувствительна (нечувствительна) к воздействию возмущений, причем эти возмущения в большей степени влияют на стратегию расходования ресурсов  $J_4$ .

В [57] было предложено «окончательный выбор наиболее робастных программ управления ДС (ИнП) в этом случае целесообразно проводить, исходя из следующего условия

$$S_J(\vec{u}_i(t)) = \min_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} S_J(\vec{u}_i(t)), \quad (3.6)$$

где  $S_J(\vec{u}_i(t))$  – площадь пересечения областей  $D_J^{(\xi)}(t_f, t_0, X_0, \Xi, \vec{u}_i)$  и  $P_J$ ;

$n$  – общее количество анализируемых программ управления ИнП Гр ПдО;  $m$  – общее количество сценариев возмущающих воздействий на этапе реализации программ управления ИнП Гр ПдО».

Таким образом, на основе вышеизложенного может быть предложен следующий алгоритм оценивания робастности планов выполнения операций, входящих в ИнП, который является естественным продолжением ранее описанного алгоритма поиска программного управления (параграф 3.2).

**Шаг 4.1.** Выполняется перенос краевых условий сопряженной системы уравнений (2.35)–(2.39) с «правого конца» траектории движения фазовой точки в сопряженном пространстве на «левый конец» данной траектории. При этом, как показывает анализ правых частей дифференциальных уравнений, описывающих данную систему уравнений, она имеет начальные условия, которые равны краевым условиям на «правом» конце фазовой траектории при расчете условий трансверсальности вида (2.40)–(2.44). Проведенные исследования показали, что каждому вектору начальных условий основной и сопряженной систем уравнений, полученному в результате итерационного поиска решения двухточечной краевой задачи, может быть поставлен соответствующий план выполнения ИнП, связанный с приемом, передачей, обработкой данных и информации.

**Шаг 4.2.** Проводится интегрирование основной системы уравнений (2.8)–(2.12) с учетом ограничений (2.13)–(2.23) и краевых условий (2.24)–(2.27). При этом в каждый момент времени максимизируется функция Гамильтона (2.45) на основе решения соответствующих задач ЛП и ЦЛП, что позволяет сформировать программу управления ИнП и рассчитать в пространстве целевых показателей координаты первой точки для случая, когда возмущения на информационные ресурсы не производятся.

**Шаг 4.3.** ЛПР задает величины возмущений для функций  $\xi_j^{(b,2)}$  и  $\xi_{ij}^{(b,1)}$  из интервала  $[0,1]$ .

**Шаг 4.4.** Поиск программного управления ИнП для функции  $\xi_{ij}^{(b,1)}$  по алгоритму, описанному в параграфе 3.2. В результате на **шаге 4.4** рассчитываются координаты второй точки аппроксимированной ОД для случая, когда проводится

возмущение на величины интенсивностей передачи данных и информации по каналам связи, обеспечивающим взаимодействие Гр ПдО (см. ограничение (2.17)).

**Шаг 4.5.** Вычисление программного управления ИнП для функции  $\xi_j^{(b,2)}$  по алгоритму, описанному в параграфе 3.2. В результате на **шаге 4.5** рассчитываются координаты третьей точки для случая, когда накладывается возмущение на величины интенсивности обработки данных и информации, производимой на борту ПдО (см. ограничение (2.18)).

**Шаг 4.6.** Поиск программного управления ИнП для функций  $\xi_j^{(b,2)}$  и  $\xi_{ij}^{(b,1)}$  по алгоритму, описанному в параграфе 3.2. В результате на **шаге 4.6** получаем координаты четвертой точки для случая, когда одновременно проводится возмущение на величины интенсивностей передачи данных и информации по каналам связи, обеспечивающим взаимодействие Гр ПдО, а также на величины интенсивности обработки данных и информации, производимой на борту ПдО.

**Шаг 4.7.** Получив необходимые координаты для четырех точек на **шагах 4.4-4.6**, выполняется построение аппроксимированной ОД по возмущениям в пространстве показателей, которая формируется как четырехугольник, и расчет площади.

**Шаг 4.8.** Если количество планов больше 1, то повтор **шагов 4.1-4.7** пока не будут построены все аппроксимированные ОД для соответствующих программ управления ИнП, иначе переход на **шаг 4.9**.

**Шаг 4.9.** ЛПР формирует в пространстве ЦФ границы запретной зоны (и допустимой зоны). Границы данной зоны задаются исходя из физического содержания решаемой прикладной задачи и используемых показателей качества управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО.

**Шаг 4.10.** Осуществляется поиск наиболее робастной программы управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО (программы управления ИнП при

взаимодействии Гр ПдО). Данный план характеризуется максимальной площадью пересечения аппроксимированной ОД с допустимой зоной.

Полученная геометрическая фигура, построенная на основе четырех точек, является аппроксимированной ОД в пространстве показателей качества планирования и позволяет найти верхнюю оценку значений рассматриваемых показателей качества управления ИнП при воздействии на АПК Гр ПДО интервально заданных возмущений.

Перейдем к описанию обобщенной многоэтапной процедуры планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО.

### 3.4 Обобщенная процедура планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов с использованием комбинированных моделей

Для решения исходной задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО была разработана обобщенная многоэтапная координационно-итерационная процедура расчета плана ИнВ Гр ПдО. Параметрами координации являются краевые условия (2.24)–(2.27) и сопряженные переменные (2.40)–(2.44).

Рассмотрим, как можно использовать разработанные **алгоритмы решения задач планирования ИнП** при взаимодействии Гр ПдО в рамках предложенной многоэтапной координационно-итерационной процедуры синтеза агрегированного и детального планов выполнения ИнО (рисунок 3.3):

**Шаг 5.1.** Расчет плана операций, входящих в ИнП, при взаимодействии ПдО с использованием СМ (параграф 3.1).

**Шаг 5.2.** Подготовка исходных данных (заданный в СМ объем данных, переданных между ПдО на каждом участке времени  $x_{ij\rho l}$  и объем данных, который был запланирован в СМ для обработки в каждом ПдО на каждом подынтервале времени  $g_{j\rho l}$ ) для передачи их из СМ в ДМ.

**Шаг 5.3.** По запросу пользователя в СМ выполняется сохранение исходных данных, а также исходных данных для ДМ (количество ПдО и участков постоянства структуры) во временный файл \*.mat.

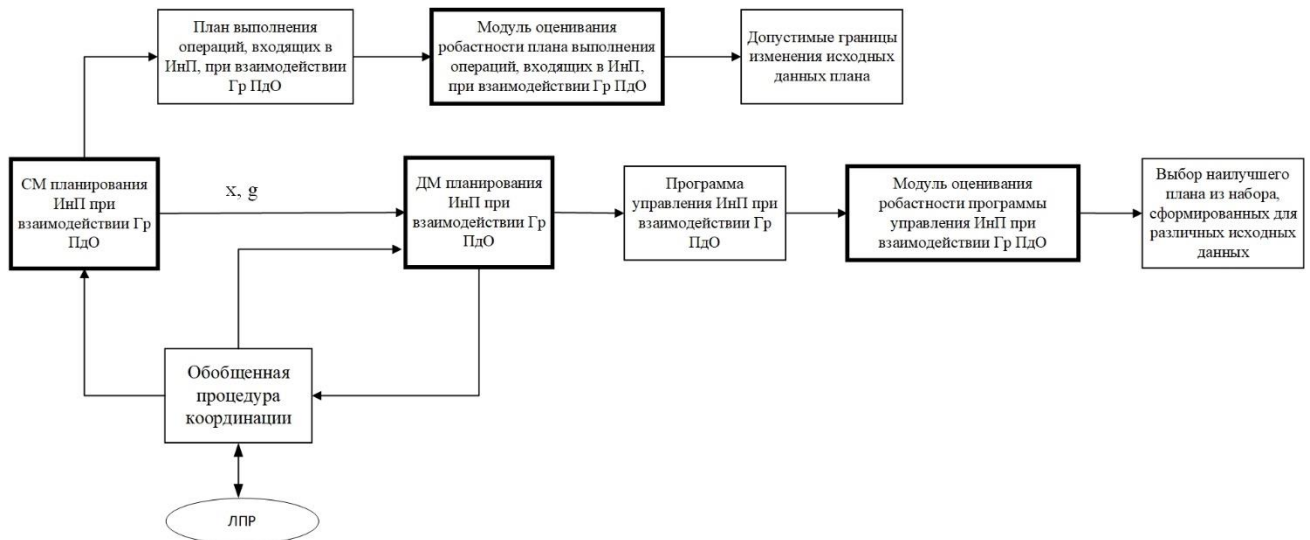


Рисунок 3.3 – Обобщенная процедура планирования ИнП при взаимодействии ПдО м использованием СМ и ДМ

**Шаг 5.4.** Оценка робастности полученного плана выполнения операций, входящих в ИнП, Гр ПдО с использованием соответствующего алгоритма (параграф 3.3).

**Шаг 5.5.** По запросу пользователя в ДМ выполняется выгрузка сохраненных данных из временного файла \*.mat. В ДМ исходные данные из СМ используются в виде краевых условий, которые учитываются при решении задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО. В противоположном случае у пользователя есть возможность ввести эти данные вручную.

**Шаг 5.6.** Удаление временного файла \*.mat.

**Шаг 5.7.** Итерационный поиск программного управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО с использованием ДМ (параграф 3.2). Если итерационный процесс успешно завершился, то осуществляется переход на **шаг 5.9**.

**Шаг 5.8.** В случае, когда не удалось за конечное число итераций получить программу управления ИнП Гр ПдО с применением ДМ осуществляется формирование сообщения об отсутствии сходимости, а также из имеющихся детальных планов выбирается наиболее предпочтительный. Далее осуществляется формирование координирующих параметров и возврат в СМ или ДМ для корректировки исходных данных с участием ЛПР.

**Шаг 5.9.** Оценка робастности полученного плана и программного управления ИнВ Гр ПдО (параграф 3.3).

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Предложены частные алгоритмы планирования для статической и динамической моделей, которые были объединены в оригинальный обобщенный комбинированный алгоритм (процедура) оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, базирующийся на статической и динамической моделях, используя который, удалось исходную задачу планирования информационных процессов декомпозировать по числу подынтервалов постоянства структуры, а также описать взаимодействие между этими декомпозированными задачами (моделями) на основе обобщенной интерактивной многоэтапной разработанной итерационной процедуры использует соответствующие краевые условия как параметры координации. Оригинальность состоит в системно-управленческой интерпретации исследуемых процессов, позволившей на конструктивном уровне объединить математический аппарат математического программирования и ТОО при синтезе планов (выборе информационных технологий), а также программ управления информационными процессами.

2. Задача планирования информационных операций с использованием статической модели сведена к задаче линейного программирования, а задача планирования информационных процессов с использованием динамической модели к двухточечным краевым задачам [69]. Как показал анализ, объемы данных, переданные из одного подвижного объекта в другой на некотором интервале постоянства структуры и объемы данных, обработанные в подвижном объекте на некотором интервале постоянства структуры являются самыми чувствительными параметрами разработанной динамической модели. Следовательно, при отсутствии сходимости численных процедур решения двухточечных краевых задач, к которым сводятся задачи планирования на динамической модели, целесообразно

использовать статическую модель для повторного формирования указанных данных.

3. Главное достоинство разработанного алгоритма поиска программ управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов с использованием динамической модели заключается в том, что при его реализации осуществляется динамическая декомпозиция исходной большеразмерной нестационарной задачи теории расписаний на множества подзадач планирования малой размерности, относящихся к различным классам задач математического программирования.

4. В основу алгоритма решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов был положен модифицированный алгоритм метода последовательных приближений Крылова-Черноусько, который показал достаточно быструю сходимость при условии задания хорошего первого приближения вектора сопряженной системы уравнений [41,120,140]. Исследования показали, что в качестве диспетчерского решения в рассматриваемой задаче неклассического вариационного исчисления может быть даже выбран нулевой вектор управления.

5. Взаимосвязь статической и динамической моделей в рамках предложенного комбинированного алгоритма осуществлена через терминальные показатели качества Майера, позволившие результаты решения задачи синтеза плана выполнения информационных операций задать в виде краевых условий, которые должны быть выполнены в ходе итерационного поиска соответствующих программ планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Таким образом, результаты решения задачи (объемы переданных, принятых, обработанных и сохраненных данных) передаются в динамическую модель в виде краевых условий, которые учитываются при решении задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов [168].



6. В результате решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов получаем не только программы управления информационными процессами группировки подвижных объектов, но и оптимальные значения показателей качества программного управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов.

7. Для того, чтобы оценить робастность (нечувствительность) синтезированного программного управления информационным процессом по отношению к различным классам возмущающих воздействий предложено в пространстве показателей качества планирования построить аппроксимированную область достижимости для динамической модели, описывающей исследуемые процессы. Достоинством разработанного алгоритма оценивания робастности указанных программ управления на основе аппроксимированной области достижимости является высокая наглядность ее представления в виде того или иного геометрического образа, что позволяет лицу, принимающему решение с высокой оперативностью и обоснованностью выбирать наиболее предпочтительный план информационного взаимодействия группировки подвижных объектов. Алгоритм базируется на результатах использования комбинированного метода многокритериального принятия управленческих решений, основывающегося на методе последовательных приближений (МПП) и методе построения аппроксимированных областей достижимости (ОД) в пространстве показателей качества планирования.

#### **4 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В условиях постоянно растущей сложности решаемых научных задач актуальным становится применение средств вычислительной техники для проведения расчетных операций. При этом требуется построение компьютерных моделей, реализующих различные методы решения математических задач.

Для подтверждения возможности практической реализации разработанных в диссертации комбинированных алгоритмов и моделей оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО был создан программный прототип (макет) (ПрП) соответствующего СМАО [174]. Ранее в главах 2 и 3 было проведено теоретическое обоснование моделей, методов и алгоритмов, которые составляют ядро (центральную подсистему) рассматриваемого СМАО.

Создание программного прототипа СМАО невозможно без предварительного определения и обоснования требований, предъявляемых к его основным компонентам и подсистемам.

##### **4.1 Обоснование требований, предъявляемых к облику прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии подвижных объектов**

При проектировании программного прототипа СМАО, реализующего соответствующие модели и алгоритмы, необходимо учесть требования, предъявляемые к прототипу СМАО с учетом специфики, решаемых в Гр ПдО задач. В общем случае данные требования можно разделить на общие и частные.

Общие требования определяют функциональные возможности созданного прототипа, позволяющие решать различные классы прикладных задач, в то время как частные требования связаны с процессами построения и эксплуатации таких программных систем [120,147].

К числу общих требований, которые предъявляются к программному прототипу СМАО, относятся следующие требования [112,117,127,134,135,142,143,144,147]:

- обоснованность принимаемых решений, подтверждаемая многократными расчетами и тестами;
- обеспечение заданного уровня адекватности моделирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО [105,137,139];
- простота масштабирования, модификации, тиражирования, и использования программного прототипа СМАО.

К частным требованиям, предъявляемым к основным элементам и подсистемам, можно отнести следующие требования [123,125,127,147]:

- простота и оптимальность построения каждого конкретного входящего в ПрП СМАО программного модуля (программной подсистемы) для обеспечения заданной адекватности моделирования;
- эффективная машинная реализация комплекса моделей;
- корректность и доступность каждого программного модуля, входящего в состав ПрП;
- алгоритмическая и программная надежность функционирования СМАО.

Применительно к процессу оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО целесообразно использовать полимодельное (статически-динамическое) описание данной системы, комбинированные алгоритмы, а также разработку многоэтапных процедур ПрР в условиях многокритериальности и неопределенности.

Рассмотрим дополнительные частные требования, предъявляемые к разрабатываемому программному прототипу СМАО [59,62, 129]:

- интерфейс прототипа должен быть удобным для пользователя и не требовать навыков программирования;
- возможность подключения сторонних библиотек (или модулей) для решения задач ЛП и ЦЛП;
- необходимо иметь встроенные возможности формирования пользовательского интерфейса (форм);
- результаты моделирования могут использоваться в приложениях сторонних производителей;
- должна быть обеспечена наглядная визуализация результатов моделирования.

Перейдем непосредственно к разработке программного прототипа СМАО, описанию его спецификации и его модулей.

#### **4.2 Программная реализация прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения, описание его спецификации и модулей**

Из проведенного в параграфе 4.1 обзора, становится ясно, что существующие подходы не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к уровню детализации и качеству решения исследуемых задач оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО. С другой стороны, на сегодняшний день применение МППП стало стандартом при разработке СМАО, при проведении научных исследований и предпочтительным методом КМ. Поэтому, в качестве МППП был выбран Mathworks Matlab [20,179], так как отлично подходит для проектирования и анализа систем, работы с вычислительной математикой и матрицами. Языком программирования был выбран Matlab language, так как лучше всего подходит для визуализации моделирования, что на взгляд автора является важнейшим требованием к ПО, а также в его состав входят predefined функции из

Optimization Toolbox для решения задачи ЛП и задачи «о назначениях» (ЦЛП), к решению которых сводится задача оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО на основе СМ и которые решаются в каждый текущий момент времени при максимизации функции Гамильтона в случае использования ДМ [168]. «Средой разработки визуализации (интерфейса пользователя) предложено использовать Matlab App Designer. Данный набор включает в себя библиотеки для построения пользовательских интерфейсов, визуализации данных» [168]. Дополнительными преимуществами является кроссплатформенность кода, возможность достаточно легкого распространения разработанного прототипа СМАО, а также оперативного вывода на экран и печати результатов решения задач планирования. На рисунках 4.1 и 4.2 приведен пример главного окна СМ.

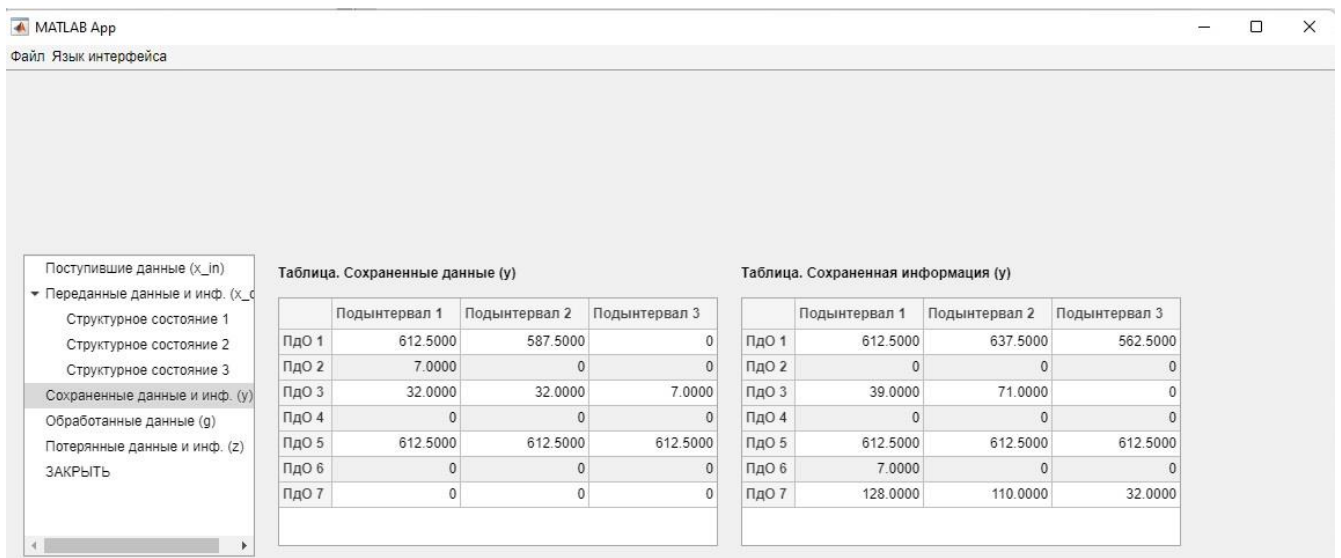


Рисунок 4.1 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый при решении задачи планирования информационных операций с использованием СМ (вид 1)

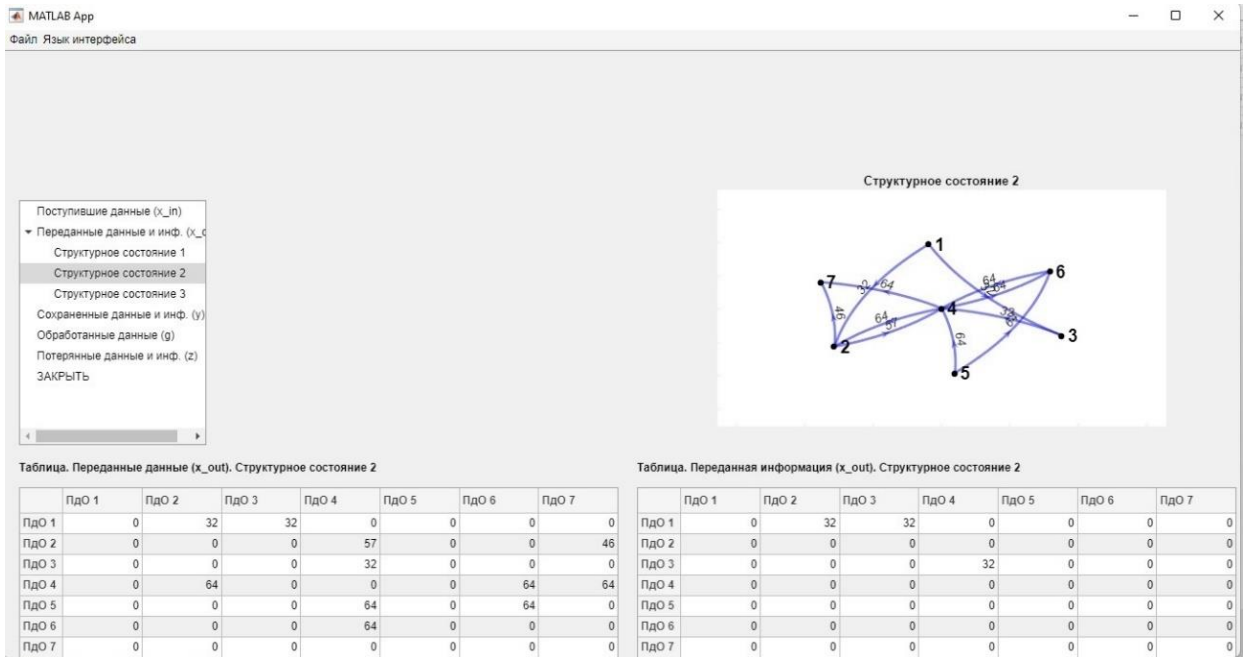


Рисунок 4.2 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый при решении задачи планирования информационных операций с использованием СМ (вид 2)

На этапе проектирования программного прототипа СМАО была разработана его спецификация и описана его структура (рисунок 4.8). Данный прототип состоит который состоит из следующих основных модулей (компонентов):

**1 Модуль (компонент) генерации исходных данных** (рисунок 4.3)

позволяет осуществить генерацию параметров  $V_j$ ,  $\varphi_{jl}$ ,  $\psi_{ijl}$  и  $x_{jl}^{(ex)}$  в заданном диапазоне  $[\min, \max]$ . Количество ПДО, участков постоянства структуры и  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  задаются пользователем вручную, при этом  $M_{jl}^-$  и  $M_{jl}^+$  (матрица смежности) могут быть определены либо из набора шаблонов, либо введена вручную.

