

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»**

На правах рукописи



Куимов Андрей Владимирович

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПУСКОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТ
КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Матюшин Максим Михайлович

Москва – 2022

Оглавление

Введение	5
1. Анализ существующей системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	21
1.1 Анализ функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения в современных условиях	21
1.2 Анализ методических подходов к формированию адаптивных процедур в системе информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	30
1.3 Формализация основных процессов функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	42
1.4 Выбор и обоснование системы показателей и критериев качества системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	49
1.5 Постановка задачи исследования по синтезу адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения. Структурная схема решения задачи	56
Выводы по первой главе	62
2. Разработка структурно-логической схемы методического аппарата параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения	64
2.1 Выбор методов, обеспечивающих параметрический синтез адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	64
2.2 Методические основы модели функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	70

2.3	Методическая схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения	78
	Выводы по второй главе	88
3.	Разработка методик параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения	89
3.1	Методика определения количества информации о состоянии ракет космического назначения в потоке телеметрических сообщений	89
3.2	Методика рационального распределения ресурса каналов передачи телеметрической информации между наземными измерительными пунктами	100
3.3	Методика формирования рационального потока телеметрических сообщений ракет космического назначения в каналах передачи телеметрической информации	109
3.4	Комплексная методика параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения	121
	Выводы по третьей главе	134
4.	Прикладные результаты исследований по созданию адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения	136
4.1	Формирование расчетных исходных данных для проведения исследований по параметрическому синтезу адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения	136
4.2	Определение рациональной программы сбора телеметрической информации при обеспечении запуска ракет космического назначения	155
4.3	Оценка полученных результатов	173

4.4 Обоснование рекомендаций по созданию адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения	190
Выводы по четвертой главе	194
Заключение	196
Список сокращений и условных обозначений	200
Список литературы	202
Приложение (Акты внедрения)	215

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время космические средства (КСр) являются одним из ключевых элементов обеспечения экономического развития и безопасности государства, космическое пространство – сферой национальных интересов, а осуществление космической деятельности – вопросом престижа государства, что нашло отражение в концептуальных документах социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности развитых государств [39, 43].

Все это оказывает существенное влияние на государственную политику Российской Федерации в сферах социально-экономического развития, обеспечения национальных интересов и безопасности, которая все больше внимания уделяет вопросам развертывание и поддержание орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) научного, социально-экономического и военного назначения [80, 81, 82]. Среди целей и приоритетов государственной космической политики на первом месте стоит обеспечение гарантированного доступа России в космос со своей территории. Реализация государственной политики в данном направлении обеспечивается развитием космодромов России и наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) КА, особое место отведено совершенствованию национальной системы средств выведения.

Первоочередными задачами развития национальных средств выведения определены:

- завершение летных испытаний (ЛИ) и ввод в штатную эксплуатацию космических ракетных комплексов (КРК) среднего – «Союз-2» этапов 1а и 1б и легкого – «Союз-2» этапа 1в классов;
- создание КРК с ракетами-носителями (РН) «Ангара» легкого и тяжелого класса;
- разработка кислородно-водородного разгонного блока (РБ) для существующих и перспективных РН;
- внедрение прогрессивных технологий по маршевым двигателям, системам управления, конструкционным материалам для обеспечения более

высоких показателей безопасности и технико-экономической эффективности средств выведения.

В планы по развитию средств выведения внесло коррективы прекращение военно-технического сотрудничества с Республикой Украина – на замену РН «Зенит» в АО «РКЦ «Прогресс» ведутся работы по созданию РН среднего класса «Союз-5», а в АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» ведутся работы по замене, производимой в Украине системы управления ракеты космического назначения (РКН) «Рокот» на отечественную.

В перспективе рассматривается завершение создания и начало эксплуатации КРК семейств РН легкого, среднего и тяжелого классов на основе универсальных ракетных модулей и РН с многоразовыми блоками первой ступени, а также создание многоразовых средств выведения [40, 42, 113, 115, 120]. Примерами таких систем уже в настоящее время являются разрабатываемый в Российской Федерации КРК «Ангара» и проект многоразового ускорителя первой ступени «Байкал», «Falcone» частной компании «SpaceX» в США, CZ-5 в Китае.

Отечественный и зарубежный опыт создания и эксплуатации РКН показывает, что на уровень их качества влияют работы на всех стадиях жизненного цикла, его основы закладываются совокупностью испытательных работ наземной и летной отработки на стадии опытно-конструкторских работ (ОКР), а поддержание и повышение осуществляется в ходе эксплуатации [50, 70, 83]. Ключевое место в данном процессе отводится ЛИ и летной эксплуатации (ЛЭ), в ходе которых проводится отработка РКН и ее составных частей в реальных условиях функционирования.

В процессе ЛИ и ЛЭ проводится набор и оценка опытных данных по нагрузкам, действующим на РКН при старте и в полете, температурным режимам работы элементов РКН, динамике, устойчивости и управляемости движения, точности выведения на заданную орбиту [9, 50]. Практическая реализация данных мероприятий заключается в формировании, сборе, накоплении и анализе телеметрической информации (ТМИ), получаемой при пуске и полете РКН. Высокий уровень сложности современных и перспективных РКН,

экстремальные режимы и условия их функционирования в полете приводят к необходимости измерений, сбора, обработки и оценки большого количества параметров, характеризующих состояние и режимы работы как отдельных систем и агрегатов, так и РКН в целом [48, 50]. Вместе с тем существующие материально-техническая и методическая базы системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) не в полной мере обеспечивают выполнение современных требований к количеству и качеству ТМИ, доставляемой в центры контроля полета (ЦКП) РКН [50].

Проведенный анализ существующей научно-методической и материально-технической базы СИТО выявил следующие **противоречия**, требующие разрешения:

– в практической области – между высокой информационной производительностью современных бортовых радиотелеметрических средств (БРТС), устанавливаемых на РКН, и ограниченным ресурсом пропускной способности телеметрических линий связи;

– в теоретической области – между необходимостью использования системного подхода к организации сбора ТМИ в условиях существенного увеличения количества телеметрических параметров РКН, наличия информационной избыточности и перегрузке ТМИ «холостыми» данными и отсутствием методического аппарата определения рациональной программы сбора ТМИ, учитывающего характеристики телеметрических линий связи и изменяющиеся на различных этапах пуска и полета РКН потребности специалистов по анализу ТМИ.

Все вышеизложенное определяет **важность и актуальность решаемой в диссертации научной задачи** – разработка методического аппарата параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, обеспечивающего согласование изменяющихся на различных этапах подготовки к пуску, пуска и полета РКН потребностей в ТМИ с располагаемой пропускной способностью телеметрических линий связи.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время активно проводятся ОКР по совершенствованию материально-технической базы СИТО. АО «Российские космические системы» проводятся работы по созданию комплекса средств измерений, сбора и обработки (КСИСО) измерительной информации космодрома «Восточный» (ОКР «ТМИ Восток-2»), разработаны и проходят испытания БРТС «РТСЦМ-1», наземный малогабаритный радиотелеметрический комплекс «МРТК». АО «НПО измерительной техники» созданы перебазируемые комплексы телеметрических измерений: «МИП», «МИП В», «МИП №2», «Селена ИТ», разработаны и проходят испытания наземные антенные телеметрические комплексы АП-4, АК-ИТМК (ОКР «Интерлюдия»), проходят испытания новые БРТС «Астра» и «Оникс», обеспечивающие программным путем формирование любой заданной структуры телеметрического кадра. АО «ОКБ МЭИ» разработана наземная малогабаритная станция приема ТМИ «МПРС», разрабатывается ее усовершенствованная модификация «МПРС-ПМ», ведутся работы по совершенствованию БРТС «Орбита».