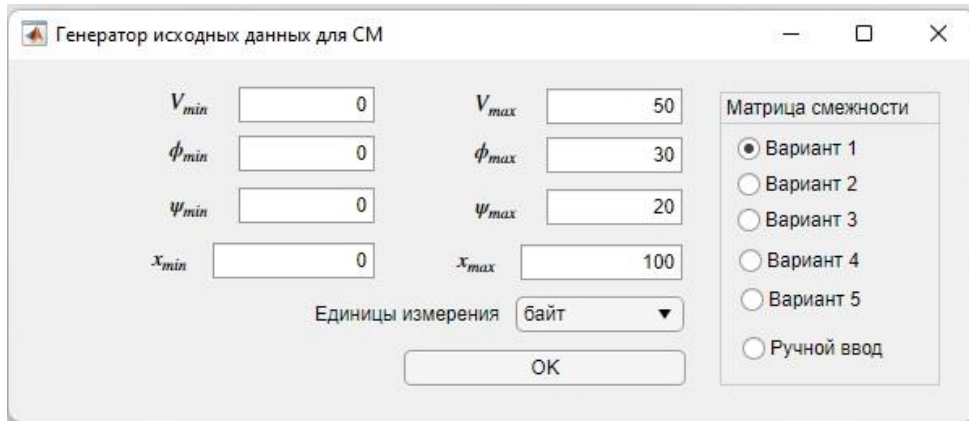


Рисунок 4.3 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый для генерации исходных данных в СМ

## 2 Модуль (компонент) ручного ввода исходных данных (рисунок 4.4)

обеспечивает ввод всех исходных данных пользователем с клавиатуры.

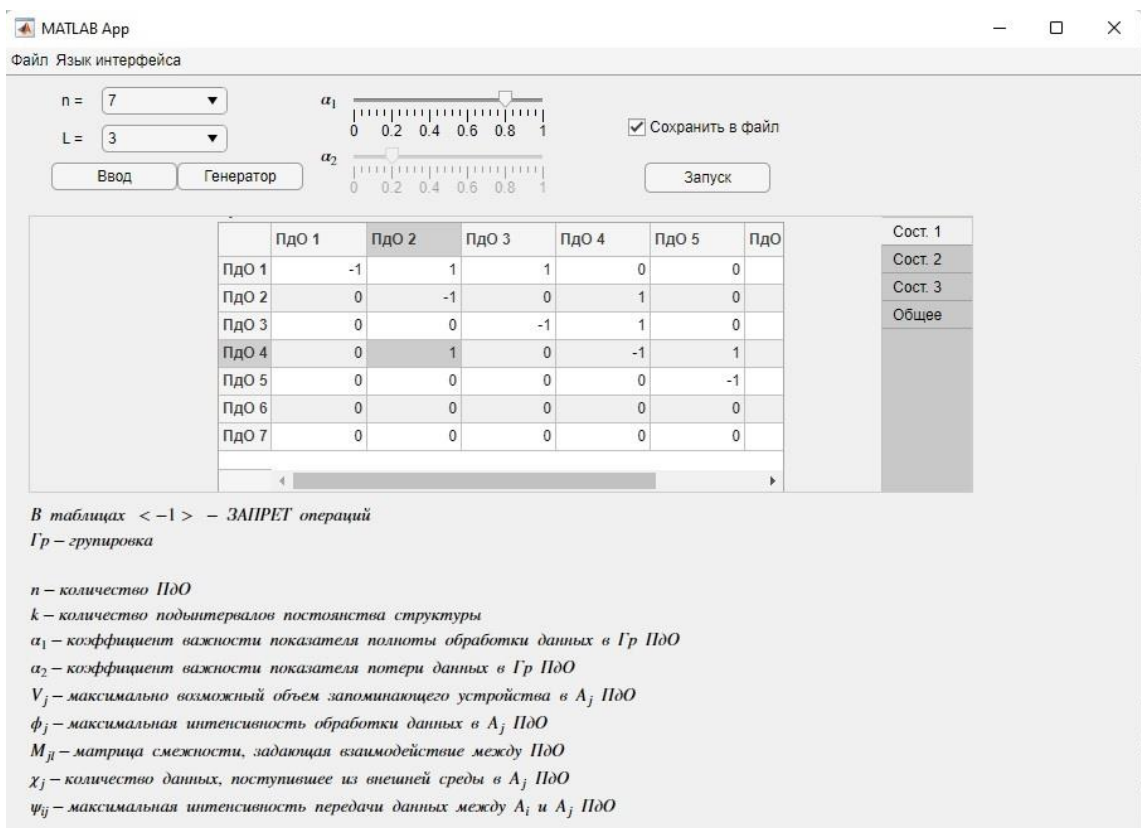


Рисунок 4.4 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый для ввода исходных данных в СМ

## 3 Модуль (компонент) загрузки исходных данных из файла

(рисунок 4.5) предоставляет возможность загрузить исходные данные из файла \*.mat.

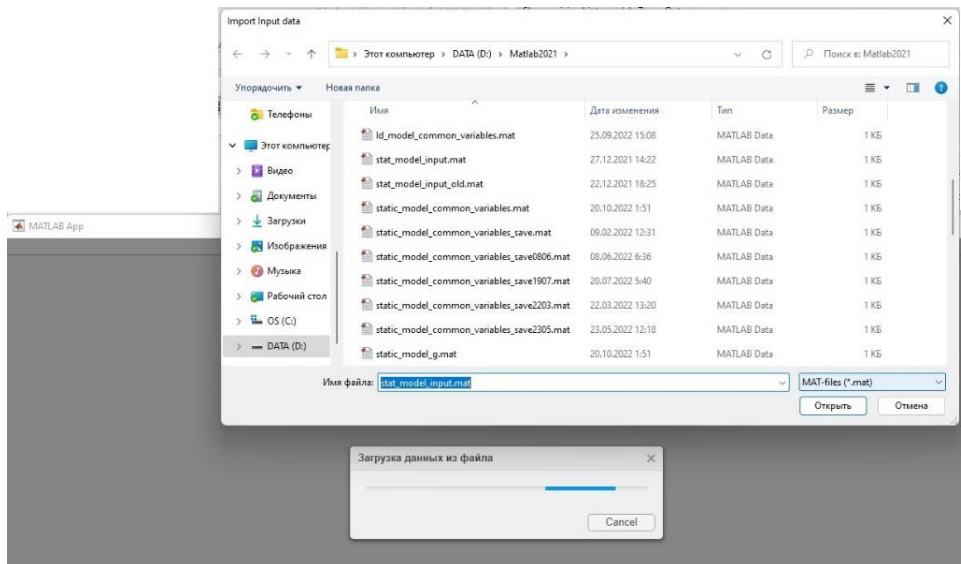


Рисунок 4.5 – Отображение процесса загрузки исходных данных для СМ из файла \*.mat

4 **Модуль (компонент) построения структурных состояний Гр ПдО и расчета показателей качества** осуществляет отображение полученных данных, плана выполнения операций, входящих в ИнП Гр ПдО, показателей функционирования СМ и структурных состояний (пример последних показан на рисунке 4.6).



Рисунок 4.6 – Визуализация структурных состояний, полученных с помощью МППП Matlab

5 **Модуль (компонент) расчета плана выполнения операций, входящих в ИнП** выполняет решение задачи синтеза технологии управления и плана выполнения операций, входящих в ИнП, при взаимодействии Гр ПдО (содержание данных задач описано в параграфе 2.1) и приведение исходных данных, введенных пользователем, в формат, требуемый внешнему модулю решения задачи ЛП.



6 **Внешние (компонент) модули решения задач ЛП и ЦЛП** являются библиотеками Matlab, которые подробнее описаны в приложении В. Возможно подключить аналогичные библиотеки.

7 **Модуль (компонент) построения графиков ДМ** осуществляет отображение математической модели и сопряженной системы дифференциальных уравнений, а также значений показателей качества программного управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО, обобщенного показателя качества планирования, ( $x^{(r)}(t)$ ,  $u^{(r)}(t)$ ,  $\eta^{(r)}(t)$ ,  $J_k(t)$ ,  $J_{об}(t)$ ).

8 **Модуль (компонент) задания параметров ДМ** позволяет пользователю задать величину точности выполнения итерационной процедуры, реализующей метод последовательных приближений  $\varepsilon$ , шаг моделирования, максимальное количество итераций, булевы переменные, нормировки показателей качества и промежуточные графики, а также позволяет пользователю задать точки возврата показателей равномерности/неравномерности распределения ресурсов  $J_5$  и  $J_6$  либо к началу общего интервала времени, либо к началу участка постоянства структуры Гр ПдО.

9 **Модуль (компонент) расчета плана программного управления ИнП** (рисунок 4.7) выполняет решение задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО (параграф 2.3) и приведение исходных данных, введенных пользователем, в формат, который требуется внешнему модулю, обеспечивающему решение задач ЛП и ЦЛП.

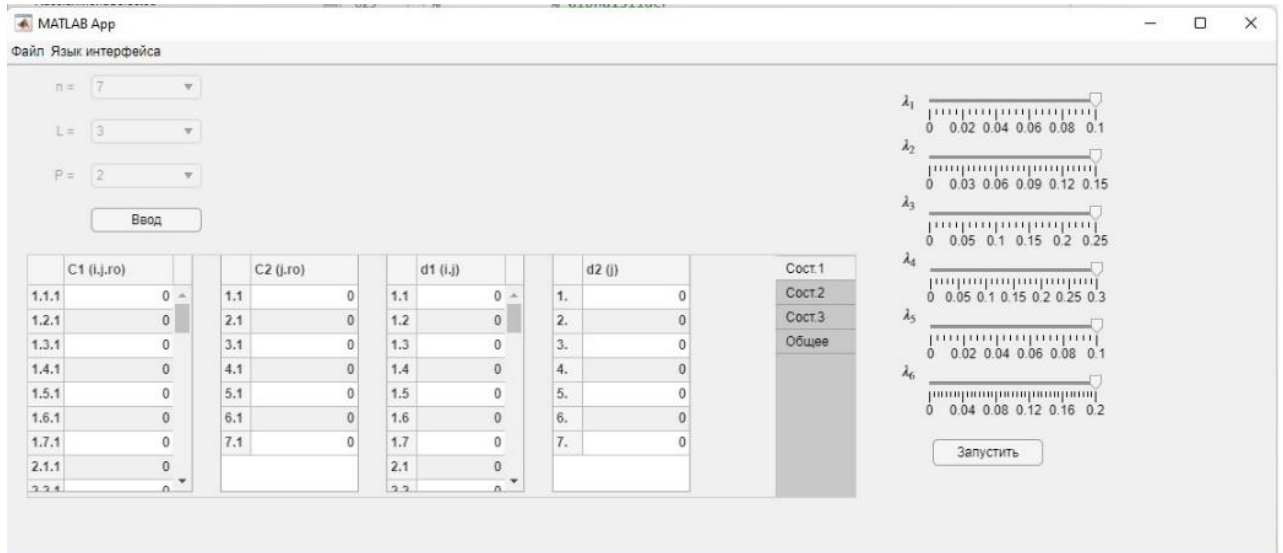


Рисунок 4.7 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый для редактирования ДМ

**10 Модуль (компонент) оценки робастности программного управления ИнП** в качестве исходных данных получает значения показателей качества планирования, а параметрами, задаваемыми ЛПР являются границы запретной зоны. Пример графического представления аппроксимированной ОД по возмущениям в пространстве показателей качества планирования ИнП в Matlab показан на рисунке 4.9, где зеленым цветом обозначена допустимая зона, красным цветом – запретная зона (зона нечувствительности, задаваемая ЛПР), а синим цветом – аппроксимированная ОД при интервальном задании возмущающих воздействий.

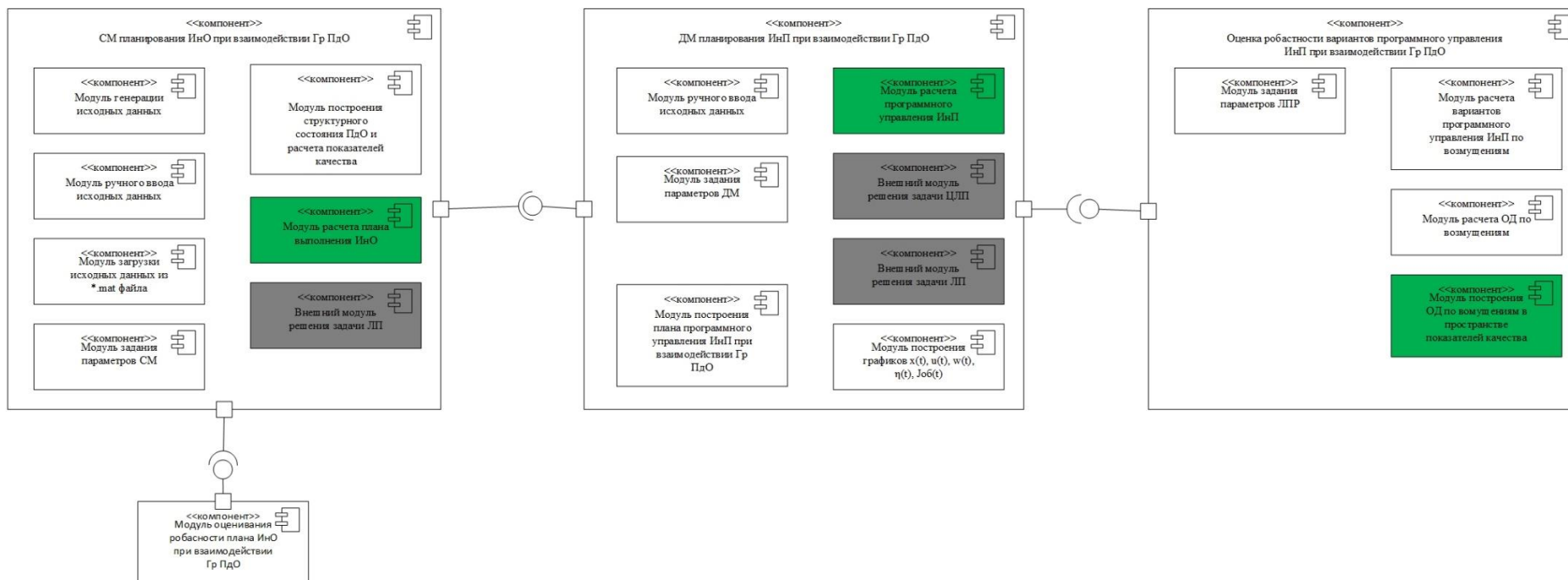


Рисунок 4.8 – UML диаграмма компонентов разработанного прототипа СМАО

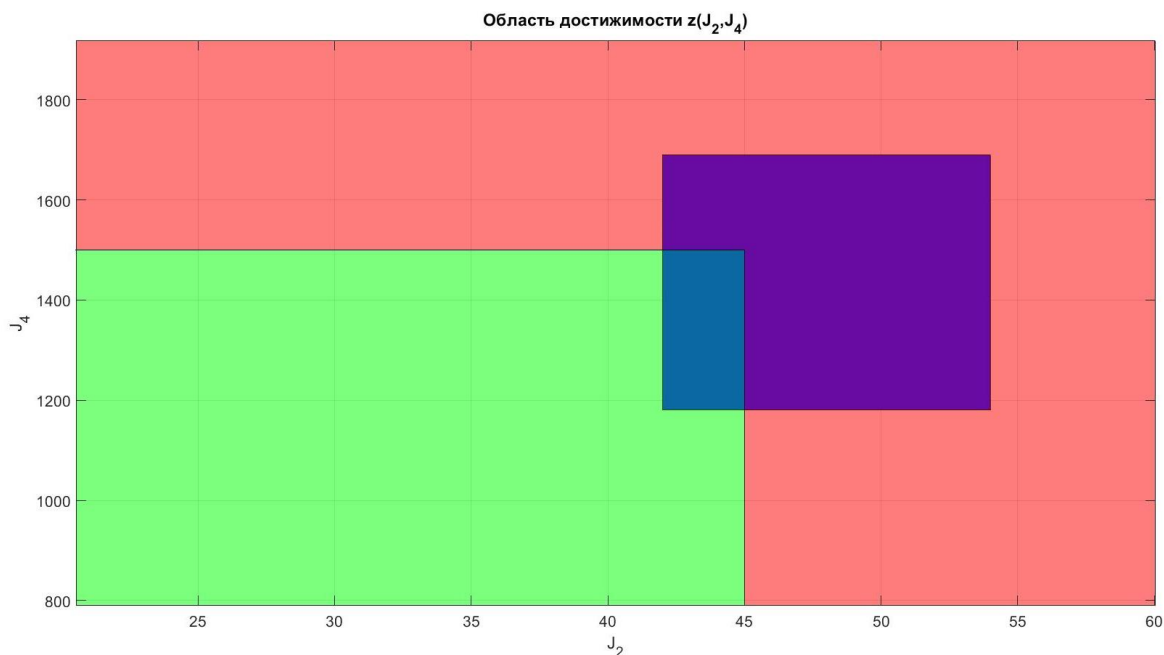


Рисунок 4.9 – Пример изображения аппроксимированной ОД по возмущениям в пространстве показателей качества планирования, который реализован с использованием инструментальных средств Matlab

При разработке программного прототипа СМАО решения задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии ПдО были использованы возможности Matlab для работы с матрицами и векторами, чтобы ускорить его работу при реализации на компьютере. Детальное описание организации процедур, используемых при оптимизации, представлено в приложении В.

К особенностям разработанной программной реализации можно отнести следующее:

- с использованием ДМ выполняется решение многоиндексной и многоэтапной задачи оптимального распределения операций, входящих в ИнП, по соответствующим ресурсам ПдО, причем в качестве индексов используются номера ПдО, номера участков постоянства структуры и номера типов данных, а *время* выполнения операций, входящих в ИнП (время начала операции, время завершения операции), присутствует как результат решения задачи планирования на ДМ.

- для преодоления трудностей, связанных с тем, что величины различных показателей качества программного управления ИнП принимают

значения, отличающиеся друг от друга на несколько порядков, было предложено ввести их нормировку.

— поскольку компоненты, входящие в выражение (2.55) зависят от переменных, входящих в (2.43) и (2.44), которые, в свою очередь, зависят от продолжительности участков постоянства структуры, потребовалось на программном уровне ввести запрет на выполнение операций приема/передачи и обработки данных при превышении значений соответствующих краевых условий (сверх заданного лимита). В противоположном случае в ДМ может сформироваться событие, состоящее в том, что при выполнении операций приема/передачи или обработки данных произойдет их накопление в соответствующем ЗУ ПДО в объеме, превышающем, ограничения, определяемые его техническими характеристиками.

— сопряженная система в ДМ из-за отсутствия логических ограничений принимает упрощенный вид и задается константами, благодаря чему краевые условия в момент времени  $t = t_{fl}$  равны краевым условиям в  $t = t_{0l}$ .

— при программной реализации ДМ переход от очередного интервала постоянства структуры к последующему интервалу постоянства структуры осуществляется после окончания выполнения итерационной процедуры, связанной с реализацией метода последовательных приближений для текущего участка постоянства структуры.

Перейдем к примеру решения задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр МКА.

#### **4.3 Решение задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки маломассоразмерных космических аппаратов**

В настоящее время маломассоразмерные космические аппараты (МКА) различного назначения широко используются для решения разноплановых

прикладных задач, связанных с мониторингом окружающей среды и объектов, их навигации, с связью и телекоммуникацией, геодезией и так далее. При решении перечисленных задач требуется использовать, как правило, не один МКА, а несколько МКА, образующих соответствующую группировку, обеспечивающую глобальность, непрерывность, надежность, устойчивость и высокое качество выполнения поставленных целевых задач за счет их совместного функционирования, синхронизированного в пространстве и во времени. Важное место при функционировании МКА имеет организация процесса информационного обмена как между данными космическими аппаратами, а также внешней средой (куда в общем случае включаются конечными потребители космических данных и информации, внешняя возмущающая среда, объекты мониторинга и т.п.). Анализ особенностей применения современных МКА, проведенный в 1 главе диссертации, показывает, что на основе имеющихся на борту современных МКА аппаратно-программных комплексов (АПК) могут образовываться информационно-вычислительные сети (ИВС), главной особенностью которых является постоянное изменение их топологических структур (конфигураций), которое связано с пространственным перемещением МКА относительно друг друга в ходе орбитального полета. В этих условиях для повышения качества функционирования как Гр МКА, так и соответствующей ИВС, образованной при взаимодействии данных МКА, необходимо наилучшим образом организовать информационный обмен (информационное взаимодействие) между рассматриваемыми орбитальными космическими средствами [85].

Применительно к решаемой в данном параграфе прикладной задачи, связанной с мониторингом состояния наземных объектов с использованием МКА ДЗЗ, рассматриваемый информационный обмен, предполагает получение любым МКА (с учетом того, что каждый из них имеет унифицированные целевые АПК, например, радиолокационную и/или оптико-электронную аппаратуру, а также весь набор бортовых обеспечивающих систем, необходимых для выполнения орбитального полета, например системы ориентации и стабилизации,

терморегулирования, энергопитания и т.п.), входящим в группировку, данных и информации об объектах мониторинга, а также выполнение операций приема, передачи, обработки, хранения, а также, в общем случае, потери указанных данных и информации. В этих условиях, как уже указывалось ранее, актуальной задачей становится задача планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии Гр МКА.

Для демонстрации преимуществ и возможностей предложенного в диссертации полимодельного (статико-динамического) описания процессов приема, передачи, обработки, хранения и потери данных и информации, а также соответствующей обобщенной процедуры оптимального оперативного планирования ИнП при взаимодействии МКА и ее программной реализации **в космической ПрО** были проведены несколько вычислительных экспериментов. Для выполнения экспериментов использовались исходные данные, представленные в работах [102,122]. На рисунке 4.10 в графическом виде изображены часть из указанных исходные данные. Внутри каждой вершины представленного на рассматриваемом рисунке графа, задающего фиксированный сценарий структурной динамики Гр КА, размещен номер МКА, а рядом с вершиной графа задаются величины максимальной интенсивности (скорости) обработки поступающих данных (эти величины указаны в треугольниках, и измеряются в Мб/с) и максимального объема ЗУ (их величина указана внутри квадратов, и измеряется в Мб). На рисунке 4.10 дугам поставлена в соответствие максимальная интенсивность (скорость) передачи по космическим каналам связи, которая принимается равной 10 Мб/с, при этом пунктирная дуга соответствует процессам передачи информации (обработанных данных), сплошная процессам передачи данных (или по-другому, необработанной информации).

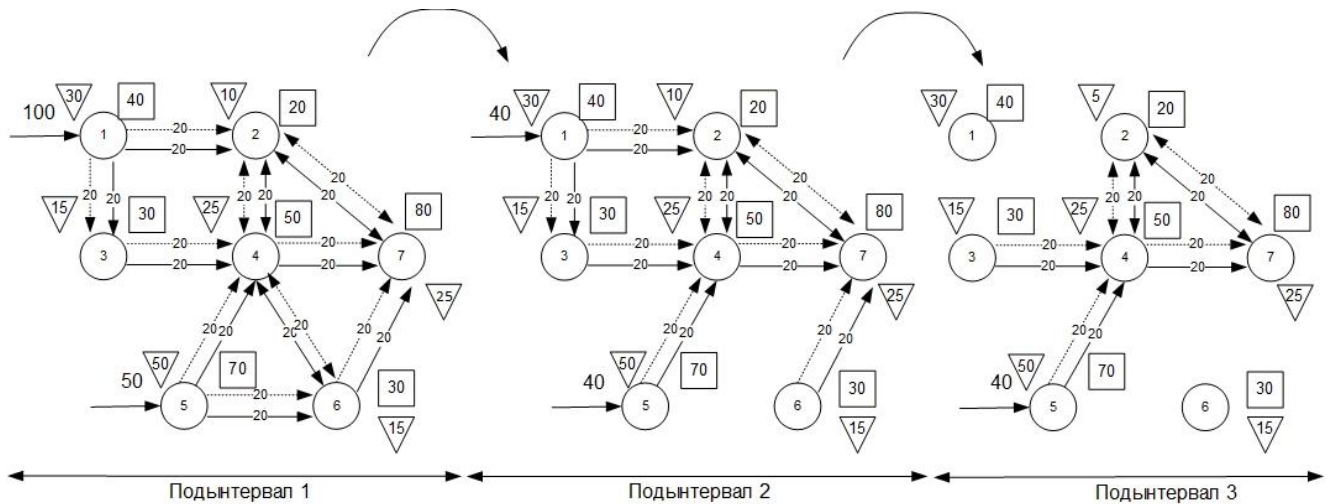


Рисунок 4.10 – Пример задания исходных данных о параметрах АПК МКА ДЗЗ, входящих в Гр МКА, и структурной динамике Гр МКА

На рисунке 4.13 представлены результаты расчетов плана выполнения ИнП с использованием СМ для исходных данных, представленных на рисунке 4.10, где дугам соответствующего графа поставлена в соответствие запланированная интенсивность (скорость) передачи данных (сплошная) / информации (пунктирная). В треугольниках размещена запланированная интенсивность (скорость) обработки поступающих данных в МКА, в квадратах запланированный объем сохраненных данных (числитель) и информации (знаменатель) в ЗУ МКА на том же рисунке.

Визуализации плана выполнения ИнП (полученного с использованием СМ) и программа управления ИнП (полученная с использованием ДМ) показаны на рисунках 4.11 и 4.12 соответственно. Как видно из плана выполнения ИнП Гр получено КнП **245 Мб** или **50,5 %** обработанных данных, в ЗУ МКА сохранено 35 Мб данных и 135 Мб информации. Потери информации в Гр МКА составили 40 Мб или **8,2 %**, а данных – 30 Мб или **6,2 %**, что связано с ограничениями на пропускные способности каналов космической связи и производительность ВСр каждого МКА в рассматриваемой ИВС, а также объемы ЗУ МКА в рассматриваемом примере.



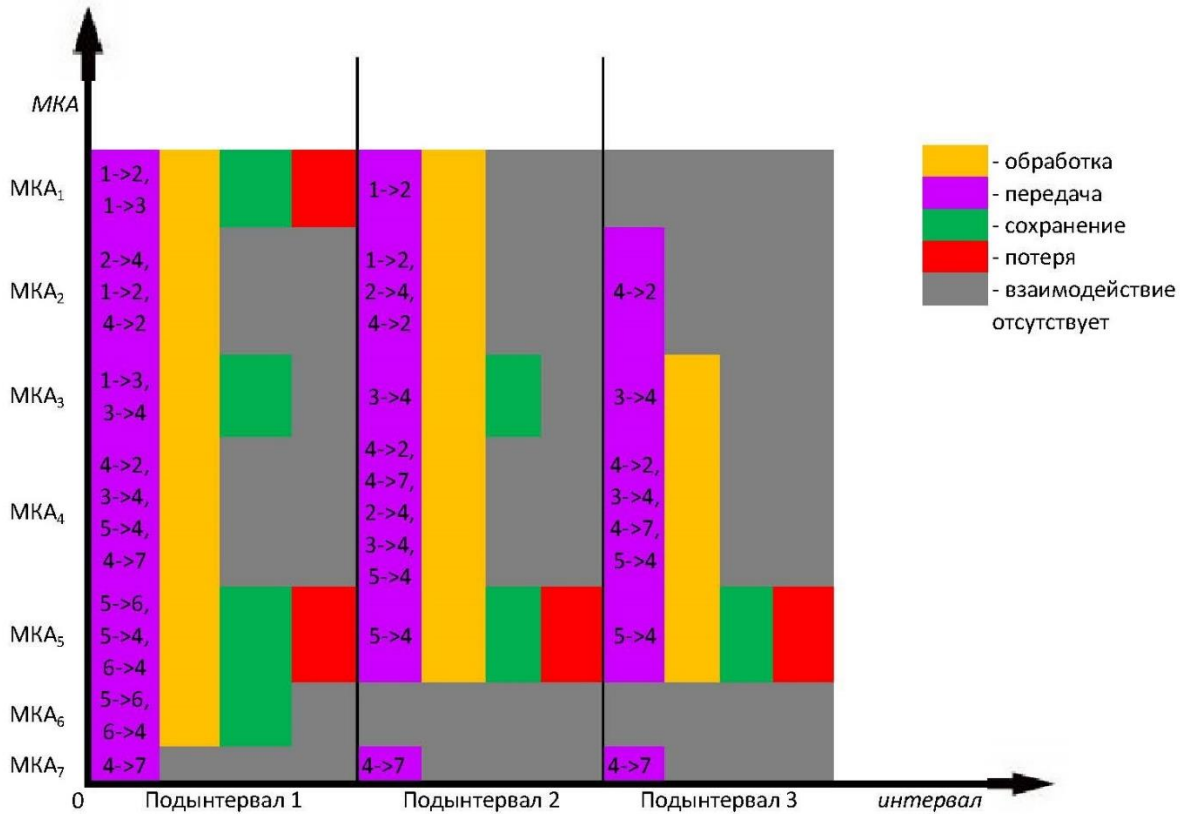


Рисунок 4.11 – Визуализация плана, полученного с помощью СМ

Анализируя рисунок 4.12, можно отметить, что с помощью ДМ выполняется уточнение плана, полученного с применением СМ, в ходе которого осуществляется привязка запланированных на СМ операций, входящих в состав ИнП, ко времени и конкретным ресурсам ИВС, динамически образующейся в ходе функционирования Гр МКА ДЗЗ.

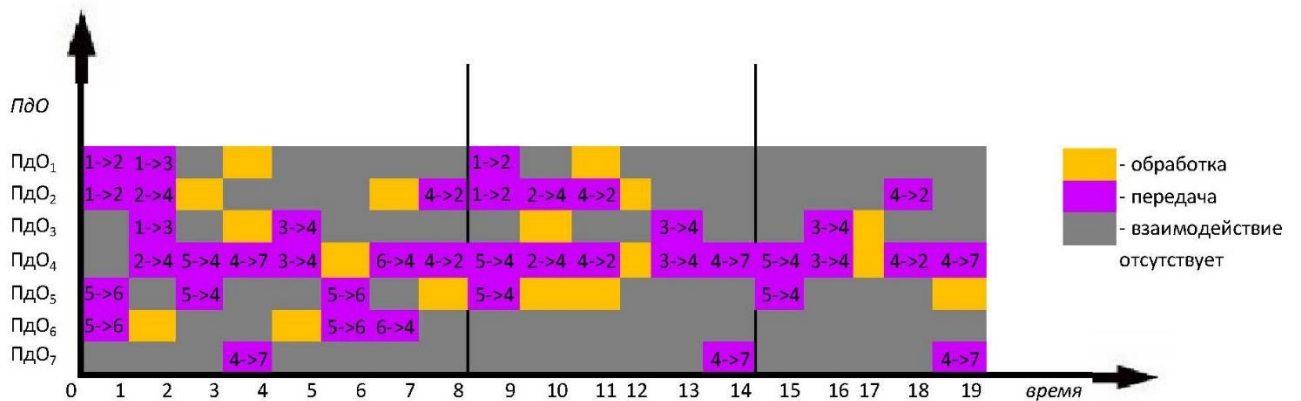


Рисунок 4.12 – Визуализация плана, полученного с помощью ДМ [167]

Графическое отображение плана выполнения операций, входящих в ИнП, при взаимодействии Гр МКА (рисунок 4.11) для заданного сценария структурной динамики Гр МКА ДЗЗ (рисунок 4.10) показано на рисунке 4.13.

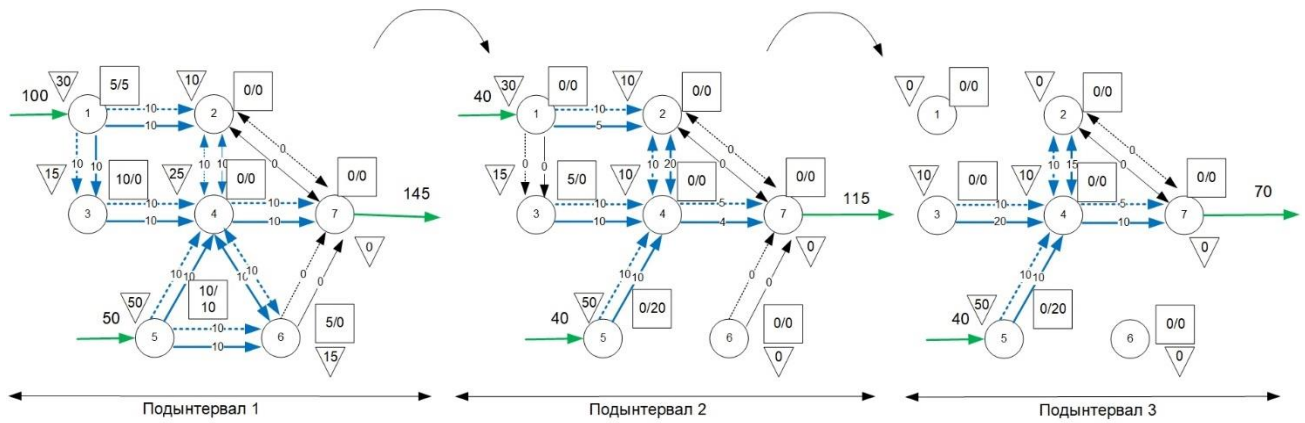


Рисунок 4.13 – Рассчитанный оптимальный план выполнения информационного процесса, который должен быть выполнен при взаимодействии Гр МКА

Для оценки интегральной пропускной способности ИС на основе разработанного СМАО кроме расчета с применением программного прототипа был выполнен расчет на основе эвристического подхода, в ходе которого осуществлялся поиск не оптимального, а допустимого плана выполнения информационного обмена в рассматриваемой Гр МКА ДЗЗ. Сравнение результатов приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение результатов, полученных с помощью эвристического планирования и оптимального оперативного планирования с использованием разработанного СМАО для Гр МКА

Основные планируемые операции, входящие в состав ИнП	Результаты, полученные с использованием эвристического метода планирования ИнП	Результаты, полученные с использованием программного прототипа СМАО
Обработанные данные	215 Мб	<b>245 Мб</b>
Потерянные данные	50 Мб	<b>40 Мб</b>
Потерянная информация	30 Мб	30 Мб
Сохраненные данные	35 Мб	35.0 Мб
Сохраненная информация	50 Мб	30.0 Мб

Как видно, из таблицы благодаря применению СМАО удалось уменьшить на 20 % объем потерянных данных и увеличить на 12,24 % объем обработанных данных (информации), полученных КнП. Резюмируя, результаты вычислительного эксперимента можно сказать, что применение СМАО позволило передать КнП больший объем обработанных данных по сравнению с эвристическим подходом и,

как следствие, повысить интегральную пропускную способность ИВС, динамически построенной на информационных ресурсах Гр МКА.

Выполним оценивание робастности программного управления (планов выполнения) ИнП при взаимодействии Гр МКА.

Для исходных данных, приведенных на рисунке 4.10, рассмотрим различные сценарии формирования возмущающих воздействий, которые в разработанной модели задаются с помощью переменных  $\xi_j^{(b,2)}$  и  $\xi_{ij}^{(b,1)}$  принимающих с заданным шагом значения из интервала  $[0,1]$  Оценивание робастности полученных планов будем проводить в пространстве показателей, характеризующих суммарные штрафы за нарушение директивных сроков выполнения операций, входящих в ИнП, а также суммарные объемы обработанной и переданной информации (данных). Генерирование возможных оптимальных планов выполнения ИнП осуществим путем варьирования коэффициентов в выражении обобщенного показателя качества управления ИнП. В результате получим программу управления ИнП (план выполнения ИнП) №1 (соответствующая ей аппроксимированная ОД на рисунке 4.14 отмечена зеленым цветом) с коэффициентами важности в обобщенном показателе качества, которые соответственно равняются  $\alpha_1 = 0.7$ ,  $\alpha_2 = 0.3$ . Зададим еще два плана выполнения ИнП для других коэффициентов важности показателей качества, которые равны  $\alpha_1 = 0.9$ ,  $\alpha_2 = 0.1$  для плана №2 (соответствующая ему аппроксимированная ОД на рисунке отмечена оранжевым цветом); для плана № 3 (соответствующая ему аппроксимированная ОД на рисунке отмечена синим цветом), для которого значения весовых коэффициентов в обобщенном показателе качества будут равны  $\alpha_1 = 0.1$ ,  $\alpha_2 = 0.9$ . В итоге, получим три аппроксимированные ОД по возмущениям в пространстве выбранных показателей планирования ИнП (см. рисунок 4.14), рассчитанных с использованием ДМ. При этом каждая из аппроксимированных ОД содержит все множество значений показателей качества планирования, соответствующих каждой из синтезированных программ управления ИнП

(программ управления ИнП №1, №2, №3), которые реализуются с учетом всего спектра возмущающих воздействий, принимающих значения из заданного интервала. Анализ рисунка 4.14 показал, что наиболее робастный план выполнения ИнП является план №1, так как данному плану соответствует наибольшая площадь пересечения аппроксимированной ОД с допустимой зоной, которая равняется 1095,6. Наименее робастен план выполнения ИнП №3 (или, по другому, программа управления №3 - синий цвет аппроксимированной ОД).

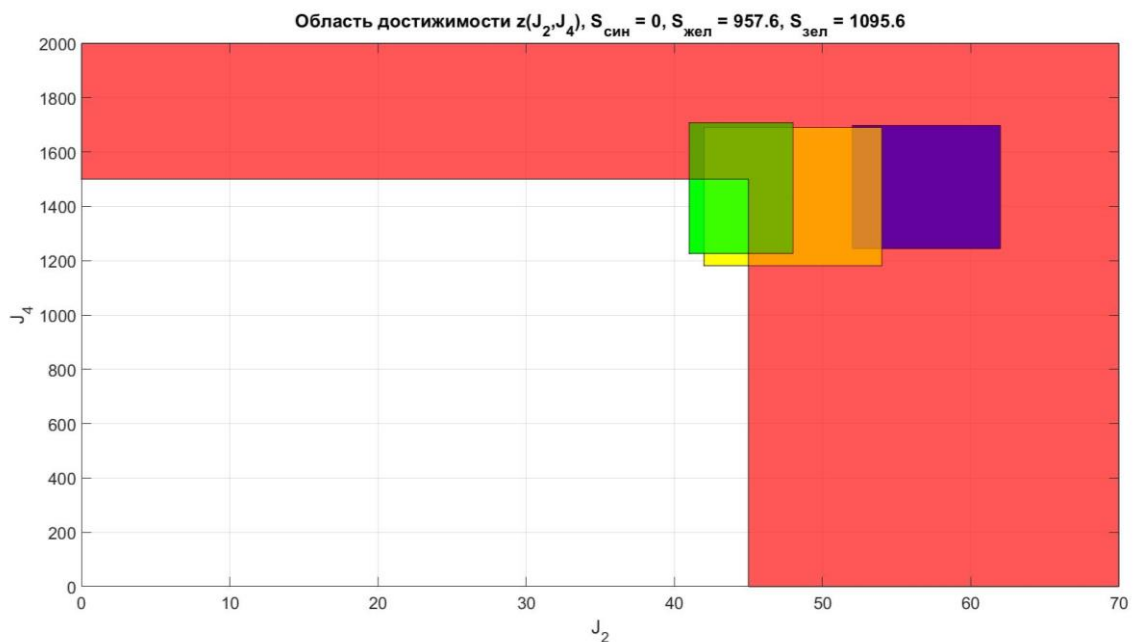
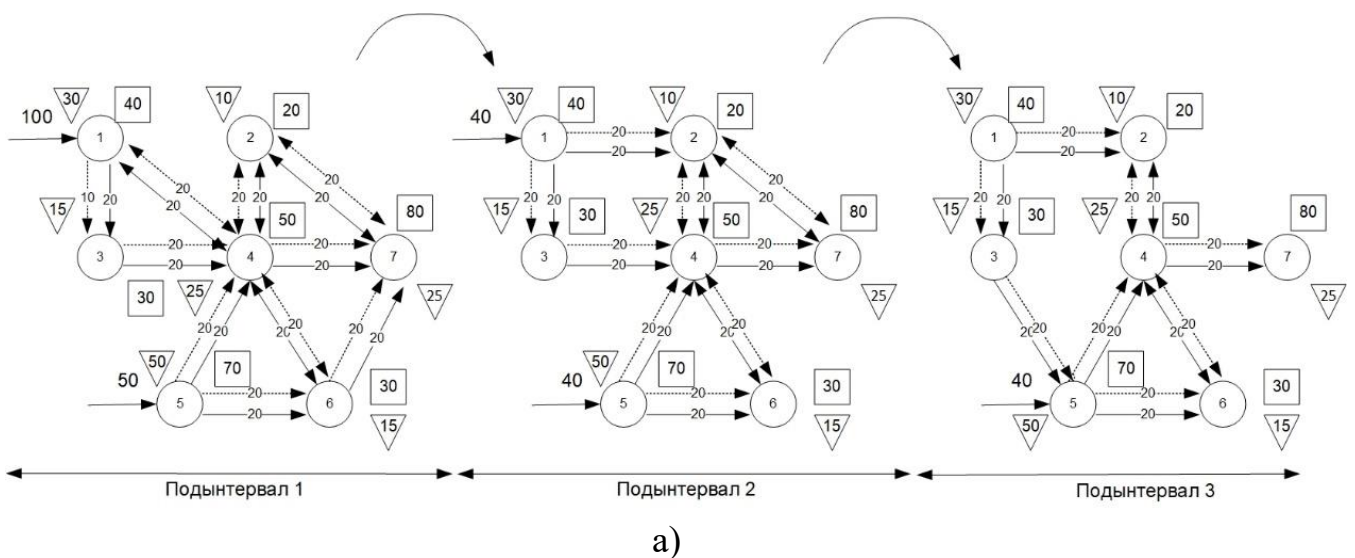


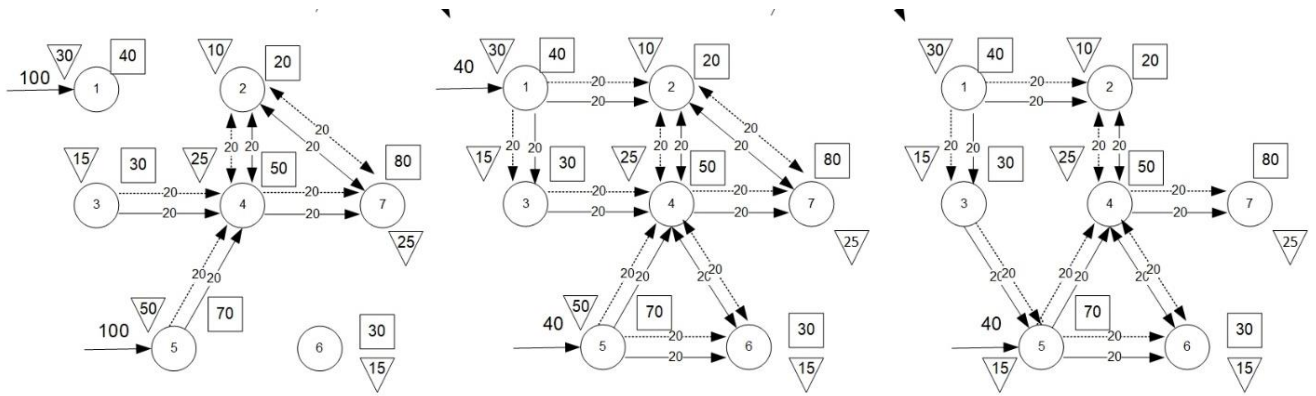
Рисунок 4.14 – Изображения различных планов выполнения ИнП при взаимодействии Гр МКА, с использованием аппроксимированных ОД в пространстве показателей качества планирования

Проведенный анализ СМ планирования ИнП при взаимодействии МКА, показывает, что результаты решения задач оптимального оперативного планирования с использованием СМ зависят от объемов ЗУ МКА, их производительности, а также пропускной способности и текущей структуры (конфигурации) каналов космической связи между МКА. Например, из анализа рисунка 4.13 можно установить, что за счет оптимального использования потенциальных возможностей ИВС с точки зрения ее пропускной способности, образованных на основе изменяющихся конфигураций АПК МКА ДЗЗ, входящих в рассматриваемую Гр, можно выбрать наиболее предпочтительные варианты гибко обхода заполненных ЗУ МКА, что позволяет в конечном итоге

минимизировать общие потери обработанных данных и информации. Благодаря объективно существующей структурно-топологической избыточности конфигураций космических каналов связи между МКА ДЗЗ, возникающих в ходе их пространственного перемещения, появляются новые возможности по обеспечению робастности управления ИнП, особенно в условиях реализации различных сценариев возмущающих воздействий как на АПК МКА, так и на каналы космической связи между ними. Следовательно, чем больше участков постоянства структуры, тем больше предоставляется возможностей по выбору оптимальной конфигурации маршрутов передачи данных по ИВС и/или исключения из текущих конфигураций проблемных МКА, имеющих низкие характеристики АПК, или подвергающихся большим возмущающим воздействиям.

Рассмотрим различные сценарии организации информационных взаимодействий (ИнВ) Гр МКА для различных вариантов ее структурной динамики. Соответствующие исходные данные представлены на рисунке 4.15, где в пункте а размещены исходные данные для сценария № 1, в пункте б – для сценария 2. Исходные данные для сценария 3 были представлены на рисунке 4.10. Заметим, что численно для всех трех сценариев исходные данные одинаковы, а отличаются они состояниями структурной динамики.





б)

Рисунок 4.15 – Исходные данные для проведения планирования ИМП Гр МКА в рамках заданных сценариев (пункт «а» соответствует сценарию № 1, пункт «б» соответствует сценарию № 2) реализации ее структурной динамики

Результаты планирования ИМП для различных сценариев представлены на рисунке 4.16, где в пункте а результат планирования ИМП в рамках сценария № 1, в пункте б – сценария № 2. Результаты планирования ИМП в рамках сценария № 3 были представлены на рисунке 4.13. Исходя из рассчитанных значений обобщенного показателя качества планирования ИМП (см. таблицу 4.2) для сценария № 1 соответствующий план выполнения ИМП при взаимодействии МКА ДЗЗ является наиболее предпочтительным. Отличие результатов моделирования для различных сценариев обусловлены потерей связности между МКА в Гр, а также ограниченными способностями АПК МКА на обработку и хранение данных и информации.

Из анализа рисунка 4.16 видно, что изменяющаяся топологическая структура каналов космической связи при одинаковых значениях объемов ЗУ каждого МКА, одинаковых значениях максимальной производительности  $V_{Cp}$ , входящих в состав каждого МКА ДЗЗ, одинаковых значениях максимальной скорости передачи данных (информации) по каналов космической связи между МКА создает для Гр МКА ДЗЗ разные возможности организации межспутникового взаимодействия, которыми при проведении оптимального оперативного планирования ИМП удастся воспользоваться. Об этом свидетельствуют, во-первых, результаты сравнения результатов эвристического и оптимального планирования ИМП (см. таблицу 4.1),

и, во-вторых, результаты оптимального оперативного планирования ИнП Гр МКА для различных сценариев реализации ее структурной динамики (см. рисунок 4.16).