Вопросам разработки научно-методических и научно-технических подходов создания и совершенствования систем информационного обеспечения испытаний и применения КСр посвящены труды Валова Н.Н., Вершинина А.Б., Некрасова М.В., Матюшина М.М., Пакмана Д.Н., Титова А.М., (АО «ЦНИИМаш», г. Королев), Макарова М.И., Чаплинского В.С. (НИИ КС им. А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев), Ватутина В.М., Круглова А.В. (АО «Российские космические системы», г. Москва), Охтилева М.Ю., Рассиева А.Ю., Чуприкова А.Ю., Каргина В.А. (АО «СКБ Орион», г. Санкт-Петербург), Малышева В.В., Моисеева Д.В. (МАИ, г. Москва), Сидякина И.М., Свалова Ю.Л., Павлова Ю.Н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва), Авдеева Б.Я., Алексеева В.В., Антонюка Е.М., Цветкова Э.И. (СпбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург), Прошина Е.М. (РГРТУ, г. Рязань), Антамошкина А.Н. (СибГУ, г. Красноярск), Бондаревой М.К., Ивашины А.В. (ГИКЦ МО РФ, г. Краснознаменск), Кукушкина С.С. (4 ЦНИИ МО РФ, г. Королев), Козырева Г.И.,

Копкина Е.В., Мальцева Г.Н., Мануйлова Ю.С. (ВКА им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург).

Вопросы совершенствования научно-методической базы СИТО испытаний и применения КСр, обоснования путей развития испытательных комплексов рассматриваются в научно-исследовательских работах (НИР), выполняемых АО «ЦНИИмаш», 46 ЦНИИ МО РФ и ЦНИИ ВКС МО РФ. Исследования направлений и путей совершенствования технологий и комплексов управления КА проведены в НИР «Астролябия» (КА-2). Комплексные исследования в области совершенствования системы управления эксплуатацией и испытаниями космических систем и комплексов проведены в НИР «Сетка». В НИР «Стандартизация-2020 ОТТ-МО» проведены комплексные исследования по совершенствованию системы общетехнических требований к методам государственных испытаний и средствам экспериментально-испытательной базы. Анализ проблем функционирования испытательного комплекса и разработка предложений по перспективам его развития и совершенствованию научно-методической базы испытаний проведены в НИР «Ясногорец-3». В НИР «Раунд-1516/Н» проведены исследования по направлениям создания и развития НАКУ КА, разработаны предложения по структуре, составу и этапности развития НАКУ КА. Исследования проблем обеспечения технической готовности, надежности, оценка эксплуатационно-технических характеристик перспективных и существующих средств НАКУ проведены в НИР «Регламент-216-ГИКЦ».

Кроме того, имеется ряд диссертационных работ, связанных с исследованиями в области информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) испытаний и применения КСр, а также технических систем народно-хозяйственного назначения.

В работах Авдеева Б.Я., Большакова Д.А., Ковриги Ю.Ю. [1, 14, 41] рассмотрены вопросы совершенствования бортовых и наземных радиотелеметрических средств, проведены исследования моделей и методов оптимизации состава, структуры бортовых и наземных телеметрических систем, адаптивных процедур информационного обслуживания контролируемых изделий.

Исследования моделей, методов и алгоритмов повышения качества результатов обработки ТМИ КСр и техническим систем народно-хозяйственного назначения проведены в работах Николаева Д.А., Соколова И.С., Федяева А.Ю., Эльшафеей М.А. [77, 104, 114, 121]: осуществлена комплексная оценка методов формирования единых носителей ТМИ, разработан научно-методический аппарат восстановления группового телеметрического сигнала, фильтрации и восстановления искаженных телеметрических сообщений, сокращения избыточности информации.

В работах Матюшина М.М., Тихомирова С.А. [66, 112] проведены исследования процессов анализа ТМИ, контроля функционирования и технической диагностики КСр, разработаны методики и алгоритмы оценки и поддержки принятия решения о техническом состоянии КСр по результатам автоматизированной обработки ТМИ.

Исследованиям систем сбора ТМИ в смежных с испытаниями РКН областях посвящены работы Говорухиной Т.Н., Голубева И.Ю., Минаева А.А., Некрасова М.В., Сукманова А.В. [25, 26, 72, 76, 105]. В данных работах проведены исследования моделей и методов сбора ТМИ, разработаны алгоритмы синтеза систем сбора ТМИ КА, объектов нефтегазовой отрасли и телемедицины, при этом информационно-измерительная система рассматривается как система массового обслуживания множества территориально-разнесенных объектов низкой и средней информационной производительности.

Результаты анализа имеющихся научных трудов и исследований показали, что до настоящего времени недостаточно полно исследованы вопросы, связанные с информационным обменом между составными элементами СИТО при проведении запусков РКН, в том числе со сбором информации от пространственно-разнесенных средств приема и регистрации ТМИ в ЦКП РКН. Результаты исследований методов, моделей и алгоритмов сбора ТМИ в смежных отраслях не могут быть использованы при информационном обеспечении запусков РКН. Поэтому разработка методического аппарата параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН остается актуальной.

Цель исследования состоит в повышении качества информационного обеспечения ЛИ и ЛЭ современных и перспективных РКН при выведении КА на орбиту.

Объектом исследования является адаптивная СИТО запусков РКН.

Предметом исследования является совокупность методик параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН, обеспечивающих определение рациональной программы сбора ТМИ при проведении информационного обеспечения запуска РКН.

Область исследования: тема и содержание диссертации соответствует специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации (отрасль: технические науки)».

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие **частные научно-технические задачи**, определяющие ее содержание и этапы:

1. Системный анализ основных процессов и условий функционирования СИТО запусков РКН, обоснование методического подхода к формированию адаптивных процедур.
2. Формализация задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН, разработка структурной схемы ее решения.
3. Анализ и выбор методов, обеспечивающих параметрический синтез адаптивной СИТО, разработка методической схемы решения поставленной задачи.
4. Разработка методик, обеспечивающих определение рациональной программы сбора ТМИ при проведении информационного обеспечения запуска РКН.
5. Проведение практических расчетов по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН.
6. Оценка полученных результатов и работоспособности разработанного методического аппарата, обоснование рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Научная новизна работы:

1. Предложен новый подход к решению задачи параметрического синтеза СИТО запусков РКН, отличающийся от традиционных комплексным учетом параметров информационных процессов, реализуемых всеми составными элементами СИТО, что позволяет согласовать изменяющиеся на различных этапах пуска и полета РКН потребности в ТМИ с возможностями телеметрических линий связи.

2. Разработаны методики поиска рациональных значений варьируемых параметров адаптивной СИТО запусков РКН, отличающиеся от существующих двух этапным проведением поисковых процедур и расчетов с применением математического аппарата последовательной оптимизации, что позволяет отыскивать рациональные взаимно адаптированные значения параметров плана задействования каналов передачи ТМИ и параметров плана формирования потока телеметрических сообщений.

3. Впервые поиск рациональных значений параметров плана формирования потока телеметрических сообщений проведен с использованием комплекса показателей и критериев количества информации, что в отличие от существующих подходов позволяет сформировать нормированное метрическое пространство поиска значений параметров потока телеметрических сообщений разнородных телеметрических параметров РКН.

4. Введен новый частный показатель качества СИТО – коэффициент потери информации, позволяющий проводить оценку сообщений разнородных телеметрических параметров РКН в единой относительной шкале и свести многомерную частную задачу поиска значений параметров потока сообщений телеметрических параметров РКН к одномерной.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии прикладных элементов системного анализа, теории информации и методов оптимизации в приложении их к организации ИТО запусков современных и перспективных РКН.

Практическая значимость полученных результатов состоит в:

- существенном снижении неопределенности телеметрических данных о состоянии РН и РБ, доставляемых потребителям при информационном обеспечении пуска и полета РКН;

- их применимости для решения практических задач сбора ТМИ современных и перспективных РКН, оснащенных высокоинформативными БРТС, на существующей материально-технической базе ИТО;

- обосновании рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных бортовых и наземных средств ИТО.