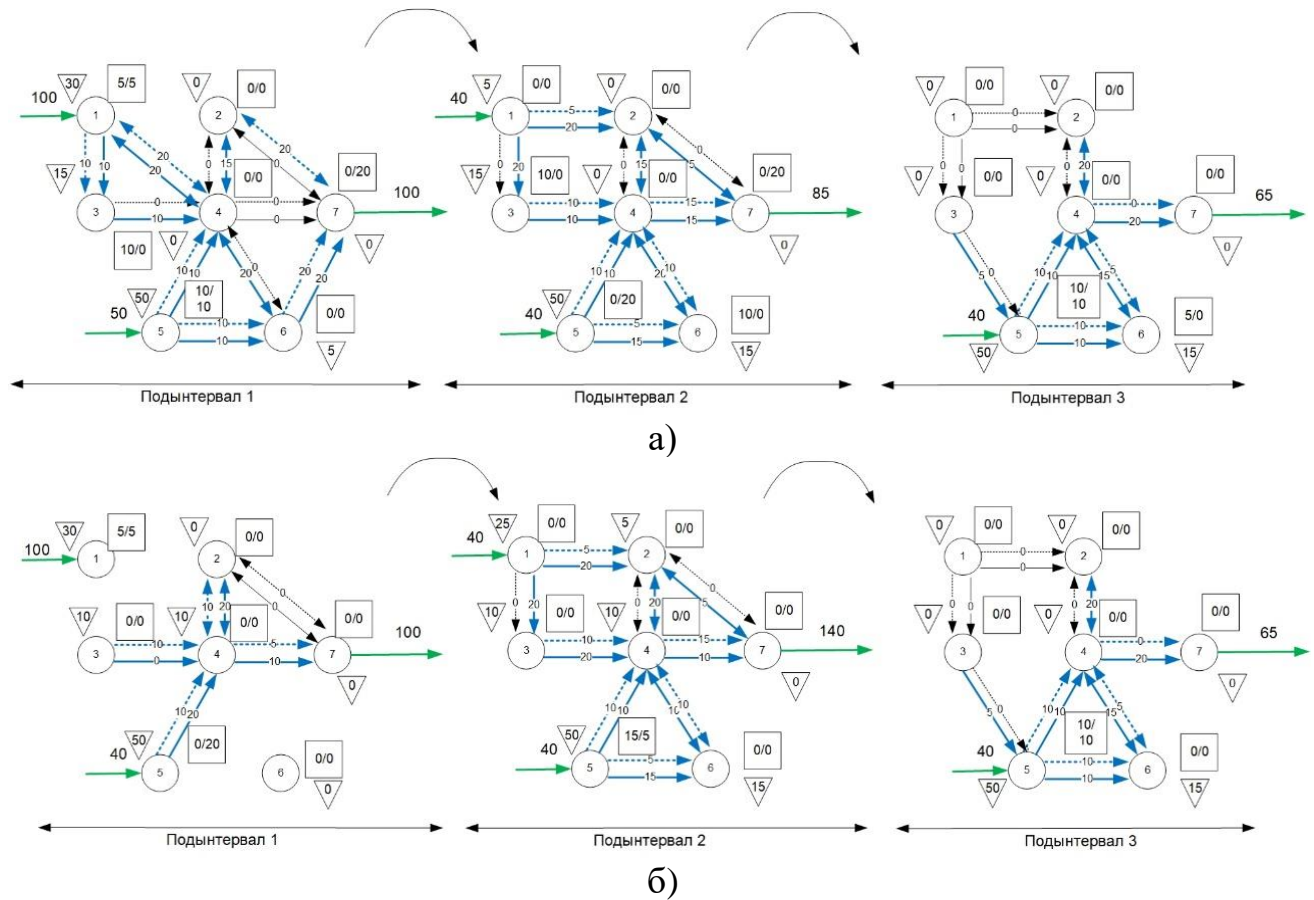


Рисунок 4.16 – Сценарии (пункт «а» соответствует сценарию № 1, пункт «б» соответствует сценарию № 2) структурной динамики Гр МКА и их ИнВ [167]

Таблица 4.2 – Сравнение результатов для различных сценариев планирования ИнП при взаимодействии Гр МКА

Основные планируемые операции, входящие в состав ИнП	Результаты, полученные при реализации сценария № 1	Результаты, полученные при реализации сценария № 2	Результаты, полученные при реализации сценария № 3
$I_0$	<b>241</b>	228	182
Обработанные данные (информация)	<b>370 Мб</b>	360 Мб	305 Мб
Потерянные данные	35 Мб	30 Мб	50 Мб
Потерянная информация	<b>25 Мб</b>	50 Мб	55 Мб
Сохраненные данные	40 Мб	55 Мб	30 Мб
Сохраненная информация	<b>45 Мб</b>	30 Мб	40 Мб

Проведем исследование того, как влияет на конечные результаты планирования специализация тех или иных МКА ДЗЗ, входящих в рассматриваемую Гр. Пусть для первого варианта моделирования все МКА специализируются на обработке данных ( $\varphi_{jl} = 20$  Мб/с;  $\psi_{ijl} = 10$  Мб/с для МКА с номерами  $j = 1...7$ ), для второго варианта моделирования все МКА специализируются на передаче данных ( $\varphi_{jl} = 10$  Мб/с;  $\psi_{ijl} = 20$  Мб/с для МКА с номерами  $j = 1...7$ ), при третьем варианте моделирования будем рассматривать смешанный случай ( $\varphi_{jl} = 10$  Мб/с и  $\psi_{ijl} = 3$  Мб/с для МКА с номерами  $j = 1, 5, 7$ ;  $\varphi_{jl} = 3$  Мб/с и  $\psi_{ijl} = 10$  Мб/с для МКА с номерами  $j = 2, 3, 4, 6$ ). Остальные исходные данные сохраняются такими же что и были представлены на рисунке 4.10.

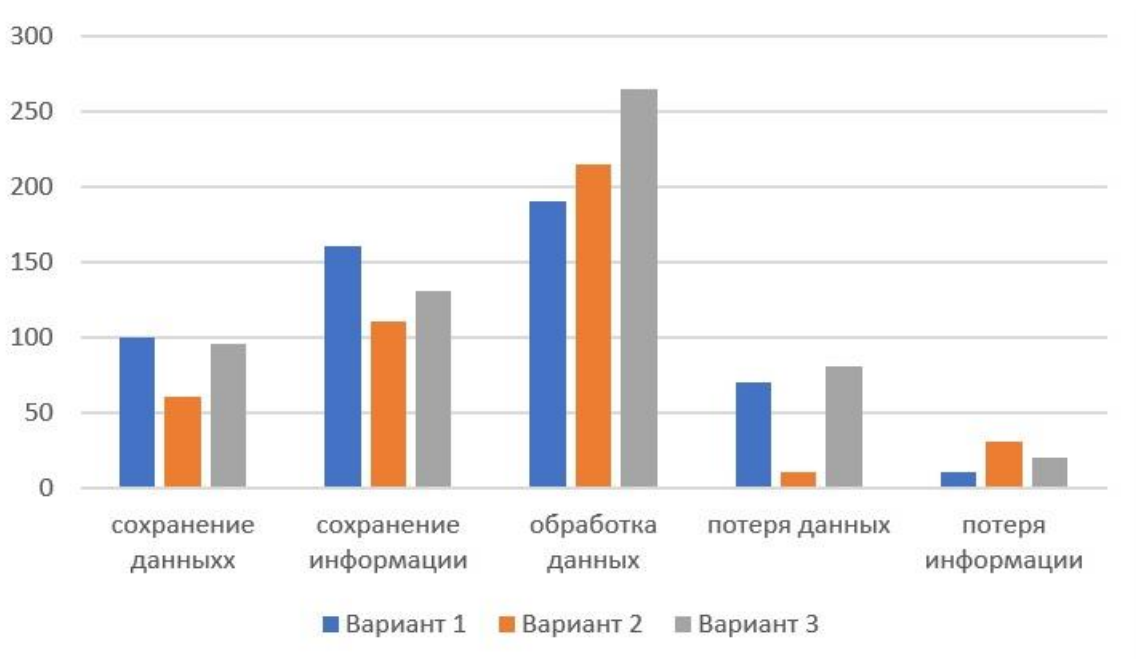


Рисунок 4.17 – Влияние использования специализированных МКА на объем информации, полученный КнП

Анализ рисунка 4.17 позволяет сделать вывод о том, что получение КнП максимального количества информации (обработанных данных) при минимальных потерях происходит, если использовать специализированные МКА в смешанном составе (тип 3). Из чего можно сделать вывод о важности выбора оптимального соотношения многофункциональных и специализированных МКА для выполнения



ЦЗ. Также в ходе машинных экспериментов выявлено, что наибольшее влияние на конечные результаты планирования ИнП при взаимодействии Гр МКА ДЗЗ оказывает выбор в разработанном СМАО коэффициентов, характеризующий степень обработки информации, коэффициентов, характеризующих важность показателей качества планирования, количество подынтервалов постоянства топологической структуры каналов космической связи, а также собственно характеристики АПК каждого МКА ДЗЗ, входящего в Гр МКА.

Результаты данного параграфа представлены в статье [167] соискателя ученой степени.

Перейдем к примеру решения задачи оперативного планирования ИнП в цифровом пространстве аэропорта.

#### **4.4 Решение задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки наземных транспортно-технологических средств в цифровом пространстве аэропорта**

Современный аэропорт — это сложный транспортный объект [9,21,22,23,32], в котором, кроме воздушных судов (ВС), одновременно функционирует большое количество аэродромных технических средств разного типа и назначения. Основная задача аэродромных служб (АЭСл) состоит в обеспечении своевременного вылета, полностью исправного и подготовленного ВС в строго в назначенное время, с требуемым уровнем сервисного обслуживания пассажиров с точки зрения обеспечения их безопасности и комфорта. Для решения этой задачи, действия всех служб аэропорта должны быть скоординированы на основе графика обслуживания ВС и суточного расписания аэропорта.

Наземное обслуживание ВС гражданской авиации в аэропорту предполагает реализацию множества технологических процессов. Сервисное обслуживание ВС один из таких процессов, включающий в себя подготовку салона ВС к перевозке пассажиров, разгрузку и загрузку мобильного оборудования с питанием и

предметами, необходимыми для обслуживания пассажиров и обеспечения их безопасности в полете. Сервисное обслуживание должно проводиться в соответствии с установленными регламентами. Время на выполнение всего процесса и отдельных операций строго регламентируется.

Задача управления и координации сервисного обслуживания с другими процессами и службами аэропорта является крайне сложной [132]. Так, например, большинство московских аэропортов осуществляют в среднем каждый от 300 до 500 вылетов в день. Соответственно столько же в сутки происходит прилетов ВС в соответствующие аэропорты. Только для сервисного обслуживания в крупном аэропорту используется от 100 до 200 единиц транспортно-технологических средств. Общее количество всех средств механизации составляет 300 до 600 единиц и более. При этом, службам аэропортов необходимо постоянно принимать управленческие решения, анализируя большое число факторов и с учетом меняющихся условий функционирования аэропорта. К числу основных факторов и причин, влияющих на работу аэропорта можно отнести: изменение метеоусловий, задержки прилетов ВС, задержки вылетов ВС, технические неисправности ВС и обслуживающих их средств, социальные события, происходящие в аэропорту. По сложившейся практике, в настоящее время, оперативное планирование функционирования АэСл ведется в ручном, либо автоматизированном режимах. Сложность задач, решаемых АэСл, в совокупности с человеческим фактором приводит к неэффективным управленческим решениям и ошибкам, которые, в свою очередь, приводят к нештатным ситуациям, авариям и в конечном итоге к финансовым убыткам.

Повышение уровня безопасности пассажиров, надежности и эффективности сервисного обслуживания судов гражданской авиации в аэропорту является крайне актуальными задачами. Для решения этих задач в [132,136,157] был разработан и принят в промышленное использование комплекс наземных интеллектуальных [116] транспортно-технологических средств (ИТТС) сервисного обслуживания ВС гражданской авиации. В настоящее время каждое ИТТС представляет собой

грузовой автомобиль с подъемным механизмом кузова, оснащенное различными датчиками, обеспечивающим его функционирование в рамках единого цифрового пространства аэропорта. На рисунке 4.18 представлена обобщенная структура ИТТС. В составе каждого ИТТС есть специализированный распределенный бортовой информационно-вычислительный комплекс (БК) (см. рисунок 4.19), включающий в себя следующие подсистемы:

- подсистема контроля погрузки-разгрузки, которая собирает данные от специализированного оборудования и датчиков;
- подсистема предотвращения столкновений, получающая и обрабатывающая данные от собственных датчиков;
- подсистема контроля и проактивного (упреждающего) управления техническим состоянием ИТТС, которая собирает и обрабатывает данные от датчиков шасси и рабочего оборудования;
- информационный сервер (портал), который обеспечивает обработку поступающих данных и обмен данными между ИТТС и КнП.

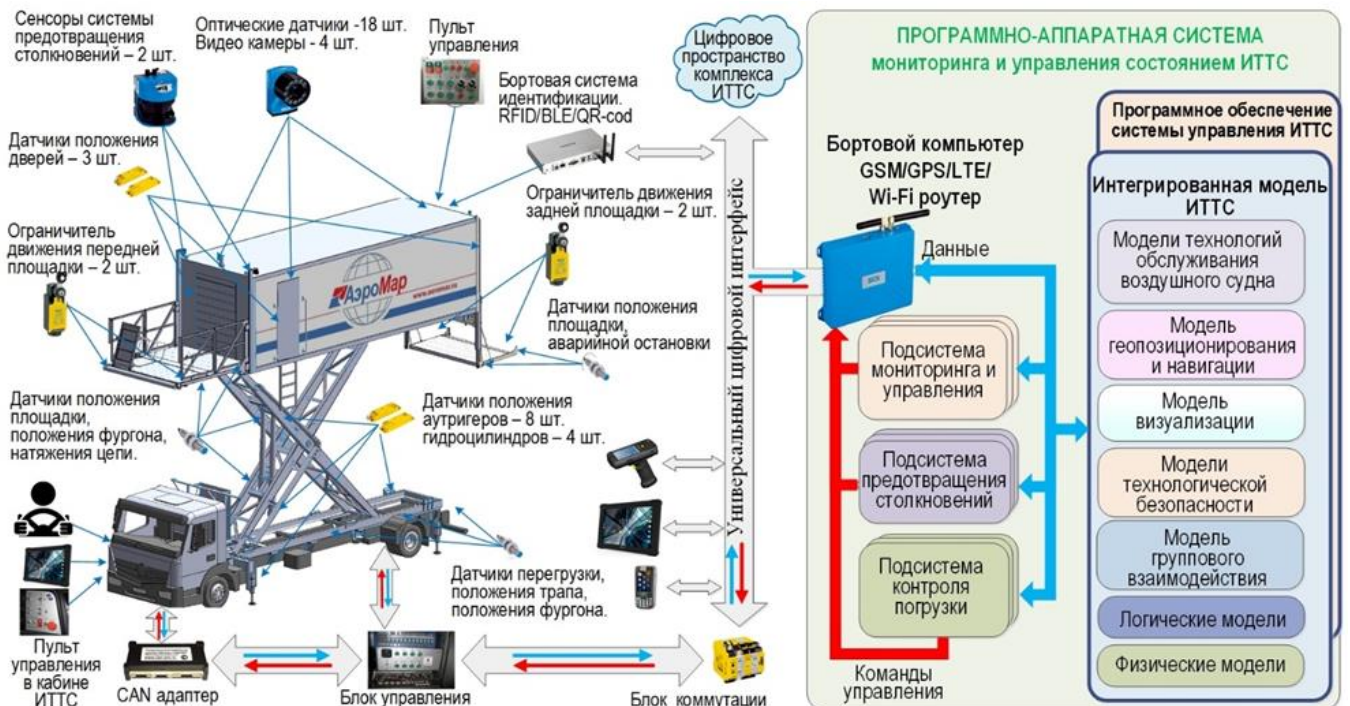


Рисунок 4.18 – Обобщенная структура ИТТС [133]

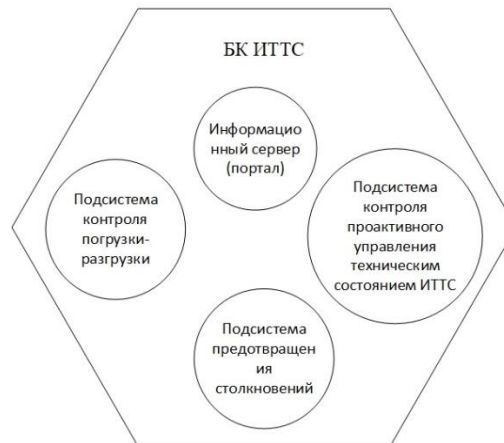


Рисунок 4.19 – БК ИТТС

Под КНО в данном параграфе будем понимать ВС, под Гр ИТТС – несколько ИТТС, которые обслуживают одно ВС, а под КнП – систему управления АэСл, систему удаленного мониторинга технического состояния ИТТС, мобильные устройства представителей служб аэропорта и так далее.

Существующие и перспективные ИТТС предназначены:

- для перевозки питания и товаров беспошлинной торговли;
- для перевозки лежачих больных;
- для перевозки предметов комфорта и дополнительного оборудования для обслуживания пассажиров в полете;
- для уборки салонов ВС и вывоза мусора;
- для погрузки, разгрузки грузов и багажа.

Анализ показывает, что решение данного класса задач предполагает синтез программ управления ИнП и потоками в рассматриваемой наземно-авиационной транспортно-логистической системе. С формальной точки зрения данный класс задач относится к многокритериальным задачам теории расписаний большой размерности, с запретами на прерывание выполняемых частично-упорядоченных работ (определяемых регламентами функционирования конкретных АэСл), а также с учетом специальных пространственно-временных, технических, технологических, организационных транспортно-логистических ограничений, определяющих специфику функционирования каждого конкретного аэропорта в отдельности.

Для успешного решения всех вышеперечисленных задач необходимо правильно организовать процессы планирования и управления рассматриваемыми транспортными средствами (ИТТС) и их Гр, а также информационными процессами, лежащими в основе соответствующих управленческих процессов, реализуемых конкретными АэСл. Поэтому в рамках данного диссертационного исследования была поставлена и решена задача оптимального оперативного планирования ИнП, обеспечивающих устойчивое функционирование ИТТС в едином цифровом пространстве аэропорта. В качестве исходных данных для рассматриваемого примера было выбрано расписание рейсов, представленное на онлайн-табло одного из московских аэропортов – Жуковский [**Ошибка! Источник с ссылки не найден.**], которое показано на рисунке 4.20. В таблице 4.3 приведены сведения о соответствии номера рейса типу ВС и количеству требуемых ИТТС для его обслуживания, а в таблице 4.4 приведены сведения о соответствии номеров участков постоянства структуры, ИВС, образованной на базе БК каждого ИТТС и различных каналов связи, а также длительности каждого из временных интервалов.

Время	№ рейса	Авиакомпания	Направление	Статус рейса
00:35	WZ4609	RED WINGS airlines	Анталья	По расписанию
01:10	J29082	Buta Airways	Баку	По расписанию
02:15	U62423	URAL AIRLINES	Душанбе	По расписанию
02:35	U62517	URAL AIRLINES	Бишкек	По расписанию
04:50	XC8040	corendon airlines	Анталья	По расписанию
04:55	XC8042	corendon airlines	Анталья	По расписанию
08:00	NKP8365	ABAKAN AIR	Ломе	По расписанию
08:00	WZ071	RED WINGS airlines	Стамбул	По расписанию
08:30	U62455	URAL AIRLINES	Бишкек	По расписанию
09:10	WZ075	RED WINGS airlines	Стамбул	По расписанию
10:00	U68427	URAL AIRLINES	Душанбе	По расписанию
10:50	WZ4607	RED WINGS airlines	Алматы	По расписанию
12:30	WZ4617	RED WINGS airlines	Стамбул	По расписанию
12:55	U6307	URAL AIRLINES	Сочи	По расписанию
13:15	U68445	URAL AIRLINES	Душанбе	По расписанию
19:10	WZ4391	RED WINGS airlines	Самарканд	По расписанию
21:10	U62447	URAL AIRLINES	Ош	По расписанию
23:05	WZ4605	RED WINGS airlines	Астана	По расписанию
23:30	U62425	URAL AIRLINES	Худжанд	По расписанию
23:50	WZ073	RED WINGS airlines	Стамбул	По расписанию

Рисунок 4.20 – Онлайн-табло рейсов на сутки в аэропорту Жуковский [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Таблица 4.3 – Соответствие номера рейса типу ВС и количеству требуемых ИТТС для его обслуживания

Номер рейса	Тип ВС	Количество ИТТС для обслуживания ВС
WZ4609	Сухой Суперджет 100	2
J29082	Боинг 737-800	4
U62423	Аэробус А321	5
U62517	Боинг 737-800	4
XC8040	Сухой Суперджет 100	2
XC8042	Сухой Суперджет 100	2
NKP8365	Аэробус А321	5
WZ071	Сухой Суперджет 100	2
U62455	Сухой Суперджет 100	2
WZ075	Аэробус А321	5
U68427	Аэробус А319	3
WZ4607	Сухой Суперджет 100	2
WZ4617	Аэробус А321	5
U6307	Сухой Суперджет 100	2
U68445	Сухой Суперджет 100	2
WZ4391	Аэробус А319	3

U62247	Сухой Суперджет 100	2
WZ4605	Сухой Суперджет 100	2
U62425	Аэробус А321	5
WZ073	Аэробус А321	5

Таблица 4.4 – Соответствие участков постоянства структуры и длительности временных интервалов их существования (аэропорт Жуковский)

№ участка постоянства структуры	Временной интервал
1	0:00 – 2:59
2	3:00 – 5:59
3	6:00 – 8:59
4	9:00 – 11:59
5	12:00 – 14:59
6	15:00 – 17:59
7	18:00 – 20:59
8	21:00 – 23:59

Из таблиц 4.3 и 4.4 очевидно, что в рассматриваемом примере имеется 8 участков постоянства структуры, интервал планирования ИнП составляет 1 сутки, для выполнения сервисного обслуживания ВС используются 20 ПдО (в данном случае ИТТС). В составе ИВС, используемой для организации ИнП, обеспечивающих управление как ВС, так ИТТС, выделены следующие подсистемы: центральный сервер рассматриваемого предприятия (аэродрома), БК каждого ИТТС, вычислительные средства КнП, а также различные каналы связи, базирующиеся на современных телекоммуникационных технологиях (GSM, Wi-fi, Bluetooth), а также приведены сведения о различных сценариях структурной динамике Гр ИТТС, которые были положены в основу моделирования при расчете программ управления ИнП. В качестве исходных данных при моделировании Гр ИТТС и ее АПК использовались следующие значения:

- максимальный объем ЗУ сервера предприятия составляет 16 Гб;
- максимальный объем ЗУ БК ИТТС составляет 1 Гб;
- максимальный объем ЗУ БК КнП составляет 16 Гб;
- в сервер предприятия на 1, 3, 4, 5, 6, 8 участках постоянства структуры поступает по 12,5 Гб входных данных;

- в сервер предприятия на 2, 7 участках постоянства структуры поступает по 6 Гб входных данных;
- максимальная интенсивность (скорость) обработки поступающих в ИТТС данных составляет 300 Мб/с;
- максимальная интенсивность (скорость) передачи данных и информации между сервером предприятия и БК ИТТС составляет 80 Мб/с;
- максимальная интенсивность (скорость) передачи данных и информации между БК ИТТС и КнП составляет 100 Мб/с.