Для решения указанных в диссертации задач использованы следующие **методология и методы исследования**: общие методы системного анализа и исследования операций, методы оптимизации, теории информации, теории вероятностей и обработки экспериментальных данных.

На защиту выносятся следующие научные результаты диссертации, полученные автором лично, обладающие научной новизной, практической значимостью и отличные от результатов, полученных другими авторами:

1. Методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений, отличающаяся от существующих использованием нового частного показателя количества информации «коэффициент потери информации». Методика предназначена для определения степени достижения цели функционирования системы, базируется на математических описаниях процессов формирования и использования ТМИ, математическом аппарате дискретной энтропии случайных событий и процессов и на концепции «интервальных гипотез средств измерений и контроля». Методика представляет собой двухуровневую структуру: на первом уровне проводятся расчеты значений показателей количества информации в потоках сообщений отдельных телеметрических параметров РКН, на втором – показателей количества информации телеметрических сообщений группового потока. Выходные результаты расчетов используются при поиске рациональных значений

варьируемых параметров СИТО и при оценивании результатов параметрического синтеза.

2. Методика рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между наземными измерительными пунктами (НИП), отличающаяся от существующих двухэтапным проведением поисковых процедур и расчетов. Методика базируется на совокупности математических описаний процесса передачи ТМИ. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в методике через две группы процедур поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО: графика коммутации НИП в каналы передачи ТМИ и пропускной способности каналов передачи ТМИ. Поисковые процедуры проводятся в два этапа: на первом этапе проводится поиск начального решения, на втором этапе, с учетом координирующих расчетов, проводится уточнение значений искомых параметров. Использование двухэтапного поиска позволяет осуществить рациональное распределение ограниченных ресурсов пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи, адаптированное к потокам телеметрических сообщений от НИП. Выходные результаты поиска используются для формирования плана задействования каналов передачи ТМИ при проведении ИТО запуска РКН.

3. Методика формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ, отличающаяся от существующих методик двухэтапным проведением поисковых процедур и расчетов с комплексным использованием существующих и нового показателей количества информации. Методика базируется на математическом описании процессов снижения информационной избыточности ТМИ в элементах СИТО запусков РКН. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в методике через две группы процедур поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО: параметров графика выдачи сообщений телеметрических параметров РКН и коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН. Поисковые процедуры проводятся в два этапа: на первом этапе проводится поиск начального решения, на втором этапе, с учетом результатов

координирующих расчетов, проводится уточнение решения. Применение двухэтапного поиска позволяет адаптировать состав потока телеметрических сообщений к потребностям получателя ТМИ, наличию незадействованного ресурса пропускной способности каналов передачи ТМИ и парировать искажения ТМИ на участках динамических операций РКН. Применение при расчетах комплекса существующих и нового показателей количества информации позволяет свести многомерную честную задачу поиска значений коэффициентов прореживания сообщений разнородных телеметрических параметров РКН к одномерной в единой относительной шкале. Выходные результаты поиска используются для разработки плана формирования потока телеметрических сообщений при проведении ИТО подготовки к пуску, пуска и полета РКН.

В своей совокупности частные методики образуют «Комплексную методику параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН», предназначенную для поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО, составляющих программу сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН, оценки полученных результатов и обоснования рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается результатами прикладных расчетов и вычислительного эксперимента. Расхождение расчетных данных относительно расчетно-экспериментальных не превысило по показателям:

- апостериорная энтропия потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО – 6,09 %;
- информативность потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО – 5,1 %;
- коэффициент потери информации – 4,8 %.

Обоснованность разработанного методического аппарата обеспечивается корректной постановкой решаемой научной задачи, использованием методов исследований, не противоречащих основным положениям теории системного

анализа и исследования операций, корректным использованием методов теорий информации и оптимизации.

Основные результаты диссертации прошли апробацию на научных семинарах кафедры «Системного анализа и управления» МАИ, в рамках докладов на секции научно-технического совета АО «ЦНИИмаш», а также на российских конференциях: XXI Межведомственная научно-практическая конференция «Научно-практические аспекты совершенствования управления космическими аппаратами и информационного обеспечения запусков космических аппаратов» (г. Краснознаменск, ГИКЦ МО РФ, 2017 г.), «Девятые научные чтения по военной космонавтике памяти М.К. Тихонравова «Космос и обеспечение безопасности России» (г. Королев, НИЦ (г. Королев) ЦНИИ ВВКО, 2017 г.), III и VI Всероссийская научно-практическая конференция «Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления» (г. Москва, ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр» Минобрнауки России, 2017 г., 2020 г.), IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (г. Москва, АО «Российские космические системы», 2018 г.), XXII Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов (г. Самара, Самарский федеральный исследовательский центр Российской Федерации, 2019 г.). Основные научные результаты диссертации опубликованы в статьях, текстах докладов – всего в 15 трудах, в том числе: 6 статей в журналах рекомендованных ВАК РФ для публикации научных положений диссертационных работ [46, 47, 48, 49, 50, 67] («Физика волновых процессов и радиотехнические системы» г. Самара, «Научно-технические вестники ИТМО» г. С. Петербург, «Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России» г. Москва, «Научно-технические вестники ИТМО» г. Москва, «Пилотируемые полеты в космос» г. Звездный городок), 9 тезисов и текстов докладов на научных конференциях и семинарах [15, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 62] (из них 1 опубликован в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации научных положений диссертационных

работ, «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы» г. Москва [55]). Кроме того, результаты диссертации использованы при написании 2 научно-технических отчетов по НИР [88, 89].

Личный вклад автора. В проведенном исследовании, совместных и личных публикациях лично автору принадлежат: методическое обоснование преимуществ программного подхода к реализации адаптивных процедур сбора ТМИ РКН; обоснование целесообразности использования критериев и показателей количества информации для проведения параметрического синтеза адаптивной СИТО; математическая постановка оптимизационной задачи и разработка структурной и методических схем ее решения; аналитические выражения для расчета нового показателя количества информации – коэффициент потери информации; разработка методик поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО на основе математического аппарата последовательной оптимизации; практические исследования по определению рациональной программы сбора ТМИ при проведении обеспечения пуска и полета РКН и их оценка; разработка рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запуска перспективных РКН.

Реализация результатов исследования. Основные результаты, полученные при подготовке диссертационной работы, внедрены в:

– ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» – при планировании сеансов управления орбитальными модулями российского сегмента (РС) МКС, пилотируемыми и грузовыми кораблями в ходе выполнения составной части ОКР «МКС (Эксплуатация) - Эксплуатация-4») по государственному контракту от 23.10.2019 № 1922730301751217000241351/351-8647/19/175 между Госкорпорацией «Роскосмос» и ПАО «РКК «Энергия» (Акт № 11Ц-6/318 от 10.03.2022);

– АО «ЦНИИмаш» – в составной части НИР «Прикладные исследования и проектирование ключевых элементов и технологий управления КА, бортовых комплексов управления... (промежуточный, этап 2). Шифр СЧ НИР «Астролябия» (КА-2)», научно-технический отчет № 851-0226А/19/238-2-08201-612-2021. (Акт № 08/АК-01 от 15.03.2022).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения (акты внедрения).

В первой главе проведен системный анализ существующей СИТО запусков РКН. Выявлена необходимость установления соответствия потребностей специалистов по анализу ТМИ возможностям телеметрических линий связи. Обосновано применение метода «программной кусочно-равномерной дискретизации» для реализации при сборе ТМИ процедур, обеспечивающих адаптацию СИТО к изменяющимся условиям функционирования. Проведена формализация процессов функционирования СИТО, определены параметры состояния, варьируемые параметры и параметры, определяющие качество системы, установлены функциональные зависимости параметров. Обоснован выбор и сформирована система показателей и критериев качества СИТО. Проведена математическая постановка задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, ее декомпозиция на частные задачи, разработана структурная схема решения.

Во второй главе разработана структурно-логическая схема методического аппарата параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН. Обосновано использование метода «последовательной оптимизации» для решения поставленной задачи, сформирована последовательность подзадач параметрического синтеза и определены мероприятия, обеспечивающие сходимость решения. Сформированы методические основы модели функционирования СИТО, в которых математические описания основных процессов ИТО запуска РКН структурированы в иерархическую архитектуру, включающую три модели: формирования ТМИ, сбора ТМИ и использования ТМИ. На основе структурной схемы модели функционирования разработана методическая схема решения задачи параметрического синтеза, реализующая математический аппарата последовательной оптимизации.

В третьей главе на основе структурно-логической схемы методического аппарата разработана комплексная методика параметрического синтеза

адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, предназначенная для поиска рациональных значений варьируемых параметров адаптивной СИТО, составляющих программу сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН. Математический аппарат последовательной оптимизаций реализован в комплексной методике через последовательное решение четырех подзадач поиска рациональных значений групп варьируемых параметров, для решения которых разработаны частные методики:

- определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений;
- рационального распределения ресурсов каналов передачи ТМИ между НИП;
- формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ.

В четвертой главе проведены практические исследования по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН. Сформированы исходные данные и проведены расчеты по определению рациональной программы сбора ТМИ при проведении первого сеанса ИТО пуска и полета РКН. Осуществлена оценка результатов вычислительного эксперимента, которая показала работоспособность разработанного методического аппарата и подтвердила преимущества программного подхода для реализации адаптивных процедур сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН. Получены математические описания зависимости распределения пропускной способности от соотношения количества контролируемых параметров на характерных участках полета РКН и структуры ТМИ. Получены математические зависимости значений коэффициентов прореживания от динамики изменения телеметрических параметров РКН и параметров бортовой информационно-телеметрической системы (БИТС). На основе полученных результатов разработаны рекомендации по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, в которых учтены все факторы, оказывающие существенное влияние на качество проведения ИТО запусков РКН.

В заключении сформулированы научные результаты, полученные в работе, и предложения по их дальнейшему использованию.

Общий объем работы составляет 217 листов машинописного текста и содержит: рисунков 53, таблиц 30, список литературы включает 122 наименования на 13 листах, 1 приложение на 3 листах.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПУСКОВ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1.1 Анализ функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения в современных условиях

Целью функционирования СИТО запусков РКН является своевременное обеспечение потребителей достоверной информацией о состоянии бортовых систем РКН.

Для достижения данной цели в СИТО решаются следующие основные задачи [61, 103]:

- разработка и обмен технологической и управляющей информацией с территориально разнесёнными аппаратно-программными средствами приёма и регистрации ТМИ, сбора и передачи измерительной информации;
- подготовка исходных данных для обработки ТМИ по заданным алгоритмам;
- проведение измерений, формирование телеметрического сигнала на борту РКН и его передача по радиоканалу на наземные средства;
- прием и регистрация территориально разнесенными наземными приемно-регистрирующими станциями (НПРС) полных потоков ТМИ, поступающих от РКН;
- передача принимаемой от НПРС ТМИ в ЦКП РКН как в реальном масштабе времени (РМВ), так и при воспроизведении с накопителем ТМИ;
- приём и обработка ТМИ по заданным алгоритмам в ЦКП РКН;
- выдача обработанной ТМИ как на индивидуальные средства отображения, так и на средства коллективного отображения, для обеспечения визуального контроля качества принимаемой измерительной информации, контроля полета РКН и оценки функционирования основных систем, узлов и агрегатов РН и РБ;
- размножение и рассылки отчетных документов потребителям;

– создание резервных и архивных копий баз данных и материалов регистрации и обработки ТМИ РКН.

При этом основными элементами СИТО являются [8, 110]:

– радиотелеметрический комплекс, включающий БРТС для измерений, сбора и передачи ТМИ с борта РКН, и региональные НПРС для приема полных потоков ТМИ с борта РКН;

– разветвленная сеть средств передачи ТМИ, включающих аппаратно-программные комплексы сбора и передачи полных потоков (АПК ПП) ТМИ и каналы связи;

– ЦКП РКН, оснащенные средствами сбора, обработки и анализа ТМИ, которые по важности решаемых задач играют роль центра СИТО.

Типовая структура СИТО запуска РКН приведена на рисунке 1.1.

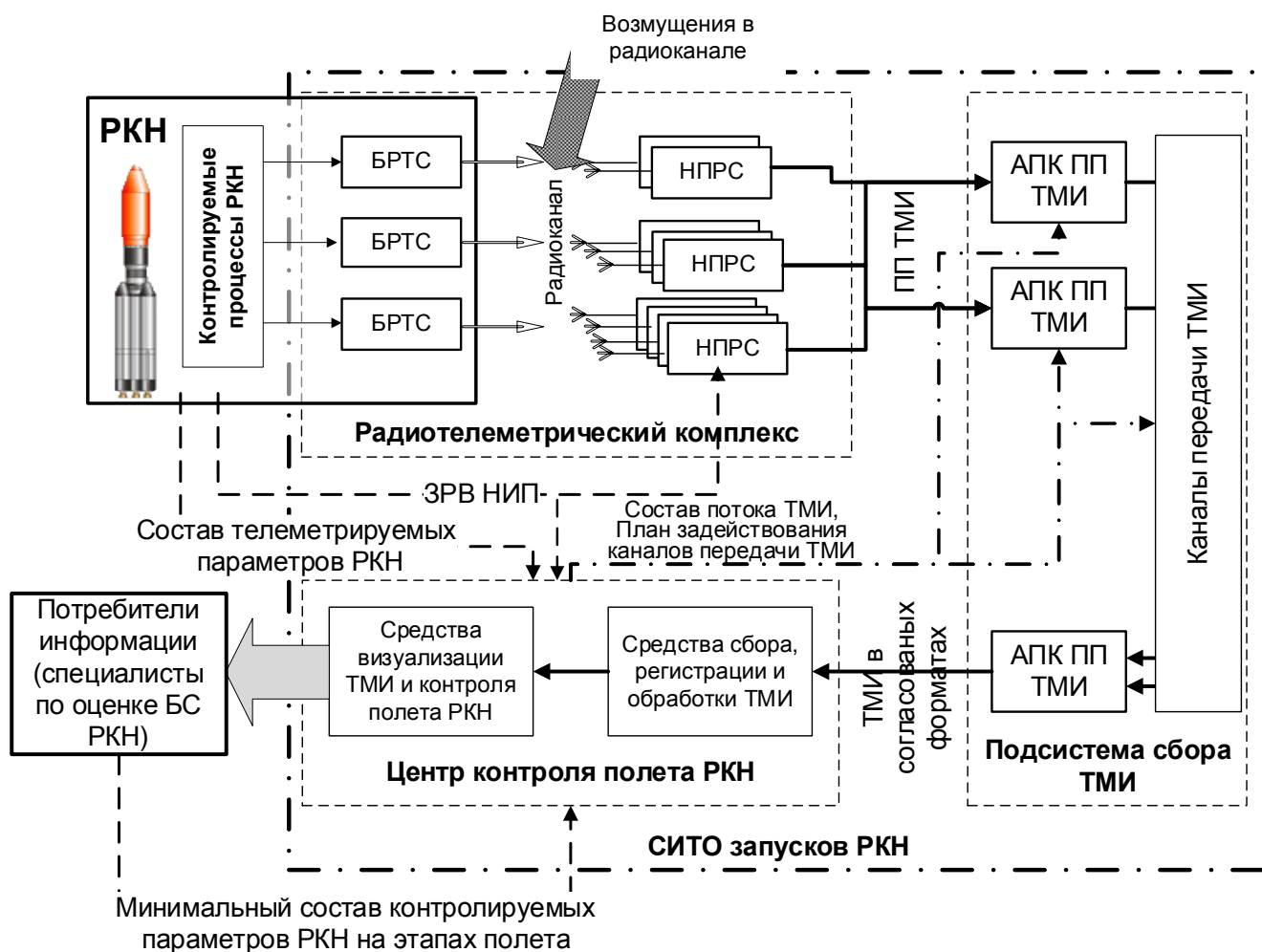


Рисунок 1.1 – Типовая структура СИТО запусков РКН

Получение необходимой для потребителей информации имеет ряд особенностей, связанных с высокой сложностью современных РКН, неоднородностью динамики характеристик и условий функционирования РКН на различных этапах пуска и полета, изменением состава контролируемых потребителями информации процессов в ходе полета РКН, реализацией информационных процессов формирования, сбора и обработки данных о РКН.