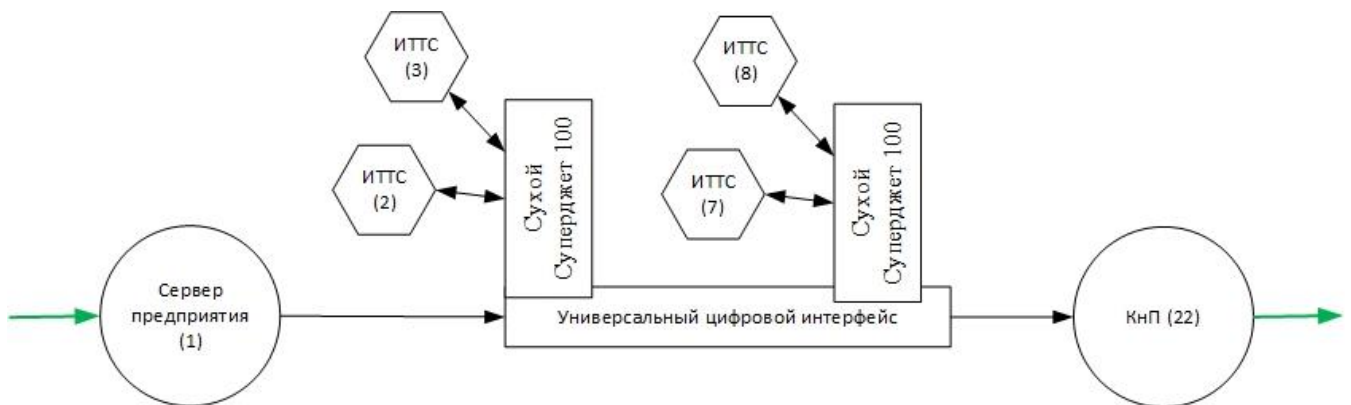


Рисунок 4.21 – Структурное состояние 2 Гр ИТТС

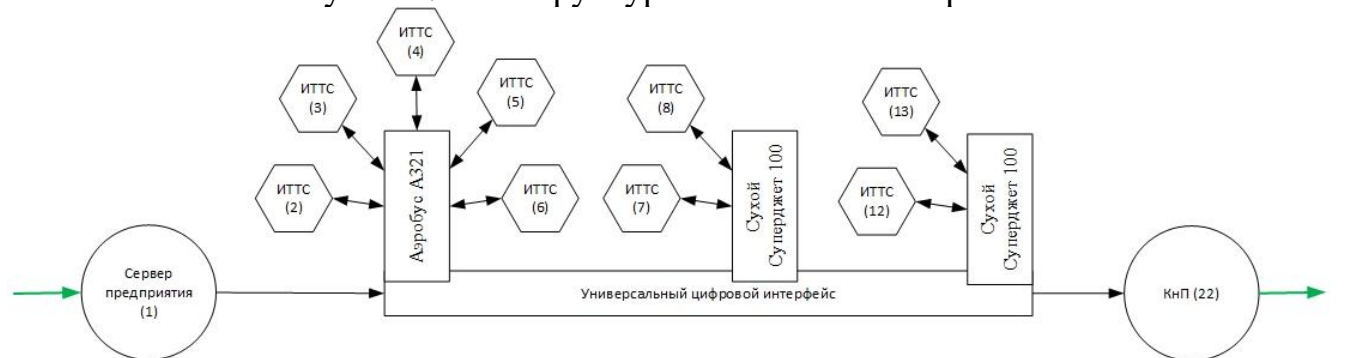


Рисунок 4.22 – Структурное состояние 3 Гр ИТТС

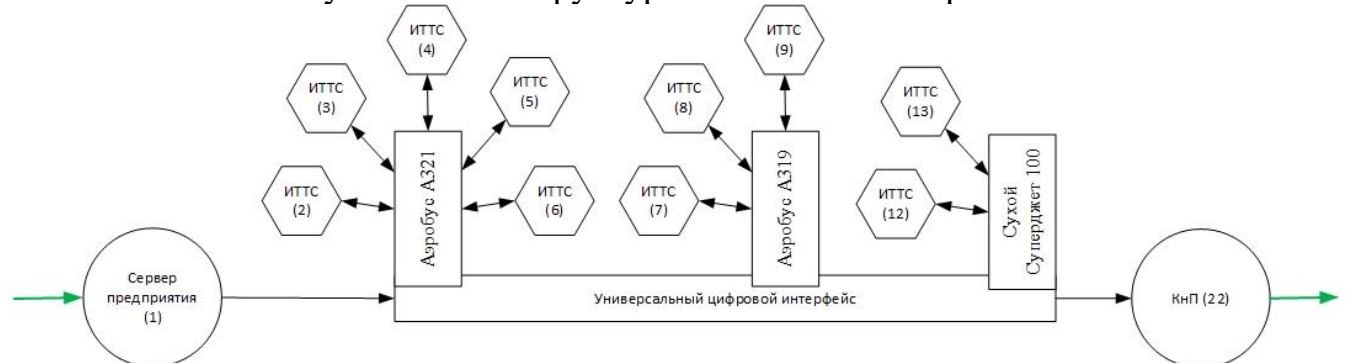


Рисунок 4.23 – Структурное состояние 4 Гр ИТТС



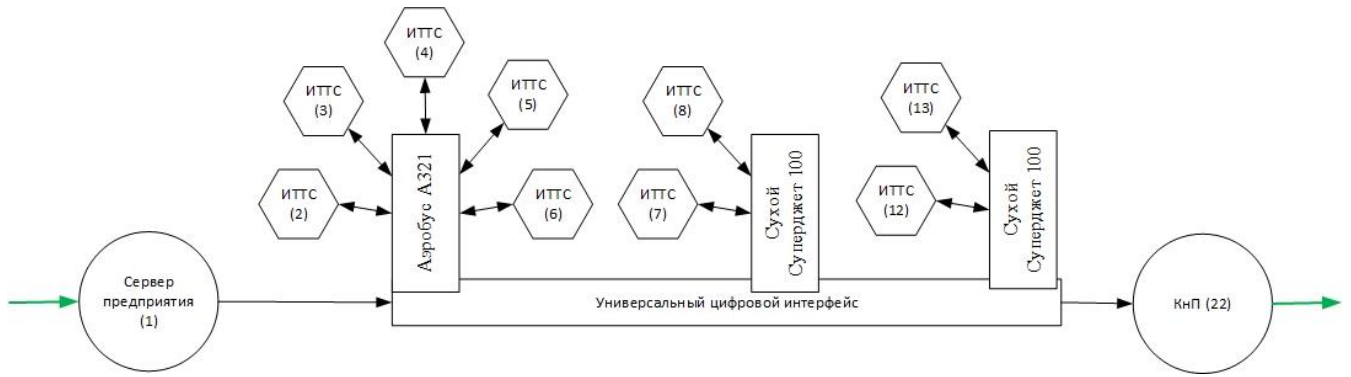


Рисунок 4.24 – Структурное состояние 5 Гр ИТТС

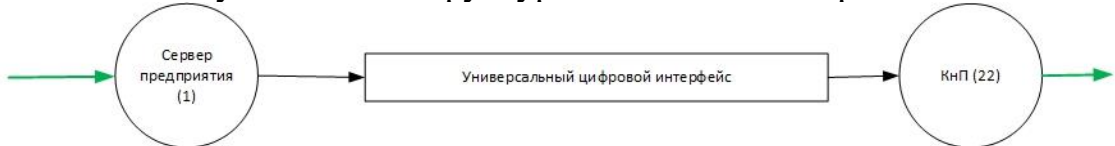


Рисунок 4.25 – Структурное состояние 6 Гр ИТТС

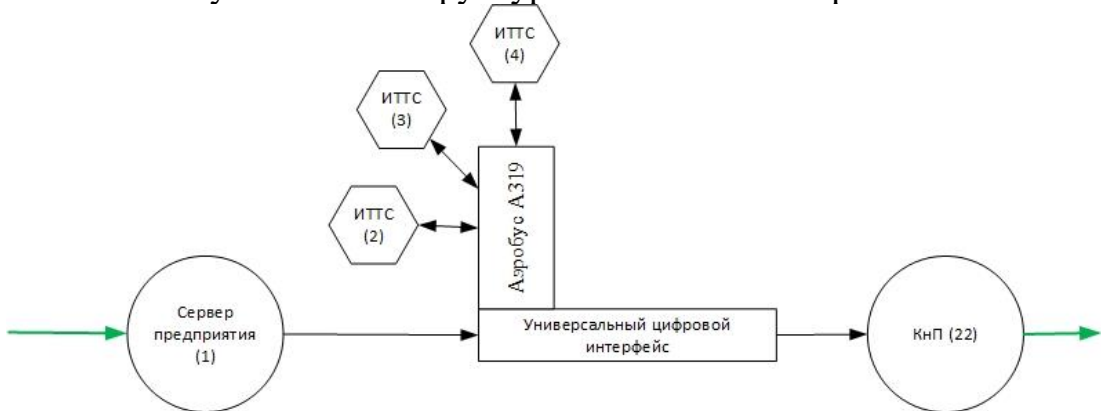


Рисунок 4.26 – Структурное состояние 7 Гр ИТТС

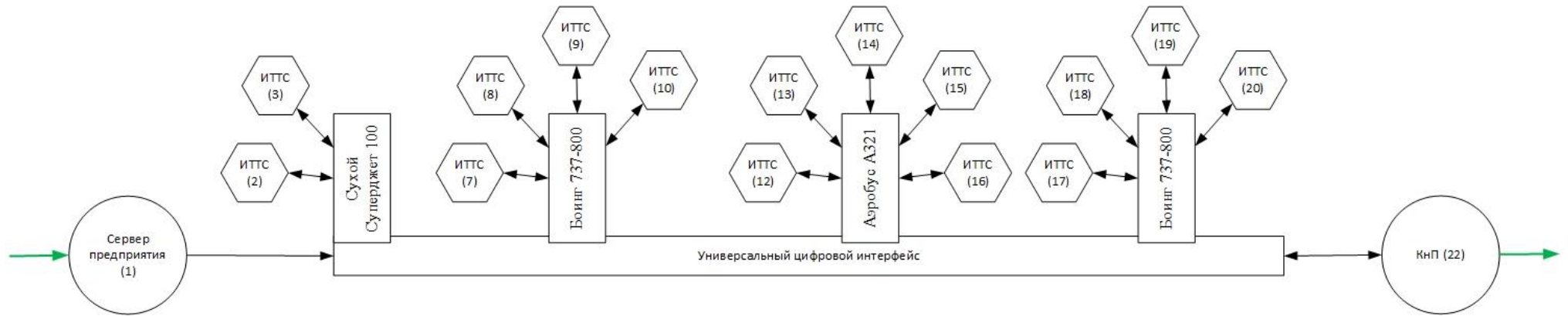


Рисунок 4.27 – Структурное состояние 1 Гр ИТТС

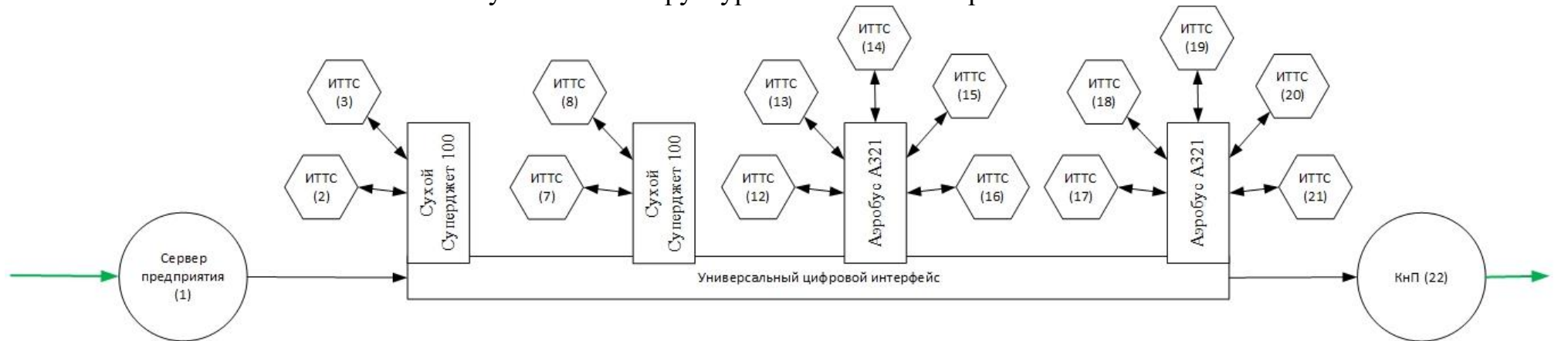


Рисунок 4.28 – Структурное состояние 8 Гр ИТТС

В таблицах Г.1 – Г.4 приведены сведения о сохраненных, обработанных и потерянных данных и информации для рассчитанных программ управления ИнП (планов выполнения ИнП) применительно к рассматриваемой Гр ИТТС на каждом из участков постоянства структуры ее ИВС.

В результате решения задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ИТТС в едином цифровом пространстве аэропорта с использованием СМ обработано 6,7 Гб и сохранено 2,4 Гб информации в КнП из 87 Гб поступивших на вход сервера предприятия, что составляет 7,7 % и 2,76 % соответственно. При этом объем потерянных данных составил 6,2 Гб (7,13 %) и 0 Мб информации. Остальные данные и информация сохранены в БК ИТТС (незначительная часть) и на сервере предприятия (большая часть), которые могут быть обработаны и затем переданы КнП в дальнейшем в течение следующих суток. Резюмируя, можно на основе таблиц Г.1 – Г.4 отметить, что почти все данные, поступившие в БК ИТТС, были обработаны, а их потери объясняются ограничением величины максимально возможной интенсивности (скоростью) передачи данных и информации между сервером предприятия и БК ИТТС, а также ограничением величины максимального объема ЗУ БК ИТТС, то есть техническими ограничениями БК ИТТС. Можно заметить, что на сервере предприятия потери данных начинают происходить с 5-го участка постоянства структуры, что объясняется достижением предельного объема ЗУ сервера предприятия.

Поясним, что экипаж ВС получает информацию о количестве пассажиров и их весе, количестве единиц багажа и его массе, загрузке топливом, количестве питания для пассажиров и его весе в обобщенном (агрегированном) виде, поэтому не все данные, хранящиеся на сервере предприятия, должны быть переданы на борт ВС. Так, например, сведения о техническом состоянии ИТТС остаются в наземных АэСл.

Из-за большого количества ИТТС и участков постоянства структуры на рисунке 4.29 для примера показан план программного управления ИнП при взаимодействии Гр ИТТС только для первого временного подынтервала.

Для оценки эффективности полученного плана выполнения ИнП с помощью обобщенного показателя, оценивающего интегральную пропускную способность рассматриваемой ИВС, образованной на вычислительных ресурсах АЭСл, наряду с расчетом оптимальной программы управления ИнП был рассчитан эвристический (сатисфакционный) план выполнения ИнП. Сравнение результатов приведено в таблице 4.1.

Для исходных данных, приведенных выше, зададим различные возмущающие воздействия  $(\xi_j^{(b,2)})$  и  $(\xi_{ij}^{(b,1)})$  из интервала  $[0,1]$  для различных планов выполнения ИнП. В результате моделирования получим три аппроксимированные ОД по возмущениям в пространстве показателей качества планирования ИнП, о которых речь шла ранее в параграфе 4.3 (рисунок 4.30). Построение аппроксимированных ОД выполняется аналогично приведенному в параграфе 4.3 в примере из космической ПрО. В результате получим программу управления ИнП № 1 (ей соответствует зеленый цвет аппроксимированной ОД) с коэффициентами важности показателей качества  $\alpha_1 = 0.7$ ,  $\alpha_2 = 0.3$ . Зададим еще два плана программного управления ИнП для других коэффициентов важности частных показателей качества планирования (план №2, которому соответствует желтый цвет аппроксимированной ОД коэффициенты важности в обобщенной целевой функции –  $\alpha_1 = 0.9$ ,  $\alpha_2 = 0.1$ ; план № 3 соответствует синий цвет аппроксимированной ОД, а коэффициенты важности в обобщенной целевой функции пусть равняются –  $\alpha_1 = 0.1$ ,  $\alpha_2 = 0.9$ ). Проанализировав рисунок 4.30 можно определить, что наиболее робастна программа управления ИнП № 2, потому что у данного плана наибольшая площадь пересечения аппроксимированной ОД по возмущениям с допустимой зоной.

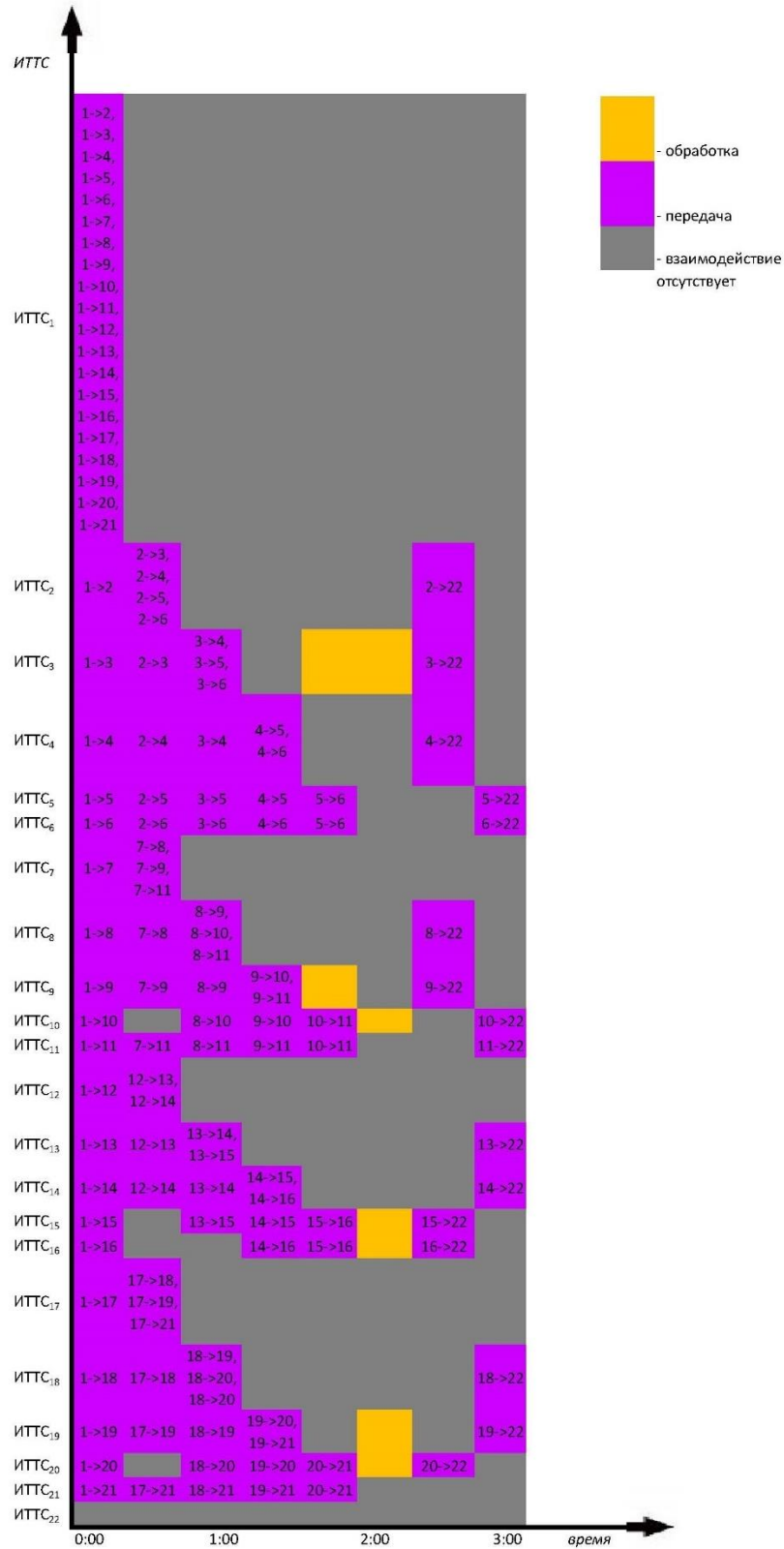


Рисунок 4.29 – Результаты оценки робастности программ управления ИнП при функционировании Гр ИТТС в условиях действия интервально заданных возмущений

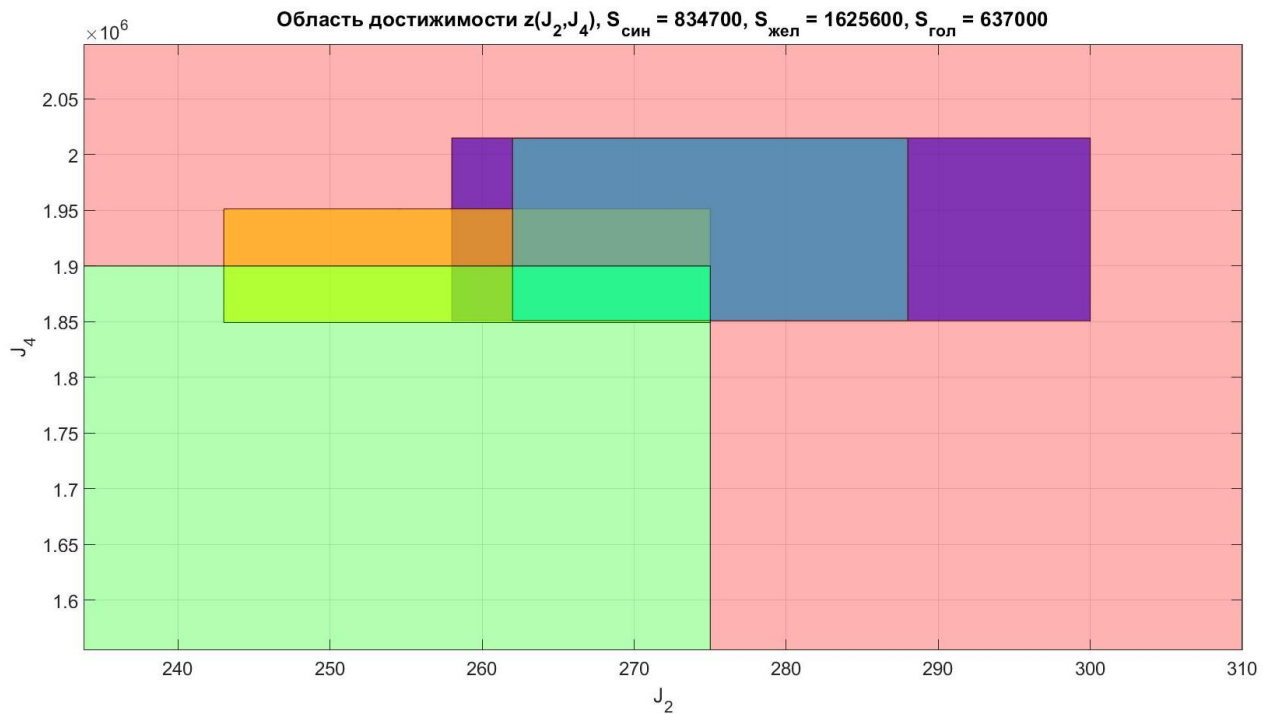


Рисунок 4.30 – Оценка робастности планов ИнВ Гр ИТТС

Таблица 4.5 – Сравнение результатов, полученных с помощью эвристического планирования и оптимального оперативного планирования с использованием разработанного СМАО для Гр ИТТС

Основные планируемые операции, входящие в состав ИнП	Результаты, полученные с использованием эвристического метода планирования ИнП	Результаты, полученные с использованием программного прототипа СМАО
Обработанные данные	6,2 Гб	<b>6,7 Гб</b>
Потерянные данные	7 Гб	<b>6,2 Гб</b>
Потерянная информация	0 Мб	<b>0 Мб</b>
Сохраненные данные	42,7 Гб	42,95 Гб
Сохраненная информация	63,95 Гб	64 Гб

Перейдем к рассмотрению возможных вариантов применения СМАО.