Повышение уровня сложности создаваемых РКН требует существенного расширения состава телеметрических параметров, характеризующих процессы их функционирования, количество которых для современных РКН уже сегодня достигает нескольких тысяч. Назовем основные параметры телеметрии [8, 116]:

- движения центра массы РКН;
- осевого и поперечного ускорения РКН;
- углового движения РКН в связанной системе координат;
- угловые рассогласования по тангажу, вращению и рысканью;
- температуры и давления в различных точках РКН;
- механического напряжения и вибрации в наиболее ответственных узлах конструкции;
- характеризующие работу двигательных установок (обороты топливно-насосных агрегатов, температуры и давления в камерах сгорания и т.д.);
- расхода топлива, давления и температуры в баках и трубопроводах;
- характеризующие работу источников электропитания;
- характеризующие работу системы управления.

Возрастание количества телеметрических параметров и их динамики, различия в скоростях изменения различных параметров, повышение требований к точностным характеристикам и помехозащищенности, изменение задач, стоящих перед потребителями информации на различных этапах полета РКН (нет необходимости контролировать и анализировать ранее важные процессы, но возникает необходимость контроля новых), приводит к необходимости создания СИТО запусков РКН, адаптированную к изменениям условий проведения ИТО на различных этапах полета РКН.

В современных СИТО запусков РКН адаптивные процедуры в наибольшей степени реализованы в радиотелеметрических комплексах, состоящих из бортовых и наземных средств. Типовая структура радиотелеметрического комплекса приведена на рисунке 1.2.

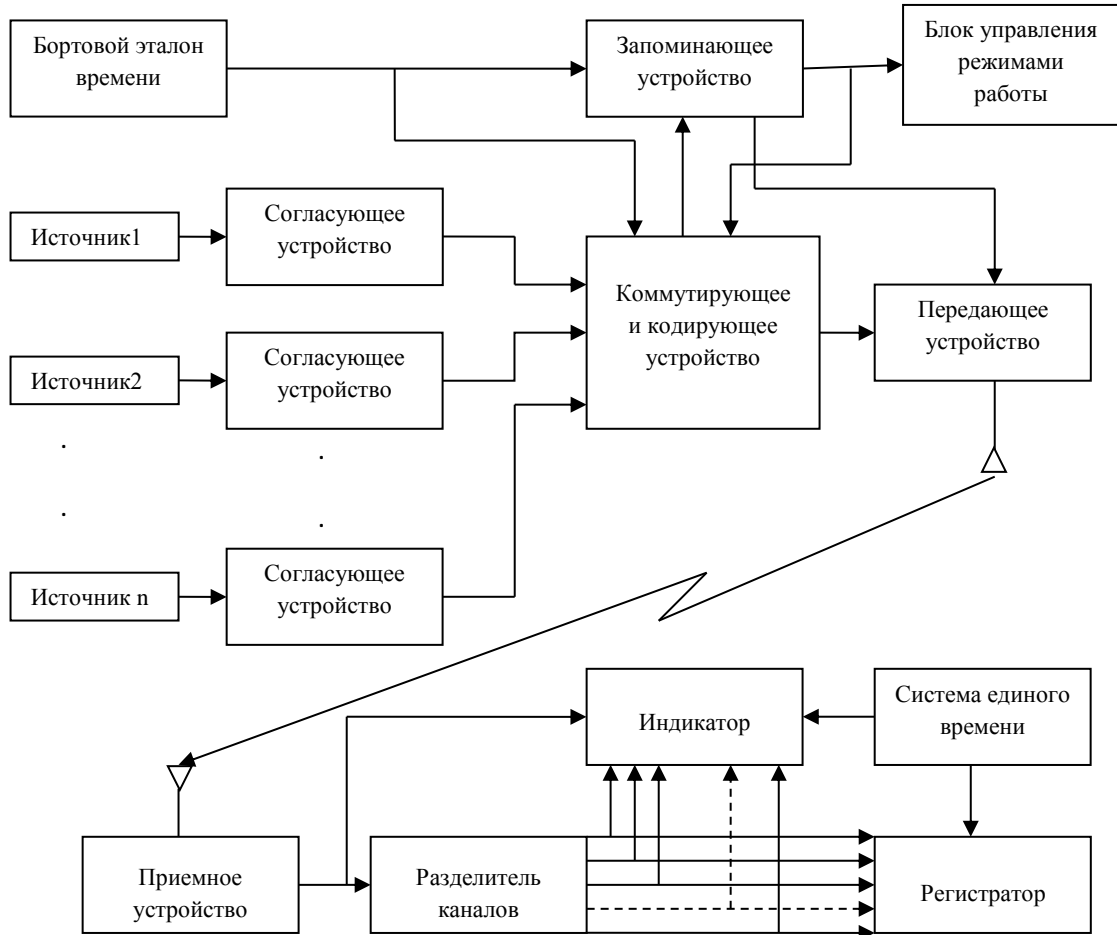


Рисунок 1.2 – Структурная схема радиотелеметрического комплекса

Адаптивность телеметрических систем обеспечивается за счет технических возможностей БРТС, осуществляющих формирование телеметрических сообщений.

В настоящее время [3, 16, 32, 101] для оснащения РКН используются цифровые высоко- и среднеинформативные БРТС с временным разделением каналов и кодоимпульсной модуляцией первичных сигналов «РТС-Ц», «Пирит», «Скут», «Сириус», «Орбита IV». Широкое применение нашло сочетание на РКН двух типов БРТС для измерений ТМИ медленноменяющихся параметров (ММП) «РТС-Ц» и для измерений быстроменяющихся параметров (БМП) «Скут», «Астра»

или «Сириус» (РКН «Союз-2», «Рокот»), а также установка на каждом блоке ускорителей ступени РН и на РБ своей БРТС. Подобные технические решения при построении радиотелеметрических комплексов нашли применение и в зарубежных образцах ракетно-космической техники – в телеметрических системах РКН «Сатурн» и «Атлас».

Анализ [16, 19, 32, 44, 101, 103] показывает, что из существующих БРТС программируемые позволяют в наибольшей степени реализовать адаптивные процедуры телеизмерений, соответствующие процессам на борту РКН и потребностям специалистов по анализу летно-технических характеристик РКН.

Для приведения ТМИ к удобному для анализа виду проводится обработка телеизмерений [37, 103]. Схема обобщенного процесса обработки ТМИ приведена на рисунке 1.3 и включает следующие этапы:

- сбор ТМИ;
- привязка результатов телеизмерений ко времени, включающая учет временных поправок на разность хода радиосигнала для разнесенных по трассе полета измерительных пунктов и привязку информации бортового запоминающего устройства (БЗУ) к полетному времени РКН;
- формирование единого носителя ТМИ;
- раскоммутация (декоммутация) телеметрических параметров;
- дешифровка телеизмерений, включающая учет калибровочных уровней ТМ сигнала и перевод ТМИ в физические величины по тарировочным характеристикам;
- визуализация результатов обработки.

Поскольку объем информации, необходимой для анализа летно-технических характеристик современных и перспективных РКН, достигает нескольких гигабайт за один запуск, объем вычислений при обработке оказывается очень большим. Поэтому современные ЦКП оснащаются высокопроизводительными электронно-вычислительными машинами (ЭВМ), технические характеристики которых позволяют провести в реальном масштабе времени обработку и анализ всего объема поступающей по линиям связи измерительной информации [103, 109].

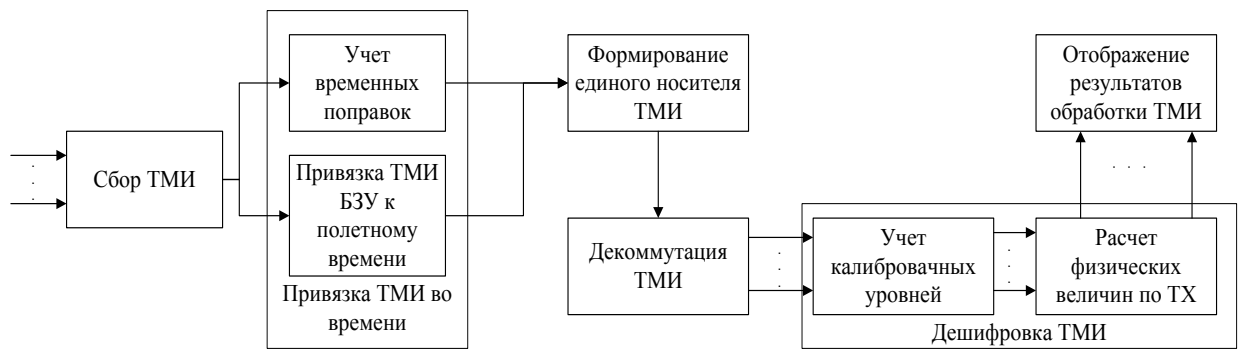


Рисунок 1.3 – Схема обобщенного процесса обработки ТМИ

Обмен информацией между НПРС и ЦКП проводится как в реальном масштабе времени, так и в режиме послеполетного воспроизведения. Поток ТМИ имеет большой объем, информация поступает от различных НИП, причем может поступать из двух и более НИП одновременно, а на начальном участке траектории полета происходит довольно быстрый переход выдачи информации в ЦКП от одного НИП к другому.

Схема обмена данными строится на базе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и системы спутниковой связи (ССС) «Приморка».

При проведении информационного обеспечения запуска РКН ССС «Приморка» позволяет организовывать следующие контуры обмена информацией:

- первый контур – технологический – обеспечивает непрерывную работу линий связи. Канал работает по принципу «Центральная станция – одновременно со всеми периферийными». Кроме того, в этом канале возможна организация постоянного канала передачи данных с пакетными протоколами типа TCP/IP со скоростью до 512 Кбит/с. Подключение может осуществляться с маршрутизацией IP потока, что позволяет разделить информацию, циркулирующую между источником и потребителями;

- второй контур – каналы передачи ТМИ – периодические симметричные или несимметричные дуплексные или симплексные каналы (до 8 Мбит/с), коммутируемые по программе сбора ТМИ от периферийных станций на центральную.

На рисунке 1.4 показано начальное состояние коммутации каналов связи ССС «Приморка» от трех источников (космодром запуска, ИП-1, ИП-2 – условное обозначение НИП, задействуемых для обеспечения запуска).

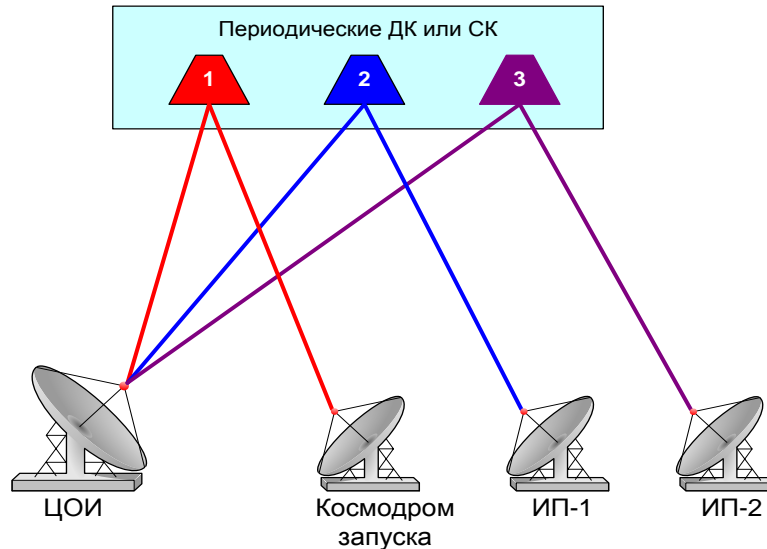


Рисунок 1.4 – Исходное распределение каналов передачи ТМИ

После выхода РКН из зоны видимости измерительных средств космодрома (на рисунке «Космодром запуска»), канал первого источника переключается на ИП-3, что показано на рисунке 1.5.

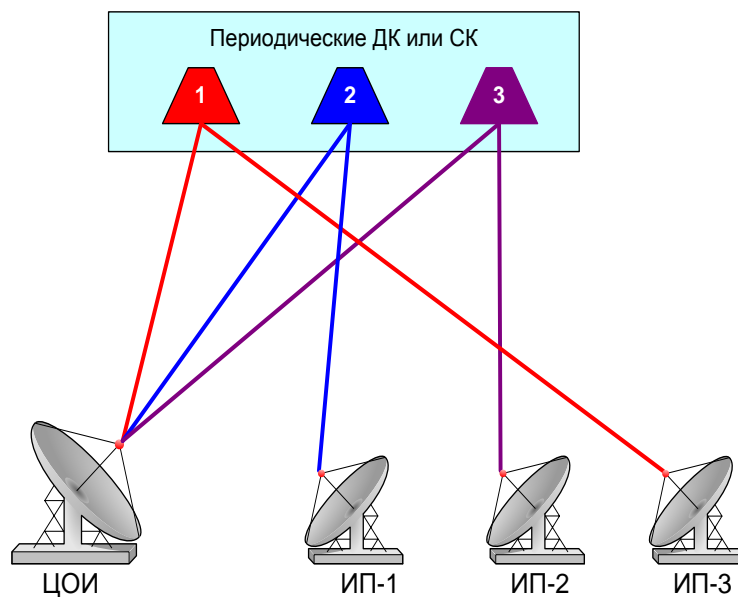


Рисунок 1.5 – Переключение каналов передачи ТМИ

При планировании проведения ИТО пуска и полета РКН формируется частотно-временной план задействования каналов передачи для сбора ТМИ в реальном масштабе времени (РМВ) полета РКН и проведения послесезанного обмена данными (рисунок 1.6), кроме того определяются методы передачи ТМИ от НИП до ЦКП.