#### **4.5 Рекомендации по дальнейшему практическому использованию разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения и его программного прототипа при решении задач программного управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов**

Разработанный прототип СМАО ввиду множественности интерпретации как самих ПдО, так и ИнП, которые реализуются в ходе функционирования Гр ПдО, имеет широкие перспективы своего дальнейшего внедрения и развития.

Наибольший интерес представляет ПрО, связанная с проектированием и использованием как технологий, так и самих АПК, входящих в существующие и перспективные структуры промышленного Интернета вещей.

На конструктивном уровне, как указано в работе [129], можно в настоящее время ставить и решать сложные задачи глобальной оптимизации распределенных ИнП, характерных для современных информационных систем, и входящих в структуру промышленного Интернета вещей на базе киберфизических систем (КФС) [6] как указано в работе [129]. Полученные в результате решения задачи комплексного планирования операций и распределения ресурсов динамические приоритеты можно в этом случае использовать не только на этапе планирования, но и на этапе диспетчеризации операций и ресурсов в промышленном Интернете вещей в реальном масштабе времени.

Так, например, по результатам планирования ИнП на разработанном комплексе статических и динамических моделей в автоматизированную систему обмена данными промышленного Интернета вещей может быть передана следующая информация:

- номера абонентов (множество ПдО), участвующих в обмене данными на интервале планирования;
- последовательность и типы передаваемых потоков данных;
- матрица смежности обмена потоками данных;

- объемы передаваемых потоков данных, их приоритетность (в качестве приоритетов используются сопряженные переменные, полученные в результате решения оптимизационных задач в рамках ДМ);
- директивные сроки передачи заданных типов потоков данных для каждой пары абонентов промышленного Интернета вещей;
- уточненные величины интенсивностей передачи данных, пропускных способностей каждого элемента, каждой подсистемы автоматизированной системы обмена данными, матрица смежности передачи данных между ПдО;
- упорядоченные варианты программ управления структурами автоматизированной системы обмена данными на интервале планирования;
- заданные значения показателей качества и надежности обмена потоками данных в автоматизированной системе обмена данными, полученные в результате решения задач планирования ИнП.

Для ВСр, входящих в состав промышленного Интернета вещей, результаты комплексного планирования ИнП формируются в следующем виде:

- упорядоченные варианты распределения решаемых на интервале планирования задач по ВСр, находящимся на различных ПдО;
- технология решения задач на ВСр;
- состав и структура СМАО, используемого в каждом узле промышленного Интернета вещей (в общем случае считаем их мобильными, подвижными), предназначенного для решения задач управления ПдО и всей Гр в целом;
- время поступления потоков данных, допустимые временные интервалы, на которых планируется решение задач;
- приоритетность каждой задачи (сопряженные переменные, который используются для автоматизированной системы обмена данными);
- упорядоченные варианты расписаний (программ) работы ВСр;
- упорядоченные варианты программ управления структурами ВСр на каждом из уровней Гр ПдО;



– заданные значения показателей надежности и качества решения задач комплексного планирования на ВСр.

Полученные результаты комплексного планирования ИнП далее должны использоваться в конкретных автоматизированных системах обмена данными и ИВС промышленного Интернета вещей уже для детального планирования работы своих собственных элементов и подсистем, для разработки программ управления их структурами, потоками данных и т.п. в рамках облачных, граничных и туманных вычислений. До настоящего времени перечисленные данные назначаются в основном экспертным путем на основе предыдущего опыта.

Таким образом, использование результатов работы предложенного в диссертации СМАО позволит, во-первых, повысить степень согласованности планов функционирования основных подсистем промышленного Интернета вещей (в нашем случае автоматизированной системе обмена данными и ВСр), которые до последнего времени формируются относительно автономно, во-вторых, динамические приоритеты как передаваемых, так и обрабатываемых данных, сформированные на основе СМАО, позволят повысить оперативность и обоснованность принятия управленческих решений, связанных с разрешением конфликтных ситуаций, вызванных ограниченностью имеющихся информационных ресурсов. До настоящего времени данные приоритеты назначаются эвристически.

#### **4.6 Выводы по главе 4**

1. Осуществлена практическая реализация концепции комплексного (системного) моделирования при решении задач оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов в различных предметных областях, которая подтвердила положительный интегративный эффект от комбинированного использования разнотипных моделей. Разработанный программный прототип специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач оперативного планирования информационных

процессов при взаимодействии подвижных объектов позволяет в отличие от существующих программ планирования осуществлять одновременно как синтез наилучшей технологии (плана) приема и обработки данных и информации при взаимодействии подвижных объектов, так и программ оптимального управления информационного управления в рамках рассматриваемого взаимодействия подвижных объектов.

2. Сформулированы и обоснованы требования, предъявляемые к облику прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов. В качестве языка программирования был выбран Matlab language, а среды разработки графического интерфейса – Matlab App Designer.

3. Приведено описание основных модулей (компонентов), используемых для реализации на программном уровне специального модельно-алгоритмического обеспечения. В основу решения задач планирования информационных процессов на программном уровне положена стандартная процедура решения задач линейного и целочисленного-линейного программирования с применением математического пакета прикладных программ Matlab. При проектировании программного прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения была разработана UML диаграмма компонентов.

4. При демонстрации преимуществ предложенного полимодельного (статико-динамического) описания процессов приема, передачи, обработки, хранения и потери данных и информации, а также соответствующей обобщенной процедуры планирования при взаимодействии группировки маломассоразмерных космических аппаратов и его программной реализации **в космической предметной области** выявлены, в том числе, следующие закономерности: потери информации в группировке маломассоразмерных космических аппаратов обусловлены ограничениями на каналы связи, вычислительные средства, и максимальные объемы запоминающих устройств маломассоразмерных

космических аппаратов. Изменение топологической структуры группировки маломассоразмерных космических аппаратов при одинаковых объемах запоминающих устройств маломассоразмерных космических аппаратов, пропускных способностях вычислительных средств, пропускных способностях каналов связи между маломассоразмерными космическими аппаратами представляют разные возможности по организации управления информационными процессами группировки маломассоразмерных космических аппаратов. Выявленные закономерности подтверждают необходимость и актуальность решения задачи управления структурной динамикой в масштабах всей группировки маломассоразмерных космических аппаратов.

5. Проведенные эксперименты показывают, что получение конечным потребителем максимального количества информации (обработанных данных) при минимальных потерях происходит, если использовать специализированные маломассоразмерные космические аппараты в смешанном составе. Следовательно, важно правильно подбирать маломассоразмерные космические аппараты для выполнения целевых задач. Также выявлено, что наиболее интересные с научной и практической точек зрения результаты можно получить, варьируя следующие параметры разработанных моделей: коэффициент, характеризующий степень обработки информации, коэффициенты важности показателей качества, количество подынтервалов постоянства структур и изменяя топологическую структуру группировки маломассоразмерных космических аппаратов.

6. Результатом решения задачи оперативного планирования с использованием статической модели является план распределения операций, входящих в состав информационных процессов с привязкой к определенным информационным ресурсам (аппаратно-программного комплекса подвижных объектов) и участкам постоянства структуры группировки маломассоразмерных аппаратов (с точки зрения условий распространения электромагнитных колебаний). Такой план выполнения информационных процессов можно условно назвать «пространственным планом выполнения информационных процессов».

План выполнения информационных процессов, полученный с использованием динамической модели, представляет собой набор программных управлений информационными процессами с временной привязкой операций, входящих в информационные процессы, к соответствующим информационным ресурсам. В этом случае соответствующий план назовем условно «детализированным временным планом выполнения информационных процессов». Проведенный анализ статической модели планирования информационных операций при взаимодействии подвижных объектов, показывает, что результаты решения задач планирования с использованием статической модели зависят от объемов запоминающих устройств подвижных объектов, их производительности, а также пропускной способности каналов связи между подвижными объектами. Например, когда целенаправленно создается структурно-функциональная избыточность за счет разнообразия структур (например, за счет маневрирования подвижных объектов) появляется возможность более гибкого обхода заполненных запоминающих устройств подвижных объектов. Благодаря чему создается больше возможностей для организации управления. Следовательно, чем больше участков постоянства структуры, тем больше возможности конфигурации или ухода от проблемных подвижных объектов.

7. Разработанное полимодельное описание позволяет управлять информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов, благодаря чему данный процесс перестает быть ручным, а становится автоматизированным.

8. Оценивание робастности программного управления информационными процессами при взаимодействии группировки маломассоразмерных космических аппаратов позволяет лицу, принимающему решения определить в интерактивном режиме наилучший план, по сути, как в ИСППР.

9. План программного управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов, полученный с применением

динамической модели, является детализацией плана выполнения операций, входящих в структуру информационных процессов, полученный с применением статической модели, но с привязкой ко времени. Резюмируя, можно отметить, что с помощью динамической модели выполняется уточнение плана, синтезированного на основе применения статической модели.

10. Приведено описание возможного использования разработанного прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения в различных предметных областях, в частности, связанных с процессами управления беспилотными летательными аппаратами и маломассоразмерными космическими аппаратами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено **решение важной научно-технической задачи** разработки комбинированных моделей и алгоритмов планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов. Рассматриваемая задача относится к классу большеразмерных нестационарных билинейных многокритериальных задач неклассического вариационного исчисления (оптимального управления) и требует для своего решения особого подхода для учета и преодоления перечисленных ранее трудностей модельно-алгоритмического и вычислительного характера. Решенная задача имеет важное значение для предметных областей, связанных с критическими технологиями и инфраструктурами. Управление данными предметными областями в условиях их изменений, вызванных возмущающими воздействиями внешней среды, приобретает **особую актуальность и значимость**. Приведем основные **итоги диссертационного исследования**.

1 **Предложен** оригинальный способ последовательной декомпозиции большеразмерной нестационарной задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов. Новизна предложенной декомпозиции заключается в том, что в ходе ее реализации выполняется разбиение сложной пространственно-распределенной задачи выбора плана информационного взаимодействия группировок подвижных объектов на две подзадачи, описывающие пространственную и временную составляющие исходной задачи. Пространственную составляющую исходной задачи предложено описывать с помощью статической модели планирования, в рамках которой для заданных участков постоянства пространственной структуры (сетевой топологии) группировки подвижных объектов происходит распределение информационных операций по ресурсам подвижных объектов без привязки их ко времени. Временную составляющую исходной задачи предложено описывать с помощью динамической модели, в рамках которой запланированные на

статической модели операции, входящие в состав информационных процессов, привязываются к конкретным ресурсам и времени.

**2** **Разработано и реализовано** на программном уровне полимодельное (статико-динамическое) описание процесса оптимального управления информационными процессами, которое в общем случае включает в себя процессы приема, передачи, хранения, обработки и потери данных при взаимодействии группировок подвижных объектов. В состав полимодельного описания вошли взаимосвязанные статическая и динамическая модели. Они дополняют и усиливают описательные возможности друг друга. Так в статической модели планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов достаточно просто учитываются такие аспекты информационного взаимодействия, как процессы потери данных, а также ограничения на пропускные способности каналов, которые в динамической модели требуют введения сложных фазовых и смешанных ограничений. В динамической модели в отличие от статической модели проводится детальное описание процессов распределения и обработки данных с привязкой к конкретным моментам времени, что затруднительно описать в статической модели. Более того, с помощью динамической модели можно рассчитать и оптимизировать такие интегральные показатели качества программного управления информационными процессами как показатели равномерности и неравномерности использования ресурсов подвижных объектов как на всем интервале программного управления, так и в каждый текущий момент времени. Расчет данных показателей в статической модели приводит к увеличению ее размерности и необходимости введения нелинейных ограничений.

**3** **Разработаны** комбинированные модели и алгоритмы оптимального оперативного планирования информационных процессов, предназначенные для повышения оперативности и снижения ресурсопотребления при информационном взаимодействии подвижных объектов за счет оптимизации программ управления ими в интересах обеспечения своевременного и обоснованного принятия решений о состоянии как подвижных объектов, так и целевых объектов, которые они

обслуживают. Кроме того, **предложено** оригинальное формальное описание и решение задачи планирования (программного управления) информационных процессов, происходящих при взаимодействии (функционировании) группировок подвижных объектов. Оригинальность подхода состоит в системно-управленческой интерпретации исследуемых процессов, позволившей на конструктивном уровне объединить математический аппарат математического программирования (исследования операций) и теории оптимального управления при синтезе планов и программ управления информационными процессами.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** В дальнейшем следует произвести дополнительные исследования в рамках следующих основных направлений:

— внедрить помимо используемых моделей также модели коррекции программного управления операциями, ресурсами и потоками Гр ПдО;

— внедрить полученные модели и алгоритмы для решения задач комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов мониторинга состояния сложных технических систем;

— разработать методы и алгоритмы ортогонального проектирования многомерных симплексов, описывающих требуемые области значений целевых показателей, которые задаются с использованием аппроксимированных ОД, построенных на основе ДМ для получения и выбора наиболее предпочтительных технологий и программ управления Гр ПдО, принадлежащих соответствующей области компромиссов В. Парето [12,63,98,114,120];

— разработать дискретно-событийную имитационную модель для синтеза аппаратно-программных характеристик при фиксированном плане в современных информационно-вычислительных сетях (промышленный интернет) с применением методов математического программирования и стохастической оптимизации, что позволит учесть не только сложные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, но и воздействия возмущающих факторов на ПдО и структуры Гр [110].



**Соответствие паспорту специальности.** Полученные результаты соответствуют специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АПК – аппаратно-программный комплекс
- АСУ – автоматизированная система управления
- АэСл – аэродромная служба
- БК – бортовой компьютер
- БпЛА – беспилотный летательный аппарат
- ВС – воздушное судно
- ВСр – вычислительные средства
- Гр – группировка
- ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
- ДМ – динамическая модель
- ДС – динамическая система
- ЖЦ – жизненный цикл
- ЗУ – запоминающее устройство
- ИнВ – информационное взаимодействие
- ИВС – информационно-вычислительная сеть
- ИнП – информационный процесс
- ИСППР – информационная система поддержки принятия решений
- ИТ – информационные технологии
- ИТТС – интеллектуальное транспортно-технологическое средство
- КА – космический аппарат
- КнО – контролируемый объект
- КнП – конечный потребитель
- КМ – комплексное (системное) моделирование
- КФС – кибер-физическая система
- ЛА – летательный аппарат
- ЛДМ – логико-динамическая модель
- ЛП – линейное программирование
- ЛПР – лицо, принимающее решения

МКА – маломассоразмерный космический аппарат

МПП – метод последовательных приближений

МППП – математический пакет прикладных программ

ОД – область достижимости

ПдО – подвижный объект

ПО – программное обеспечение

ПрО – предметная область

ПрП – программный прототип (макет)

ПрР – принятие решения

СДО – сложный динамический объект

СЛО – сложный объект

СМ – статическая модель

СМАО – специальное модельно-алгоритмическое обеспечение

СУ – система управления

ТОУ – теория оптимального управления

ЦЗ – целевая задача

ЦЛП – целочисленное линейное программирование

ЦФ – целевая функция

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ackoff R.L. The Art of Problem Solving. New York: Wiley-Interscience, 1978.
2. Basar, T., Olsder, G.J.D. Dynamic Noncooperative Game Theory: Second Edition, London: Academic Press, 1999. 534 p.
3. van den Bosch, P.P.J., van der Klauw, A.C. Modeling, Identification and Simulation of Dynamical Systems / 1st ed. London: CRC Press, 1994. 208 p. DOI: 10.1201/9780138746872.
4. Chauhan, S.S. Scheduling in supply chain environment / S.S. Chauhan, V. Gordon, J.-M. Proth // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 183. – No 3. – Pp. 961-970. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.06.078.
5. Cohon, J.L. Multi-objective Programming and Planning, New York: Dover Publications, 2004. 352 p.
6. Correa, F.R. Cyber-physical systems for construction industry / F.R. Correa // 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), – St. Petersburg, – 2018, Pp. 392-397.
7. Ivanov D. Introduction to Supply Chain Resilience. Management, Modelling, Technology. Springer, Cham. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-70490-2.
8. Ivanov D., Sokolov B. Adaptive Supply Chain Management. Springer, London. 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-952-7.
9. Ivaschenko, A. Optimisation of the rational proportion of intelligent technologies application in service organisations / A. Ivaschenko, T. Nikiforova, A.R. Diyazitdinova // Organizacija. – 2021. – Vol. 54. – No 2. – P. 162-177. – DOI: 10.2478/orga-2021-0011.
10. Farley K.A., Williford K.H., Stack K.M. et al. Mars 2020 Mission Overview // Space Science Reviews. 2020. Volume 216, issue 8. DOI: 10.1007/s11214-020-00762-y.

11. Filippova, T. Ellipsoidal Estimates of Reachable Sets for Nonlinear Control Systems with Bilinear Uncertainty // *Recent Advances in Computational Optimization*. 2020. № 838, Pp. 121–131. DOI: 10.1007/978-3-030-22723-4\_8.
12. Engau, A. Pareto solutions in multicriteria optimization under uncertainty // *European Journal of Operational Research*. 2020. № 281(2). Pp. 357–368. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.08.040.
13. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects // *International Journal of Difference Equations*. 1985. № 21(5). Pp. 502–506.
14. Khmelnitsky, E. Maximum principle-based methods for production scheduling with partially sequence-dependent setups / E. Khmelnitsky, K. Kogan, O. Maimom // *International Journal of Production Research*. – 1997. Vol. 35. – No. 10. Pp. 2701–2712.
15. Klir G.J. *Architecture of Systems Problem Solving*. New York: Plenum Press, 1985.
16. Klir G. *Uncertainty and Information: Foundations of Generalized Information Theory*. NJ.: Wiley, 2005. 518 p.
17. Kofnov O., Sokolov B., Ushakov V. The synthesis of the control function in optimal tasks as a N-dimensional area using parallel projection on 2D plane // *32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS–2020) : Proceedings (Online, 16–18 september 2020)*. cal-tek, 2020, Pp. 262-269. DOI: 10.46354/i3m.2020.emss.037.
18. Lenhard J., Küppers G., Shinn T. *Simulation // Sociology of the Sciences Yearbook*. 2006. Vol. 25 Springer, Dordrecht. 214 p. DOI: 10.1007/1-4020-5375-4.
19. Maki J.N., Gruel D., McKinney C. et al. The Mars 2020 Engineering Cameras and Microphone on the Perseverance Rover: A Next-Generation Imaging System for Mars Exploration // *Space Science Reviews*. 2020. Volume 216, issue 8. DOI: 10.1007/s11214-020-00765-9.
20. MATLAB Documentation  
URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>

21. Multi-Layer Data Model for Transportation Logistics Solutions / A. Ivaschenko, S. Maslennikov, A. Stolbova, O. Golovnin // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No 26. – P. 124-129.
22. Multi-Layer data model of a complex transportation network / A. Ivaschenko, S. Maslennikov, A. Stolbova, O. Golovnin // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems. – 2021. – Vol. 12. – No 2. – P. 21-36. – DOI: 10.4018/IJERTCS.2021040102.
23. Multi-layer Parallelization in Transportation Management Software / A. Ivaschenko, S. Maslennikov, A. Stolbova, O. Golovnin // Communications in Computer and Information Science. – 2021. – Vol. 1417. – P. 44-51. – DOI: 10.1007/978-3-030-88378-2\_4.
24. Siliak, D.D. Decentralized Control of Complex Systems, New York: Academic Press, 1991. 527 p.
25. Singh, M., and Titli A. Systems: Decomposition, Optimization and Control, Oxford: Pergamon Press. 1978. 645 p.
26. Simulation Science / M. Baum, G. Brenner, J. Grabowski, T. Hanschke, S. Hartmann, A. Schöbel (Eds.). 2018. vol. 889. DOI: 10.1007/978-3-319-96271-9.
27. Sokolov, B., Dolgui, A., Ivanov, D.: Optimal Control Algorithms and Their Analysis for Short-Term Scheduling in Manufacturing Systems // Algorithms. 2018. № 11(5). Pp. 99–110. DOI: 10.3390/a11050057.
28. Sokolov B.V., Ushakov V.A. Formation Reachability Area as a Data Vector Using a Dynamic Model for Controlling Information Processes in the Automated Control System for Moving Objects // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2803 Pp. 67-75. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2803/paper10.pdf>.
29. Sokolov B., Ushakov V. Model-algorithmic Support for Abilities Calculating of Control System Based on Projection Operators // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 986. P. 342–348. DOI: 10.1007/978-3-030-19813-8\_35.

30. Sokolov B., Zelentsov V., Mustafin N., Burakov V., Methodology of Complex Objects Structural Dynamics Proactive Management and Control Theory and Its Application // Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 95. Pp. 169–177. DOI: 10.1007/978-3-030-34983-7\_17.
31. Teslya, N., Potryasaev, S. Execution Plan Control in Dynamic Coalition of Robots with Smart Contracts and Blockchain // Information. 2020. Vol. 11(1). DOI: 10.3390/info11010028.
32. Urban Public Transport Digital Planning based on an Intelligent Transportation System / O. Surnin, P. Sitnikov, A. Suprun [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2019. – No 25. – P. 292-298.
33. Ushakov, V. Approximation a Reachability Area in the State Space for a Discrete Task / V. Ushakov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. Vol. 1226. – P. 617–624. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2\_57.
34. Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В. Емельянова. И.: Машиностроение, 1988. 520 с.
35. Акофф Р. Планирование в больших экономических системах – М.: Советское радио, 1972. 244 с.  
Ackoff R.L. A concept of corporate planning. New York: Wiley-Interscience, 1970.
36. Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний. Труды Института системного программирования РАН, Т. 26, Вып. 3, 2014, С. 5–50.
37. Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968. 764 с.
38. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. 401 с.
39. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией. М.: Наука, 1964. 359 с.
40. Бир С. Мозг фирмы - 3-е издание. М.: УРСС, 2009. 416 с.

41. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления – М.: Наука, 1968. 408 с.
42. Бочарников А.И., Коваленко В.П., Коваленко А.В., Тихонычев В.В., Худяков А.В. Космическая зональная съемка для определения скорости и ускорения подвижных объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, № 1. С. 48–58. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.48.58.
43. Брайсон А., Хо-Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. – М.: Наука, 1972. 544 с.
44. Бугров Д.И., Формальский А.М. Зависимость от времени областей достижимости систем третьего порядка // Прикладная математика и механика. 2017. Т 81, №. 2, С. 154–164.
45. Булаев В.В., Осипов И.О. Модифицированный алгоритм построения областей достижимости линейных дискретных динамических систем // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. Т 18, №. 1, С. 56–62.
46. Булаев В.В., Осипов И.О. Об одном модифицированном рекуррентном алгебраическом методе построения областей достижимости линейных дискретных динамических систем // Ракетно-космическая техника. 2017. Т 1, №. 2(10), С. 4–15.
47. Булгаков Б.В. Колебания. М.: Гостехтеориздат, 1954. 852 с.
48. Бураков В.В., Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. [и др.] Методологические и методические основы оценивания и выбора эффективных технологий автоматизированного управления активными подвижными объектами на основе комплексного моделирования // H&ES Research. – 2016. – Том VIII. – № 3. – С. 6–13.
49. Быстров А.В., Карпенко А.П., Козлова О.Г., Федин В.А. Система поддержки принятия решений при выборе параллельного аппаратно-программного комплекса для построения областей достижимости летательного аппарата // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2011). М.: Издательский центр



ЮУрГУ, 2011. С. 60–68.

50. Вагнер Г.И. Основы исследования операций / Перевод с английского Б.Т. Вавилова, Т. 1. М.: Мир, 1972, 337 с.

51. Васильев А.А., Догадин А.В., Левшаков В.М., Невская А.Н. Технология и технологическое оборудование корпусообрабатывающих цехов судостроительных предприятий // Санкт-Петербург: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2016. – 199 с.

52. Вдовина О.И., Сесекин А.Н. Численное построение областей достижимости для систем с импульсным управлением // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2005. Т 11, № 1, С. 65–73.

53. Винер Н. Кибернетика и общество. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 200 с.

54. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине – 2-е издание. М.: Наука, 1983. 338 с.

55. Вундер Н.А., Дударенко Н.А. Оценка робастности отклонений траекторий свободного движения апериодических систем методами теории чувствительности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 4. С. 704–707. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-704-707.

56. Габасов, Р., Кириллова Ф.М. Принцип максимума в теории оптимального управления. М.: УРСС, 2018. 272 с.

57. Гниденко, А.С. Модели и алгоритмы оценивания устойчивости планов функционирования сложных технических объектов / А.С. Гниденко, С.А. Потрясаев, Е.Н. Ростова // Информатизация и связь. – 2019. – № 2. – С. 103–111. – DOI: 10.34219/2078-8320-2019-10-2-103-111.

58. Горанов А.Ю., Шорилов А.Ф. Анализ точности общего алгебраического метода построения областей достижимости линеаризованных динамических систем // Труды второй научно-технической конференции молодых ученых уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 407–410.

59. ГОСТ 34.003-90. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009. 16 с. (Информационная технология).
60. ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2014. 18 с. (Защита информации).
61. ГОСТ Р 53114-2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. М.: Стандартиформ, 2018. 16 с. (Защита информации).
62. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Процессы жизненного цикла программных средств. М.: Стандартиформ, 2011. 105 с. (Информационная технология. Системная и программная инженерия).
63. Губанов В.А., Захаров В.В., Коваленко А.Н. Введение в системный анализ / Под ред. Л. А. Петросяна. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. 232 с.
64. Добановский С.А., Озерянный Н.А. Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация, 1990, № 4(76). – С. 62–80.
65. Емельянов А.В., Левко И.В., Легков К.Е. Методика оперативного решения информационно-расчетных задач программно-техническим комплексом на основе рационального распределения информационно-вычислительных ресурсов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 129–134.
66. Заде Л. Теория линейных систем. Метод пространства состояний. – М.: Наука, 1970. 704 с.
67. Зайченко Ю.В., Кулаков А.Ю., Соколов Б.В., Черный А.Н. Специальное программно-математическое обеспечение управления реконфигурацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов //

Информатизация и связь. 2020. № 5. С. 125–131. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-126-131.

68. Захаров В.В. Динамическая интерпретация формального описания и решения задачи модернизации сложных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 914—920. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-914-920.

69. Захаров В.В. Модели и алгоритмы планирования функционирования и модернизации корпоративной информационной системы на основе сервис-ориентированного подхода: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01: СПб., 2021. 172 с.

70. Захаров В.В. Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 975–984. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-975-984.

71. Захаров В.В. Управление развитием производственных объектов // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ–2019) : Труды (Москва, 17–20 июня 2019 г.). / Под общ. ред. Д.А. Новикова. – М.: ИПУ РАН – 2019. С. 3114–3119. DOI: 10.25728/vspru.2019.3114.

72. Захаров В.В., Ушаков В.А. Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 585–588. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-585-588.

73. Зеленцов В.А., Кожанов А.Н., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методы и программные средства комплексного моделирования функционирования АСУ подвижными объектами // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 240–243.

74. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Кожанов А.Н., Верзилин Д.Н. Полимодельное описание и алгоритмы многокритериального оценивания характеристик АСУ подвижными объектами // XII Всероссийское совещание по

проблемам управления (ВСПУ–2014) : Материалы (Москва, 16-29 июня 2014 г.). – М.: ИПУ РАН – 2014. С. 5053–5063.

75. Зимин И.Н. Алгоритм расчета сетей при переменных интенсивностях выполнения операций // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. – 1973. – № 6. – С. 17–23.

76. Зимин И.Н., Иванчиков Ю.П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1971. – №3. – С. 632–641.

77. Иванов В.А., Фалдин Н.В. Теория оптимальных систем автоматического управления. – М. – Наука, 1981. 336 с.

78. Исаев Г.А. Решение задач целочисленного, смешанного и булева программирования в среде MATLAB 2016  
URL: <http://www.math.spbu.ru/kio/lectures/intlinprog.pdf>

79. Искусственный интеллект в космической технике. Состояние и перспективы применения. Под редакцией Балухто А.Н. – М.: Радиотехника, 2021 – 436 с.

80. Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ, 1978. 417 с.

81. Калинин В.Н., Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56–61.

82. Каргин В.А., Николаев Д.А., Скороходов Я.А. Оценивание вероятностных характеристик телеметрируемых процессов ракет-носителей в реальном масштабе времени // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – № 644. – С. 161–168.

83. Касаткин, В.В. Предметная область информационного взаимодействия / В.В. Касаткин, М.О. Колбанев, Т.М. Татарникова // Региональная информатика и информационная безопасность : Сборник трудов. Том Выпуск 1. – СПб: СПОИСУ, 2015. – С. 260-264.

84. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990. 544 с.
85. Колесников К.Г., Масалкин А.А., Москвин Б.В. Параметрическая оптимизация информационного обмена в сети связи с динамически изменяющейся структурой // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – № 668. – С. 31–36.
86. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей / Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К., Черных О.Л. – М.: Наука, 1997. – 240 с.
87. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 368 с.
88. Костевич Л.С., Лапко А.А. Исследование операций. Теория игр. Минск: Вышэйшая школа, 2008. — 368 с.  
URL: <http://www.iprbookshop.ru/20076.html>.
89. Костюкова О., Курдина М. Теория оптимального управления // Наука и инновации. 2017. Т. 7, № 173. С. 24–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-optimalnogo-upravleniya> (дата обращения: 26.01.2019).
90. Кофнов О.В. Визуализация многомерной области допустимых значений в задачах управления сложными объектами // Информатизация и связь, 2020. № 5. С. 29–33. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-29-33.
91. Красовский Н.Н., Репин Ю.М., Третьяков В.Е. О некоторых игровых ситуациях в теории управляемых систем // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. 1965. № 4. С. 1–11.
92. Крылатов А.Ю. Оптимизационные модели и методы равновесного распределения потоков в транспортных сетях: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук. СПб., 2018. 294 с.
93. Крылов А.В., Охтилев М.Ю., Соболевский В.А., Соколов Б.В., Ушаков В.А. Методологические и методические основы создания и использования интегрированных систем поддержки принятия решений // Известия высших

учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 963–974.  
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-963-974.

94. Крылов И.А., Черноусько Ф.Л. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1972. Т. 12, № 1. С. 14–34.

95. Кулаков А.Ю., Кулаков Ф.М., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Модельно-алгоритмическое обеспечение планирования реконфигурации бортовой аппаратуры маломассоразмерных космических аппаратов // Информационные технологии в управлении (ИТУ–2018) : материалы конференции (Санкт-Петербург, 02–04 октября 2018 г.). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 123–130.

96. Кулаков А.Ю., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 7. С. 596–603. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-596-603.

97. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 2011. – 222 с.

98. Любушин А.А. Модификация и исследование сходимости метода последовательных приближений для задач оптимального управления. – Журнал вычислительной математики и математической физики, 1979. Т. 19, № 6. С. 1414–1421.

Lyubushin, A.A. Modifications and convergence of successive approximations for optimal control problems – USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1979. Vol. 19(6). Pp. 53-61. DOI: 10.1016/0041-5553(79)90036-3.

99. Малые космические аппараты / С.В. Абрамеев, В.А. Саечников, А.А. Спиридонов. – Минск : БГУ, 2012. – 159 с.

100. Малые космические аппараты для больших оборонных задач // Арсенал Отечества. 2015. № 4(18). URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/617-smallspaceships>
101. Манкрес Д. Алгоритмы решения задачи выбора и транспортной задачи // Методы и алгоритмы решения транспортной задачи Вып. 1. М.: Госстатиздат, 1963, с. 73–79.
102. Мануйлов Ю.С., Павлов А.Н., Осипенко С.А., Павлов Д.А. Сравнительный анализ результатов планирования комплекса операций информационного взаимодействия сложных объектов в динамически изменяющихся условиях // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – № 647. – С. 30–36.
103. Марьясов, К.А. Система оптического позиционирования БЛА при посадке / К.А. Марьясов // Молодежь. Техника. Космос: Труды XI Общероссийской молодежной научно-технической конференции (СПб, 24–26 апреля 2019 года). – СПб: Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2019. – С. 334-338.
104. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых системы. – М.: Мир, 1973. 344 с.
105. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с. DOI: 10.31857/S9785907036321000001.
106. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. 488 с.
107. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1975. 528 с.
108. Москвин Б.В. Оптимизация передачи данных в вычислительной сети с коммутацией пакетов // I Всесоюзная конференция «Компак 87». – Рига, 1987. – С. 168–171.

109. Москвин Б.В., Михайлов Е.П., Павлов А.Н., Соколов Б.В. Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 7–11.

110. Мурашов Д.А., Ушаков В.А. Постановка и анализ путей решения задачи синтеза программ управления и параметров информационно-вычислительной сети на основе полимодельного описания // Авиакосмическое приборостроение. 2022. № 8. С. 23–32. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2022.1293.

111. Назаров Д.И. Модели и программный комплекс решения задач планирования измерительно-вычислительных операций в киберфизических системах // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 947—955. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-11-947-955.

112. Николаев В.И., Брук В.В. Системотехника: методы и приложения. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.

113. Новиков Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. -М.: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с. / Novikov D.A. Cybernetics: from Past to Future. - Heidelberg: Springer, 2016. – 107 p.

114. Ногин В.Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016.– 249 с.

115. Овсеевич А.И. Области достижимости управляемых систем, их свойства, аппроксимации и применения: дис. ... д-р физ.-мат. наук. -Москва, 1996. 153 с.

116. Охтилев М.Ю. Системы искусственного интеллекта и их применение в автоматизированных системах мониторинга состояния сложных организационно-технических объектов: монография. СПб.: ГУАП, 2018. 261 с.

117. Охтилев М.Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа. – СПб.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1998. – 161 с.



118. Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 7–15.

119. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Потрясаев С.А. Модель и алгоритмы оценивания робастности плана функционирования информационной системы // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого) : Материалы XIII Международной конференции. – Москва: ИПУ РАН, 2016. – С. 270-271.

120. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов: монография. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

121. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С. 162–174.

122. Павлов Д.А. Методика планирования операций информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – № 649. – С. 37–47.

123. Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. Вып. 2. – М.: Фазис, 2000. 144 с.

124. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989. 361 с.

125. Пешель М. Моделирование сигналов и систем / пер. с нем. Я.И. Хургина. – М.: Мир, 1981. 304 с.

126. Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференций «Имитационное

моделирование. Теория и практика» (ИММОД)) // Труды СПИИРАН. 2013. № 25(2). С. 42–112. DOI: 10.15622/sp.25.3.

127. Полляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. – М.: Советское радио, 1971. 400 с.

128. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкредидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. 4-е изд. М.: Наука, 1983. 392 с.

129. Потрясаев С.А. Динамическая модель и алгоритмы комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01: СПб., 2009. 159 с.

130. Потрясаев С.А. Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 46–52.

131. Потрясаев С.А. Синтез технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете: Дисс. ... д-р техн. наук: 05.13.01, 05.13.11: СПб., 2020. 312 с.

132. Потрясаев С.А., Ронжин А.Л., Соколов Б.В., Джао В.Ю.-Д., Степанов П.В., Стыскин М.М. Полимодельный комплекс мобильной сервисной системы, предназначенной для обслуживания воздушных судов // Информатизация и связь, 2020, № 6, С. 113–118.

133. Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Степанов П.В., Стыскин М.М. Разработка и внедрение отечественных интеллектуальных наземных транспортно-технологических средств обслуживания самолетов в едином цифровом пространстве аэропорта // Информационные технологии в управлении (ИТУ–2022): Материалы конференции (Санкт-Петербург, 4-6 октября 2022 г.). СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор» – 2022. С. 306-308.

134. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: Синтег, 2000. 528 с.

135. Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний / Р.А. Бадамшин, Б.Г. Ильясов, Л.Р. Черняховская. – М.: Машиностроение, 2003. – 240 с.

136. Ронжин А.Л., Соколов Б.В., Джао В.Ю-Д., Миронова Е.Г., Стыскин М.М. Применение технологии радиочастотной идентификации для построения системы контроля оборота бортового кухонного оборудования // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 2020, вып. 1. С. 3–10.

137. Ростовцев Ю.Г., Юсупов Р.М. Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1991. Т. 34, № 7. С. 7–14.

138. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 350 с.

139. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. 320 с.

140. Семашкин В.Е. Максимизация дальности управляемого полета с использованием метода Крылова-Черноузько // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) : Материалы конференции (Москва, 17-20 июня 2019 г.). М.: ИПУ РАН – 2019. С. 1267–1271. DOI: 10.25728/vspu.2019.1267.

141. Сергеев А.Н., Соловьева Н.А., Чернэуцану Решение задач линейного программирования в среде Matlab // Семинар по дискретному гармоническому анализу и геометрическому моделированию «DHA & CAGD». СПб, 2011. С. 1–9. URL: <http://dha.spb.ru/PDF/MatLabLP.pdf>.

142. Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 1989. 207 с.

143. Смирнов А.В. Интеллектуальная поддержка реинжиниринга конфигураций производственных систем // Программные продукты и системы. № 3, 1998. С. 10–12.

144. Смирнов А.В., Левашова Т.В., Шилов Н.Г., Кашевник А.М. Поддержка принятия решений в децентрализованной среде на основе сети Web-сервисов // Таврический вестник информатики и математики. 2008. № 2. С. 186–194.

145. Смирнов П.О. Робастные методы и алгоритмы оценивания корреляционных характеристик данных на основе новых высокоэффективных и быстрых робастных оценок масштаба : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. – СПб., 2013. – 182 с. DOI: 10.13140/RG.2.2.13551.02720.

146. Соколов Б.В. Динамические модели и алгоритмы комплексного планирования работы наземных технических средств с навигационными космическими аппаратами // Труды СПИИРАН, 2010. № 13(2). С. 7–44. DOI: 10.15622/sp.13.1.

147. Соколов Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. – МО, 1992. 232 с.

148. Соколов Б.В., Калинин В.Н. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика, 1985, № 5. – С. 106–114.

149. Соколов Б.В., Ковалев А.П., Мустафин Н.Г., Захаров В.В., Щербакова Е.Е. Методологические основы проактивного управления социокиберфизическими системами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 12. С. 1018–1021. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-12-1018-1021.

150. Соколов Б.В., Палицын В.А. Алгоритмы управления комплексами измерительных средств // Вестник воздушно-космической обороны. – 2016. – № 4(12). – С. 9–16.

151. Соколов Б.В., Ушаков В.А. Динамическая модель и алгоритм управления приема, передачи и обработки информации в автоматизированной системе управления подвижными объектами // Технологические тренды и наукоемкая экономика: бизнес, отрасли, регионы : монография. СПб.: Астерион, 2021. С. 92–109.

152. Соколов Б.В., Ушаков В.А. Модели и алгоритмы оперативного планирования информационных процессов в динамической сети, образованной подвижными объектами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 29–36.

153. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ междисциплинарного взаимодействия современной информатики и кибернетики: теоретические и практические аспекты // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014) : Материалы (Москва, 16–29 июня 2014 г.). – М.: ИПУ РАН – 2014. – С. 8625–8636.

154. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. № 5. С. 103–117.

155. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Полиmodelное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами // Труды СПИИРАН, 2010. № 15(4). С. 7–52.

156. Стариченков А.Л., Модин Н.В. Алгоритмы функционирования интеллектуальных систем управления морскими подвижными объектами // Транспорт России: Проблемы и перспективы – 2020 : материалы юбилейной международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 г.). СПб.: ИПТ РАН, 2020. С. 121-125.

157. Стыскин М.М., Степанов П.В., Желтов С.Ю., Соколов Б.В., Ронжин А.Л. Средства оптической и радиочастотной идентификации в технологическом процессе автоматизированного цифрового контроля оборота мобильного бортового оборудования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. № 10(1). С. 1–15. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.003.

158. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. М. – Наука, 1975. 280 с.

159. Тимофеев И.С., Толпегин О.А. Приближенный расчет области достижимости космического летательного аппарата // Известия РАН. 2010. № 4(66). С. 34–39.

160. Танаев В.С., Шкурба В.В. Введение в теорию расписаний. М.: Наука, 1975. 256 с.

161. Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.; под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. 250 с.

162. Тимофеев, И.С. Приближенный расчет области достижимости космического летательного аппарата / И.С. Тимофеев, О.А. Толпегин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2010. – № 4(66). – С. 34-39.

163. Толпегин О.А. Дифференциально-игровые методы управления движением беспилотных летательных аппаратов : монография. СПб: БГТУ ВОЕНМЕХ, 2009. 244 с.

164. Толпегин О.А. Области достижимости летательных аппаратов. СПб: БГТУ ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова, 2013. 141 с.

165. Толпегин О.А. Управление ракетами на основе расчёта областей достижимости // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. Т. 14, № 1. С. 73-82. DOI: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-73-82.

166. Ушаков В.А. Алгоритм планирования информационных процессов в автоматизированной системе управления подвижными объектами // Перспективные системы и задачи управления : Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». —Таганрог : ИП Марук М.Р., 2021. С. 327–330.

167. Ушаков В.А. Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов // Морские

интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1. С. 235—247.  
DOI: 10.37220/МІТ.2022.57.3.031.

168. Ушаков В.А. Модельно-алгоритмическое обеспечение оперативного оценивания и анализа показателей качества управления информационными процессами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 688-692. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-688-692.

169. Ушаков В.А. Области достижимости и проектирующие операторы в задачах оптимального управления // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) : Материалы конференции (Москва, 17-20 июня 2019 г.). М.: ИПУ РАН – 2019. С. 1037–1042. DOI: 10.25728/vspu.2019.1037.

170. Ушаков В.А. Оценка робастности динамической модели управления информационными процессами в автоматизированной системе управления подвижными объектами // Научная сессия ТУСУР–2021: сборник избранных статей (Томск, 19–21 мая 2021 г.): в 3 частях.–Томск: В-Спектр, 2021. –Ч. 2. С. 176–179.

171. Ушаков В.А. Построение областей достижимости в пространстве возмущений для оценивания робастности планов информационного взаимодействия группировки подвижных объектов // Материалы IV Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (Иркутск, 4–8 июля 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2022. С. 127–129.

172. Ушаков В.А. Разработка статической модели управления структурной динамикой автоматизированной системы управления подвижными объектами // XLV Академические чтения по космонавтике. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. Т. 3. С. 55–57.

173. Ушаков В.А. Управление информационными процессами на динамических сетях // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : сборник докладов (Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 г.). – СПб.: ГУАП, 2021. С. 168–169.

174. Ушаков В.А., Соколов Б.В., Тюгашев А.А. Полиmodelное описание и алгоритмы оперативного программного управления информационными процессами на динамических сетях // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции (Санкт-Петербург, 13–14 октября 2021 г.). – СПб.: Политех-пресс, 2021. Ч. 3. С. 75–81. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-357.

175. Фрадков А.Л. Роль математиков в развитии кибернетики и искусственного интеллекта в Ленинграде – Санкт-Петербурге: от Л.В. Канторовича и В.А. Якубовича до наших дней // Математическая теория управления и ее приложения (МТУиП–2022): Материалы конференции (Санкт-Петербург, 4–6 октября 2022 г.). СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор» – 2022. С. 306-308.

176. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982. 200 с.

177. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). – М.: Наука, 1993. 157 с.

178. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И., Филимонов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. – М.: Наука, 1985. 173 с.

179. Чен К., Джиблин П., Ирвинг А. Matlab в математических исследованиях: пер. с англ. В.Е. Кондрашова и С.Б. Королева. М.: Мир, 2001. 346 с.

180. Черноусько, Ф.Л. Некоторые свойства оптимальных эллипсоидов, аппроксимирующих множества достижимости / Ф.Л. Черноусько, А.И. Овсеевич // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 388. – № 4. – С. 462-465. Chernous'ko, F.L. Some properties of optimal ellipsoids approximating reachability sets / F.L. Chernous'ko, A.I. Ovseevich // Doklady Mathematics. – 2003. – Vol. 67. – No 1. – P. 123–126.



181. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько. – М.: Наука, 1988. – 320 с.
182. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. – М.: Иностранная литература, 1959. 432 с.
183. Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Птушкин А.И., Иконникова А.В., Потрясаев С.А., Цивирко Е.Г. Анализ состояния исследований проблем управления жизненным циклом искусственно созданных объектов // Труды СПИИРАН. 2011. № 16 (1). С. 37–109.
184. Онлайн-табло. — Текст : электронный // Официальный сайт международного аэропорта Жуковский : [сайт]. — URL: <https://zia.aero/> (дата обращения: 05.08.2022).