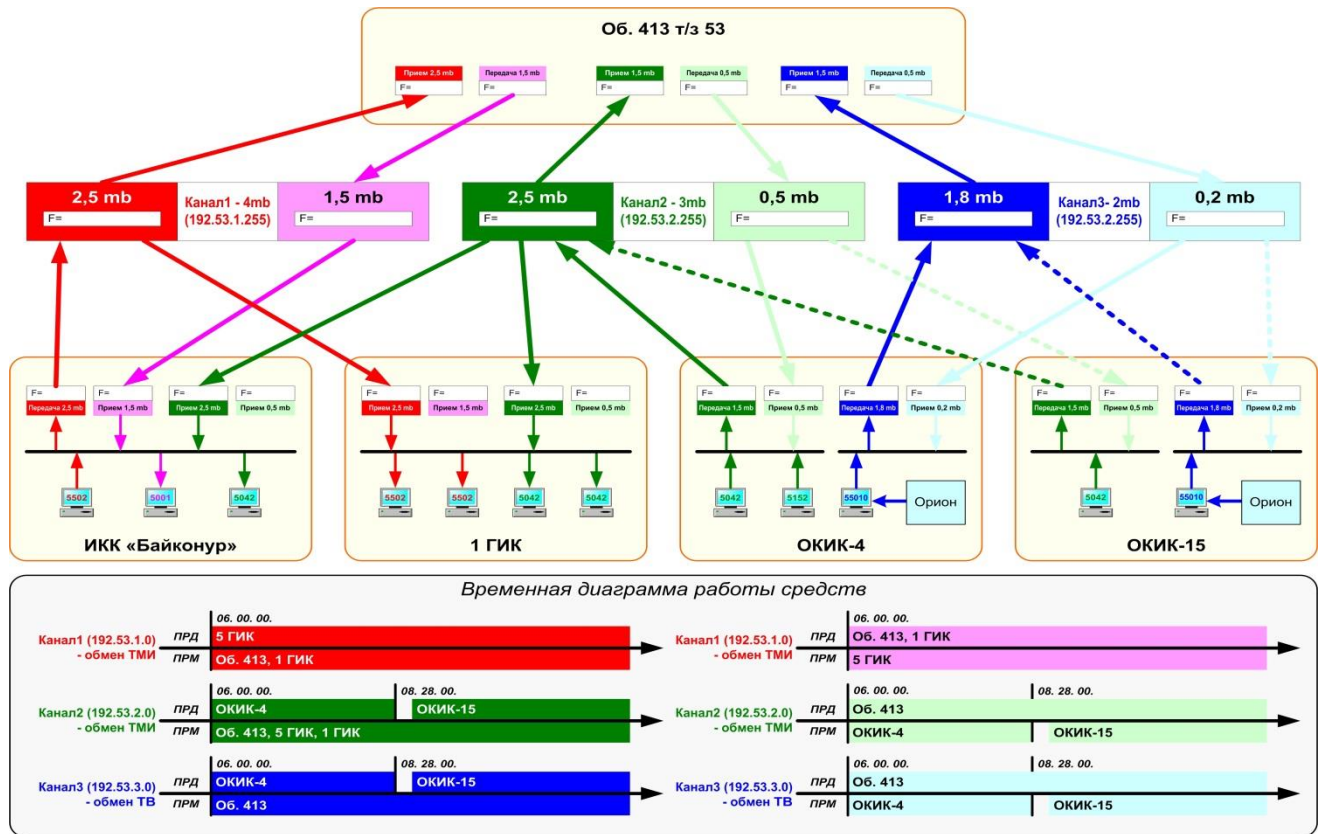


Рисунок 1.6 – Частотно-временной график работы каналов передачи данных

Применяемые в современных СИТО запусков РКН средства передачи информации реализуют методы передачи телеизмерений с «жесткой коммутацией». В зависимости от установленных на РКН БРТС применяются три метода сбора ТМИ в ЦКП в реальном масштабе времени полета – «Сбор полных потоков ТМИ», «Сбор потоков ТМИ в структуре «Условный кадр», «Сбор «Репортажных потоков».

«Сбор полных потоков ТМИ» применяется для сбора телеизмерений среднеинформативных БРТС, когда ресурсы каналов передачи данных позволяют

осуществлять сбор ТМИ от наземных приемно-регистрирующих станций без проведения дополнительных преобразований.

«Сбор потоков ТМИ в структуре «Условный кадр» применяется для сбора телеизмерений ММП высокоинформативных БРТС «Скут», функционирующих в комбинированном режиме. Сущность данного метода заключается в обратном программном или аппаратном преобразовании: из восьмиразрядных слов БМП формируется одно- или двухпозиционный код слов ММП. Существенным недостатком данного метода является отсутствие учета фактической кроссировки локальных коммутаторов на каналах основного коммутатора БМП, что вносит дополнительную нагрузку «холостыми», не несущими информацию кодами слов ММП на каналы передачи данных.

«Сбор «Репортажных потоков» применяется для сбора телеизмерений высокоинформативной БРТС «Орбита IV» при информационном обеспечении запусков перспективных РКН семейства «Ангара». Сущность данного метода заключается в передаче части операций обработки ТМИ на средства регистрации и передачи ТМИ измерительного комплекса космодрома (ИКК), отдельных командно-измерительных комплексов (ОКИК) и отдельных измерительных пунктов (ОИП) Главного испытательного космического центра (ГИКЦ) по трассе полета РКН.

Основной недостаток методов «жесткой коммутации» – выдача потребителям неизменного состава телеметрических параметров с постоянной частотой их следования в потоке телеметрических сообщений. В современных СИТО запусков РКН около 90% расходов на сбор и обработку ТМИ в РМВ полета тратится на избыточные (бесполезные) данные. Как следствие высокая информационная избыточность и перегрузка каналов сбора ТМИ «холостыми» данными не позволяет в полной мере обеспечить доставку информации, необходимой для оценивания функционирования РКН в полете.

Особую актуальность данная проблема приобрела по итогам ИТО пусков РН семейства «Ангара» легкого и тяжелого классов, в ходе которых методы информационного обмена, реализованные в существующей СИТО запусков РКН,

не обеспечили доставку в ЦКП состава и объема информации, необходимого для оценки характеристик РН в реальном масштабе времени полета и в оперативном послеполетном режиме.

Таким образом, анализ функционирования СИТО запусков РКН показывает необходимость установления соответствия потребностей специалистов по анализу ТМИ возможностям средств сбора ТМИ. Все это приводит к необходимости применения при организации информационного обмена процедур, обеспечивающих адаптацию СИТО к изменяющимся условиям функционирования, особенно в реальном масштабе времени полета РКН.

1.2 Анализ методических подходов к формированию адаптивных процедур в системе информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения

Начиная с семидесятых годов двадцатого столетия среди специалистов в области телеметрии сформировалось устойчивое мнение, что существующие телеметрические системы, обеспечивающие циклический опрос каналов по жесткой кроссировочной схеме, уже не могут обеспечить выполнение многих задач, стоящих перед телеметрией новейших и будущих РКН. Изменение режимов опроса измерительных каналов ограничено возможностями системы коммутации. Это приводит к необходимости построения телеметрических систем, информационные характеристики которых согласовывались бы с изменением состояния телеметрируемого объекта и потребностями потребителей ТМИ [19, 32, 64, 103].

Первоначально сформировались два основных направления исследований в области адаптивных процедур в информационно-телеметрических системах:

- адаптация к состоянию канала передачи информации;
- адаптация к состоянию объекта испытаний.

Со временем, по мере совершенствования средств передачи данных, повышения устойчивости характеристик каналов информационного обмена, перехода на цифровые методы передачи информации, разработкой

и повсеместным внедрением методов и средств помехоустойчивой передачи данных, исследования методов адаптации к состоянию канала передачи информации ушли на второй план.

К настоящему времени в качестве приоритетного окончательно сформировалось направление исследований методов адаптации к состоянию объекта испытаний и разработка средств телеметрического обеспечения, способных видоизменяться в соответствии с особенностями функционирования объекта испытаний и потребностями потребителей, а характеристики каналов передачи информации в данных системах выступают ограничивающим фактором.

Наиболее развитым в настоящее время направлением в исследовании адаптивных процедур в телеметрических системах являются методы исключения (сокращения) избыточности измерительной информации. Режимы коммутации при данных методах устанавливаются для каждого измеряемого параметра, индивидуально исходя из его текущего значения и установленного режима информационного обслуживания. Адаптивные процедуры могут выполняться в различных элементах СИТО, в частности в БРТС, на средствах передачи и обработки информации [4, 16, 103].

В настоящее время существует два основных методических подхода формирования адаптивных процедур в СИТО:

- автоматическое изменение режимов опроса телеметрических параметров;
- программное изменение режимов опроса телеметрических параметров.

Подходы основаны на кусочной аппроксимации измеряемой величины, являющейся функцией времени, какой-либо простой функцией времени и передаче дискретных значений измеряемой величины в измерительном канале, имеющем максимальную погрешность аппроксимации $\varepsilon(t)$, либо при достижении погрешности аппроксимации некоторого заданного значения.