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1.1 – Классификация задач планирования работы АСУ ПдО [120]	23
Рисунок 1.2 – Место разрабатываемых в диссертации методов и алгоритмов решения задач оптимального оперативного планирования ИнП [69].....	26
Рисунок 1.3 – Варианты многоструктурной динамики Гр ПдО [120].....	31
Рисунок 1.4 – Пространственное перемещение орбитальной Гр МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [79].....	32
Рисунок 1.5 – Варианты постоянства топологической структуры Гр МКА, обеспечивающей их ИнВ [152].....	32
Рисунок 1.6 – Пример структурной динамики ИнВ Гр ИТТС .....	33
Рисунок 1.7 – Предлагаемая декомпозиция задачи планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО .....	45
Рисунок 2.1 – Сценарий взаимодействия статической и динамической моделей планирования ИнП.....	52
Рисунок 2.2 – Разделение функции Гамильтона на подзадачи .....	68
Рисунок 3.1 – Внешняя аппроксимация ОД ДС [129,131].....	80
Рисунок 3.2 – Наиболее характерные случаи взаимного расположения ОД и недопустимых значений показателей качества.....	81
Рисунок 3.3 – Обобщенная процедура планирования ИнП при взаимодействии ПдО м использованием СМ и ДМ .....	86
Рисунок 4.1 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый при решении задачи планирования информационных операций с использованием СМ (вид 1) .....	93
Рисунок 4.2 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый при решении задачи планирования информационных операций с использованием СМ (вид 2) .....	94
Рисунок 4.3 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый для генерации исходных данных в СМ.....	95

Рисунок 4.4 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый для ввода исходных данных в СМ.....	95
Рисунок 4.5 – Отображение процесса загрузки исходных данных для СМ из файла *.mat.....	96
Рисунок 4.6 – Визуализация структурных состояний, полученных с помощью МППП Matlab .....	96
Рисунок 4.7 – Разработанный пользовательский интерфейс, используемый для редактирования ДМ.....	98
Рисунок 4.8 – UML диаграмма компонентов разработанного прототипа СМАО .....	99
Рисунок 4.9 – Пример изображения аппроксимированной ОД по возмущениям в пространстве показателей качества планирования, который реализован с использованием инструментальных средств Matlab .....	100
Рисунок 4.10 – Пример задания исходных данных о параметрах АПК МКА ДЗЗ, входящих в Гр МКА, и структурной динамике Гр МКА.....	104
Рисунок 4.11 – Визуализация плана, полученного с помощью СМ.....	105
Рисунок 4.12 – Визуализация плана, полученного с помощью ДМ [167] ..	105
Рисунок 4.13 – Рассчитанный оптимальный план выполнения информационного процесса, который должен быть выполнен при взаимодействии Гр МКА.....	106
Рисунок 4.14 – Изображения различных планов выполнения ИнП при взаимодействии Гр МКА, с использованием аппроксимированных ОД в пространстве показателей качества планирования.....	108
Рисунок 4.15 – Исходные данные для проведения планирования ИнП Гр МКА в рамках заданных сценариев (пункт «а» соответствует сценарию № 1, пункт «б» соответствует сценарию № 2) реализации ее структурной динамики .....	110
Рисунок 4.16 – Сценарии (пункт «а» соответствует сценарию № 1, пункт «б» соответствует сценарию № 2) структурной динамики Гр МКА и их ИнВ [167] .	111

Рисунок 4.17 – Влияние использования специализированных МКА на объем информации, полученный КнП.....	112
Рисунок 4.18 – Обобщенная структура ИТТС [133] .....	115
Рисунок 4.19 – БК ИТТС .....	116
Рисунок 4.20 – Онлайн-табло рейсов на сутки в аэропорту Жуковский [184] .....	118
Рисунок 4.21 – Структурное состояние 2 Гр ИТТС .....	120
Рисунок 4.22 – Структурное состояние 3 Гр ИТТС .....	120
Рисунок 4.23 – Структурное состояние 4 Гр ИТТС .....	120
Рисунок 4.24 – Структурное состояние 5 Гр ИТТС .....	121
Рисунок 4.25 – Структурное состояние 6 Гр ИТТС .....	121
Рисунок 4.26 – Структурное состояние 7 Гр ИТТС .....	121
Рисунок 4.27 – Структурное состояние 1 Гр ИТТС .....	122
Рисунок 4.28 – Структурное состояние 8 Гр ИТТС .....	122
Рисунок 4.29 – Результаты оценки робастности программ управления ИнП при функционировании Гр ИТТС в условиях действия интервально заданных возмущений.....	125
Рисунок 4.30 – Оценка робастности планов ИнВ Гр ИТТС .....	126

## СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 4.1 – Сравнение результатов, полученных с помощью эвристического планирования и оптимального оперативного планирования с использованием разработанного СМАО для Гр МКА .....	106
Таблица 4.2 – Сравнение результатов для различных сценариев планирования ИнП при взаимодействии Гр МКА .....	111
Таблица 4.3 – Соответствие номера рейса типу ВС и количеству требуемых ИТТС для его обслуживания.....	118
Таблица 4.4 – Соответствие участков постоянства структуры и длительности временных интервалов их существования (аэропорт Жуковский).....	119
Таблица 4.5 – Сравнение результатов, полученных с помощью эвристического планирования и оптимального оперативного планирования с использованием разработанного СМАО для Гр ИТТС.....	126

## ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Список основных публикаций соискателя по теме диссертации

**Статьи, опубликованные в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:**

1. Захаров, В.В. Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами / В.В. Захаров, **В.А. Ушаков** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. Т. 62. № 6. – С. 585–588. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-585-588.

2. Крылов, А.В. Методологические и методические основы создания и использования интегрированных систем поддержки принятия решений / А.В. Крылов, М.Ю. Охтилев, В.А. Соболевский, Б.В. Соколов, **В.А. Ушаков** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. Т. 63. № 11. – С. 963–974. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-963-974.

3. **Ушаков, В.А.** Модельно-алгоритмическое обеспечение оперативного оценивания и анализа показателей качества управления информационными процессами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. Т. 64. № 8. – С. 688–692. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-688-692.

4. **Ушаков, В.А.** Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов / В.А. Ушаков // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. № 3 часть 1. – С. 235–247. DOI: 10.37220/МІТ.2022.57.3.031.

5. Мурашов, Д.А. Постановка и анализ путей решения задачи синтеза программ управления и параметров информационно-вычислительной сети на основе полимодельного описания / Д.А. Мурашов, **В.А. Ушаков** // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. № 8. – С. 23–32. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2022.1293.

**Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых WoS/Scopus:**

6. Sokolov, B. Model-algorithmic Support for Abilities Calculating of Control System Based on Projection Operators / B. Sokolov, **V. Ushakov** // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. –2019. Vol. 986. – P. 342–348. DOI: 10.1007/978-3-030-19813-8\_35.

7. **Ushakov, V.** Approximation a Reachability Area in the State Space for a Discrete Task / V. Ushakov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. Vol. 1226. – P. 617–624. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2\_57.

8. Kofnov, O. The synthesis of the control function in optimal tasks as a N-dimensional area using parallel projection on 2D plane / O. Kofnov, B. Sokolov, **V. Ushakov** // *Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2020)*. – 2020. – Pp. 262–269. DOI: 10.46354/i3m.2020.emss.037.

9. Sokolov, B. Formation Reachability Area as a Data Vector Using a Dynamic Model for Controlling Information Processes in the Automated Control System for Moving Objects / B. Sokolov, **V. Ushakov** // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2020. Vol. 2803. – Pp. 67–75. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2803/paper10.pdf>.

**Научные тезисы и доклады, опубликованные в других изданиях:**

10. Соколов, Б.В. Модели и алгоритмы оперативного планирования информационных процессов в динамической сети, образованной подвижными объектами / Б.В. Соколов, **В.А. Ушаков** // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2022. № 683. – С. 29–36.

11. **Ушаков В.А.** Области достижимости и проектирующие операторы в задачах оптимального управления / В.А. Ушаков // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ–2019) : Труды (Москва, 17–20 июня 2019 г.). / Под общ. ред. Д.А. Новикова. – М.: ИПУ РАН – 2019. – С. 1037–1042. DOI: 10.25728/vspru.2019.1037.

12. **Ушаков, В.А.** Алгоритм планирования информационных процессов в автоматизированной системе управления подвижными объектами / В.А. Ушаков // *Перспективные системы и задачи управления* : Материалы XVI Всероссийской

научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог : ИП Марук М.Р., – 2021. – С. 327–330.

13. Соколов, Б.В. Динамическая модель и алгоритм управления приема, передачи и обработки информации в автоматизированной системе управления подвижными объектами / Б.В. Соколов, **В.А. Ушаков** // Технологические тренды и наукоемкая экономика: бизнес, отрасли, регионы : монография. – СПб.: Астерион, – 2021. – С. 92–109.

14. **Ушаков, В.А.** Разработка статической модели управления структурной динамикой автоматизированной системы управления подвижными объектами / В.А. Ушаков // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов в 4 т. (Москва, 30 марта – 2 апреля 2021 г.). – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2021. Т. 3. – С. 55–57.

15. **Ушаков, В.А.** Оценка робастности динамической модели управления информационными процессами в автоматизированной системе управления подвижными объектами / В.А. Ушаков // Научная сессия ТУСУР–2021: сборник избранных статей (Томск, 19–21 мая 2021 г.): в 3 частях.–Томск: В-Спектр, – 2021. Ч. 2. – С. 176–179.

16. **Ушаков, В.А.** Полиmodelное описание и алгоритмы оперативного программного управления информационными процессами на динамических сетях / В.А. Ушаков, Б.В. Соколов, А.А. Тюгашев // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции (Санкт-Петербург, 13–14 октября 2021 г.). – СПб.: Политех-пресс, – 2021. Ч. 3. – С. 75–81. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-357.

17. **Ушаков, В.А.** Построение областей достижимости в пространстве возмущений для оценивания робастности планов информационного взаимодействия группировки подвижных объектов / В.А. Ушаков // Материалы IV



Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (Иркутск, 4–8 июля 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, – 2022. – С. 127–129.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

## Копии актов реализации

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК» (СПб ФИЦ РАН)**

14 линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178

Телефон: (812) 328-34-11, факс: (812) 328-44-50, E-mail: info@spcras.ru, https://spcras.ru/

ОКПО 04683303, ОГРН 1027800514411, ИНН/КПП 7801003920/780101001

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе

СПб ФИЦ РАН,

д.т.н., профессор РАН



С.В. Кулешов

14 октября 2022 г.

**АКТ РЕАЛИЗАЦИИ**

результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени  
кандидата технических наук Ушакова Виталия Анатольевича

Комиссия в составе:

**Председатель** – заведующий лабораторией интеллектуальных систем СПб ФИЦ РАН,  
доктор технических наук, профессор Искандеров Ю.М.

**Члены комиссии:**

- ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании (ЛИТСАМ) СПб ФИЦ РАН, доктор технических наук, доцент Спесивцев А.В.,
- ведущий научный сотрудник лаборатории ЛИТСАМ СПб ФИЦ РАН, доктор технических наук, профессор Микони С.В.,

рассмотрела материалы диссертационной работы Ушакова В.А., выполненной на тему: **«Комбинированные модели и алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов»** и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а также промежуточные и итоговые отчеты по:

- государственным заданиям 0073-2018-0003 и 0073-2019-0004 на проведение НИР по теме «Методология и технологии интеграции существующих и перспективных государственных и коммерческих информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла» (2018-2021 годы);
- гранту РФФИ «Аспиранты» в рамках научного проекта № 19-38-90221 «Разработка и исследование методов и алгоритмов оперативного многокритериального оценивания и анализа показателей качества автоматизированной системы управления подвижными объектами на основе построения областей достижимости в пространстве системотехнических параметров» (2019-2022 годы) (*лауреат конкурса на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре*);
- гранту РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01505 «Разработка и исследование методов и алгоритмов проактивного управления восстановлением

работоспособности бортовых систем сложных динамических объектов при возникновении нештатных ситуаций» (2020 г.);

- гранту РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01046 «Комбинированные методы и алгоритмы комплексного моделирования, многокритериального оценивания и оптимизации показателей живучести и эффективности функционирования сложных объектов, обладающих структурно-функциональной избыточностью» (2021 г.),

и установила, что основные положения диссертационной работы Ушакова В.А. были использованы в полном объеме при выполнении перечисленных грантов РФФИ и государственных заданий в 2018-2021 годах.

Разработанное в диссертации специальное модельно-алгоритмическое обеспечение, включающее в себя статическую и динамическую модели планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, было реализовано в полном объеме в СПИИРАН и СПб ФИЦ РАН в рамках перечисленных проектов.

Разработанное новое математическое и программное обеспечение получило широкую практическую реализацию при решении различных классов прикладных задач планирования информационных процессов при взаимодействии группировок таких подвижных объектов как маломассоразмерные космические аппараты дистанционного зондирования Земли, интеллектуальные транспортно-технологические средства обслуживания воздушных судов гражданской авиации.

При этом, использование предложенного Ушаковым В.А. полимодельного описания задачи планирования информационных процессов (ИнП) при взаимодействии группировки подвижных объектов позволило использовать достоинства как статической, так и динамической моделей, а также взаимно компенсируя, недостатки каждой из разработанных модели. Результаты проведенных исследований показали, что разработанные комбинированные модели и алгоритмы также можно реализовать в современных и перспективных распределенных информационно-вычислительных сетях с перестраиваемой (конфигурируемой) структурой, которые в настоящее время начинают использоваться при реализации технологий облачных, граничных и туманных вычислений.

Полученные положительные эффекты от внедрения результатов диссертационных исследований Ушакова В.А. базируются на новой системно-кибернетической интерпретации процессов комплексного планирования применения подвижных объектов, состоят в повышении оперативности и качества синтезируемых программ управления данными объектами по сравнению с существующими подходами к решению задач планирования.

Председатель комиссии  
доктор технических наук, профессор

Искандеров Ю.М.

Члены комиссии:

доктор технических наук, доцент

Спесивцев А.В.

доктор технических наук, профессор

Микони С.В.



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»**  
**(ГУАП)**

Санкт-Петербург

№ \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по образовательным  
 технологиям и инновационной  
 деятельности

 (Шиплаков В.Ф.)  
 « 19 » 09 2022 г.

### АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени  
 кандидата технических наук Ушакова Виталия Анатольевича

Комиссия в составе:

**Председатель** – директор института информационных технологий и программирования  
 Татарникова Т.М., д-р техн. наук, профессор

**Члены комиссии:**

- заведующий кафедрой информационных систем и технологий Мичурин С.В.,  
 д-р техн. наук, профессор,
- доцент кафедры информационных систем и технологий Жуков А. Д., канд. техн. наук,  
 доцент

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Ушакова Виталия Анатольевича, выполненной на тему **«Комбинированные модели и алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов»** и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно:

- 1) комбинированные модели, разработанные для повышения качества управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов;
- 2) разработанная обобщенная процедура расчета плана информационного взаимодействия группировки подвижных объектов

используются в учебном процессе кафедры информационных систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»:

- при подготовке бакалавров по направлению 09.03.02 «Информационные системы и технологии» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Управление данными», «Теория информации, данные, знания»;
- при подготовке магистров по направлению 09.04.02 «Информационные системы и технологии» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Оптимизация систем обработки информации», «Модели информационных процессов и систем».

Пилотная апробация специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО) в рамках реализации указанных образовательных программ подтвердила его работоспособность при решении поставленных задач обучения и применимость в качестве одного из инструментов формирования знаний, умений и навыков по комплексному (системному) моделированию для решения задач планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов. Эффект от внедрения СМАО достигается за счет реализации практико-ориентированного обучения, приводящего к повышению качества учебного процесса.

**Председатель комиссии**

директор института информационных технологий и программирования,  
доктор технических наук, профессор,



Гатарникова Т.М.

**Члены комиссии:**

заведующий кафедрой информационных систем и технологий,  
доктор технических наук, доцент,  
Лауреат премии правительства Санкт-Петербурга



Мичурин С.В.

доцент кафедры информационных систем и технологий,  
кандидат технических наук, доцент,  
Почетный работник высшего профессионального образования РФ



Жуков А.Д.

Государственная корпорация  
«РОСТЕХ»  
Акционерное общество  
**«Научно-исследовательский и  
опытно-экспериментальный  
центр интеллектуальных технологий»**  
**«ПЕТРОКОМЕТА»**

Юридический адрес:  
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит.А.  
Почтовый адрес ОП:  
194044, г. Санкт-Петербург, ул. Тобольская д. 12  
Тел/факс: (812) 600-15-12, mail@petrocometa.ru

№ 221/2022/Исх. от 15 ноября 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
доктор технических наук, профессор



М.Ю. Охтилев

(подпись)

«15» ноября 2022 года

### АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени  
кандидата технических наук Ушакова Виталия Анатольевича

Комиссия в составе:

- председатель – Первый заместитель Генерального директора, кандидат технических наук Коромысличенко В.Н.,

члены комиссии:

- директор департамента научно-исследовательских разработок, кандидат технических наук Охтилев П.А.,
- начальник отдела предпроектных исследований Зянчурин А.Э.,

рассмотрела материалы диссертационной работы Ушакова В.А., выполненной на тему: «Комбинированные модели и алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов» и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно:

- разработанные статические и динамические модели программного управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов;
- разработанный обобщенный комбинированный алгоритм оперативного оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, реализованные в прототипе программного обеспечения автоматизированного решения задач оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, а также автоматизированного решения задач расчета и анализа робастности и

устойчивости планов функционирования соответствующей распределенной информационно-вычислительной сети.

Представленные модели и алгоритм были реализованы и внедрены при создании единого виртуального электронного паспорта космической ракеты-носителя (ЕВЭП КРН) «Союз-2» в рамках выполнения опытно-конструкторской работы, шифр: «Русь» (головной исполнитель – АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», головной исполнитель составной части опытно-конструкторской работы АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «Петрокомета»).

Комиссия установила, что результаты научной работы позволили повысить оперативность, точность и обоснованность решения перечисленных задач по сравнению с традиционными подходами за счет использования предложенной Ушаковым В.А. оригинальных моделей и алгоритма комплексного аналитико-имитационного моделирования рассматриваемых объектов и процессов.

В целом результаты диссертационного исследования (комбинированные модели и алгоритм оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов) позволили повысить качество принимаемых проектных решений за счет их глубокого теоретического обоснования.

**Председатель комиссии:**

Первый заместитель генерального директора,  
кандидат технических наук

В.Н. Коромыслеченко

**Члены комиссии:**

Директор департамента научно-исследовательских разработок,  
кандидат технических наук

П.А. Охтилев

Начальник отдела предпроектных исследований

А.Э. Зянчурин

## ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Описание процедуры оптимизации в рамках прототипа специального  
модельно-алгоритмического обеспечения

В ходе решения задачи планирования и ее реализации на программном уровне необходимо выполнить следующие этапы:

- получить оптимальный план прямой задачи ЛП;
- определить дефицитные ресурсы;
- получить оптимальный план двойственной задачи;
- найти интервалы устойчивости ресурсов;
- отобразить полученные данные.

Общей задачей ЛП является задача, которая состоит в определении максимального или минимального значения ЦФ при заданной системе ограничений (В.1). При программной реализации будем опираться на библиотеку Matlab Optimization Toolbox для решения задач ЛП и задачи «о назначениях» (ЦЛП). Задачи ЛП решать с применением библиотеки Optimization Toolbox МППП Matlab. Для этого используется функция `linprog()`, которая подробно описана далее.

Рассмотрим задачу ЛП в МППП Matlab:

$$\begin{cases} f^T \cdot x \rightarrow \max \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (B.1)$$

Основные входные данные `linprog`:

- вектор коэффициентов ЦФ  $f$ ;
- $A$  – матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-неравенствах;
- $b$  – вектор свободных членов в ограничениях-неравенствах;
- $x$  – вектор значений переменных;
- $Aeq$  – матрица коэффициентов при переменных в ограничениях-неравенствах;



- $beq$  – вектор свободных членов в ограничениях-неравенствах;
- $lb, ub$  – ограничения на координаты, заданные двумя векторами.

На выходе системы (B.1) функция `linprog` дает оптимальный план  $x$  и оптимальное значение ЦФ  $fval$ . При необходимости можно задать начальное приближение  $x_0$ .

Если какой-то из входных параметров отсутствует, то в МППП Matlab на его место следует поставить квадратные скобки `[]`, за исключением случая, когда это последний параметр в списке. Кроме того, возможно устанавливать дополнительные настройки, в частности, алгоритм решения. МППП Matlab решает задачи ЛП двумя способами: алгоритм внутренней точки (Large-Scale Algorithm) и симплекс-метод (Simplex).

Задачи ЦЛП в Optimization Toolbox в МППП Matlab решаются с помощью функции `intlinprog()`.

Рассмотрим задачу ЦЛП в МППП Matlab:

$$\left\{ \begin{array}{l} f^T \cdot x \rightarrow \max \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \\ x \in \mathbb{Z} \end{array} \right. \quad (B.2)$$

где  $x$  – вектор, у которого некоторые координаты целочисленны. Для задачи ЦЛП все координаты вектора  $x$  должны быть целыми, а для задачи булева программирования – должны принимать значения 0 или 1.

Основные входные данные `intlinprog`:

- основные входные данные `linprog`;
- множество индексов `intcon`, при которых переменные плана  $x$  целочисленны.

На выходе системы (B.2) функция `intlinprog` как и `linprog` дает оптимальный план  $x$  и оптимальное значение ЦФ  $fval$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Результаты расчетов для группировки интеллектуальных транспортно-технологических средств

Таблица Г.1 – Сведения о сохраненных данных для плана выполнения ИнП

		Участ ок 1	Участ ок 2	Участ ок 3	Участ ок 4	Участ ок 5	Участ ок 6	Участ ок 7	Участ ок 8
	Сервер предприятия	600 Мб	600 Мб	1,8 Гб	7,7 Гб	5,6 Гб	10,4 Гб	5,6 Гб	10,4 Гб
Гр 1	ИТТС 2	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 3	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 4	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	–
	ИТТС 5	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	–
	ИТТС 6	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	–
Гр 2	ИТТС 7	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 8	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 9	0 Мб	–	–	0 Мб	–	–	–	–
	ИТТС 10	0 Мб	–	–	–	–	–	–	–
	ИТТС 11	–	–	–	–	–	–	–	–
Гр 3	ИТТС 12	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 13	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 14	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 15	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 16	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
Гр 4	ИТТС 17	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 18	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 19	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 20	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 21	–	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	КнП	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Г.2 – Сведения о сохраненной информации для плана выполнения ИнП

		Участ ок 1	Участ ок 2	Участ ок 3	Участ ок 4	Участ ок 5	Участ ок 6	Участ ок 7	Участ ок 8
	Сервер предприятия	10,4 Гб	5,6 Гб	10,4 Гб	5,6 Гб	10,4 Гб	5, Гб	10,4 Гб	5,6 Гб

Гр 1	ИТТС 2	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 3	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 4	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 5	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	–
	ИТТС 6	–	–	0 Мб	0 Мб	100 Мб	–	–	–
Гр 2	ИТТС 7	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 8	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 9	0 Мб	–	–	0 Мб	–	–	–	–
	ИТТС 10	0 Мб	–	–	–	–	–	–	–
	ИТТС 11	–	–	–	–	–	–	–	–
Гр 3	ИТТС 12	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 13	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 14	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 15	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 16	0 Мб	–	–	–	–	–	–	100 Мб
Гр 4	ИТТС 17	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 18	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 19	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 20	0 Мб	–	–	–	–	–	–	0 Мб
	ИТТС 21	–	–	–	–	–	–	–	50 Мб
<b>КнП</b>	<b>600 Мб</b>	<b>100 Мб</b>	<b>350 Мб</b>	<b>400 Мб</b>	<b>300 Мб</b>	0 Мб	<b>100 Мб</b>	<b>550 Мб</b>	

Таблица Г.3 – Сведения о потерянных данных для плана выполнения ИнП

		Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4	Участок 5	Участок 6	Участок 7	Участок 8
	Сервер предприятия	0	0	0	0	3.3 Гб	2.1 Гб	100 Мб	700 Мб
Гр 1	ИТТС 2	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 3	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 4	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	0 Мб	0 Мб
	ИТТС 5	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	–
	ИТТС 6	–	–	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	–
Гр 2	ИТТС 7	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 8	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	0 Мб	–	–	0 Мб
	ИТТС 9	0 Мб	–	–	0 Мб	–	–	–	–
	ИТТС 10	0 Мб	–	–	–	–	–	–	–



	ИТТС 15	150 Мб	-	-	-	-	-	-	150 Мб
	ИТТС 16	300 Мб	-	-	-	-	-	-	300 Мб
Гр4	ИТТС 17	0 Мб	-	-	-	-	-	-	0 Мб
	ИТТС 18	0 Мб	-	-	-	-	-	-	0 Мб
	ИТТС 19	100 Мб	-	-	-	-	-	-	0 Мб
	ИТТС 20	300 Мб	-	-	-	-	-	-	150 Мб
	ИТТС 21	-	-	-	-	-	-	-	300 Мб
	КНП	0	0	0	0	0	0	0	0