При автоматическом изменении режимов опроса телеметрических параметров состав и структура ТМИ автоматически изменяются в зависимости от изменения состояния РКН или других причин. Режимы коммутации устанавливаются для каждого измерительного канала автоматически на основе

результатов анализа текущего состояния входных сигналов и установленных правил информационного обслуживания [4, 16].

При данном подходе в СИТО должны обеспечиваться:

- контроль текущих значений телеметрических параметров РКН;
- изменение по результатам контроля состава и режимов коммутации параметров, точность их измерений, структуры информационного потока;
- выдача служебной информации о структуре информационного потока.

Одним из основных элементов, обеспечивающим адаптивные процедуры в СИТО с автоматическим установлением режимов опроса, является анализатор активности канала. По сигналам этих элементов, в зависимости от установленной дисциплины обслуживания, вырабатывается решение на обслуживание измерительного канала. Поскольку в телеметрических системах основными характеристиками являются метрологические, прежде всего точность, анализаторы активности контролируют значения текущих погрешностей аппроксимации, по значениям которых формируются заявки на обслуживание каналов. В общем случае адаптация представляет собой изменение режимов опроса телеметрических параметров в соответствии со скоростью изменения их значений на входе коммутатора и передаче ТМИ в РМВ, либо с задержкой при применении буферных запоминающих устройств. Для формирования адаптивных процедур применяются методы [4, 116]:

- адаптивной коммутации;
- адаптивной дискретизации.

Адаптивная коммутация [116, 117] заключается в автоматическом определении телеметрического параметра с наибольшей погрешностью аппроксимации после последней передачи, коммутации его измерительного канала в линию связи с одновременным запоминанием значения для последующего сравнения.

На рисунке 1.7 приведена обобщенная функциональная схема адаптивной коммутации.

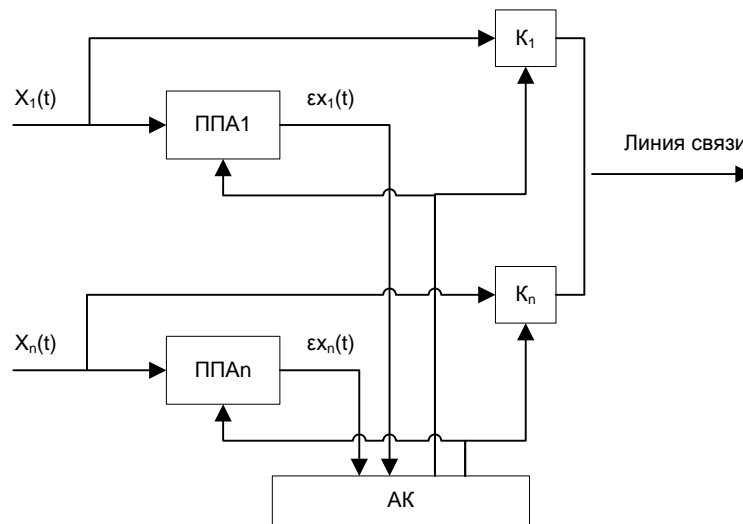


Рисунок 1.7 – Функциональная схема адаптивной коммутации

В каждом измерительном канале имеется преобразователь погрешности аппроксимации (ППА), определяющий погрешность аппроксимации по изменению значения телеметрического параметра. Адаптивный коммутатор (АК) путем последовательного опроса всех ППА выявляет измерительный канал с наибольшей погрешностью аппроксимации телеметрического параметра, открывает ключ (К) данного канала для пропуска отсчета в линию связи и дает команду ППА на запоминание текущего значения телеметрического параметра.

Особенностью адаптивной коммутации является передача измерительной информации в РМВ. Погрешность аппроксимации может иметь равные значения в нескольких каналах одновременно, что вследствие поочередности передачи информации может привести к дополнительной погрешности.

Адаптивная дискретизация [4, 116, 117] заключается в автоматической фиксации конца интервала дискретизации телеметрического параметра при достижении погрешности аппроксимации заданного значения.

На рисунке 1.8 приведена обобщенная функциональная схема адаптивной дискретизации.

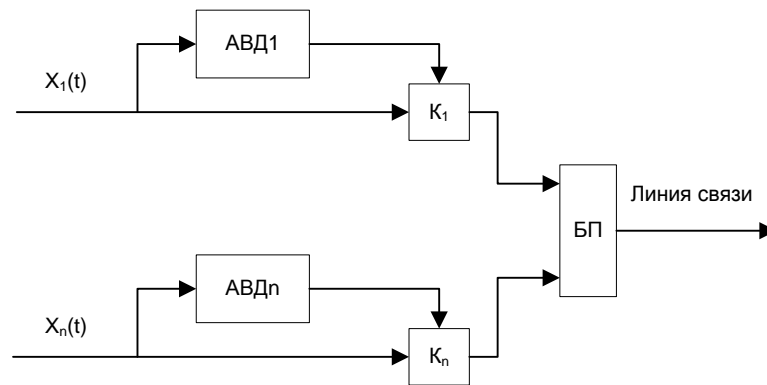


Рисунок 1.8 – Функциональная схема адаптивной дискретизации

Основными элементами данной схемы являются адаптивные временные дискретизаторы (АВД), выполняющие функции ППА и сравнивающего устройства. Если в каком-либо измерительном канале погрешность аппроксимации телеметрического параметра достигла заданного значения относительно предыдущего отсчета, АВД выдает команду на ключ (К), пропускающий ТМИ в буферную память (БП) с последующей выдачей в линию связи. Наличие БП обуславливает существенный недостаток данного метода, заключающийся в передаче ТМИ не в РМВ, а с некоторой задержкой, что может приводить к дополнительной погрешности, для устранения которой необходима выдача посылок времени каждого отсчета телеметрических параметров.

Автоматическое изменение режимов опроса телеметрических параметров позволяет сократить объемы передаваемых данных за счет меньшей частоты передачи отсчетов телеметрических параметров по сравнению с системами с постоянным интервалом дискретизации. Однако нарушение цикличности опросов измерительных каналов требует передачи адресных посылок, указывающих номер измерительного канала, а для устранения дополнительной погрешности при передаче информации с задержкой и посылок времени отсчета.

Достоинством автоматического изменения режимов опроса телеметрических параметров является высокая адаптивность СИТО, в наибольшей степени отвечающая потребностям потребителя информации и наиболее полно соответствующей процессам, протекающим в РКН. Недостатком является высокая сложность при реализации, обусловленная необходимостью установки

анализаторов активности в каждом измерительном канале, буферных устройств и сложных адаптивных коммутаторов, обеспечивающих согласование информационного потока с линиями связи. В результате чего в СИТО запусков РКН данный методический подход, а именно адаптивная дискретизация, используется только для исключения неинформативных отсчетов телеметрических параметров при проведении обработки ТМИ РБ в целях экономии ресурсов средств вычислительной техники.

Ввиду высокой сложности реализации автоматического изменения режимов опроса телеметрических параметров, в настоящее время особое внимание уделяется программному подходу формирования адаптивных процедур в СИТО. При программном подходе режимы опроса телеметрических параметров – состав и последовательность опроса измерительных каналов, шаг дискретизации меняются по программе, хранящейся в памяти системы. Это позволяет осуществить гибкое программное управление сбором и передачей информации в элементах СИТО запусков РКН по командам блока управления в зависимости от ситуации на борту РКН [16, 44].

В рамках данного подхода наиболее распространенным является метод кусочно-равномерной программной дискретизации. При известном характере изменения телеметрических параметров $x_i(t)$ выделяются отдельные участки, на которых устанавливаются свои равномерные интервалы дискретизации. Выделение участков может быть произведено по интервалам времени T_j , по достижении $x_i(t)$ заранее заданных значений, либо по событиям циклограммы полета РКН [117]. В качестве таких участков могут выступать участки переходных и установившихся значений телеметрических параметров. В качестве примера на рисунке 1.9 приведен график изменения параметра «Давление горючего после насоса» на участках запуска, установившейся работы на номинальном режиме и выключения двигательной установки РБ «Бриз-КМ».

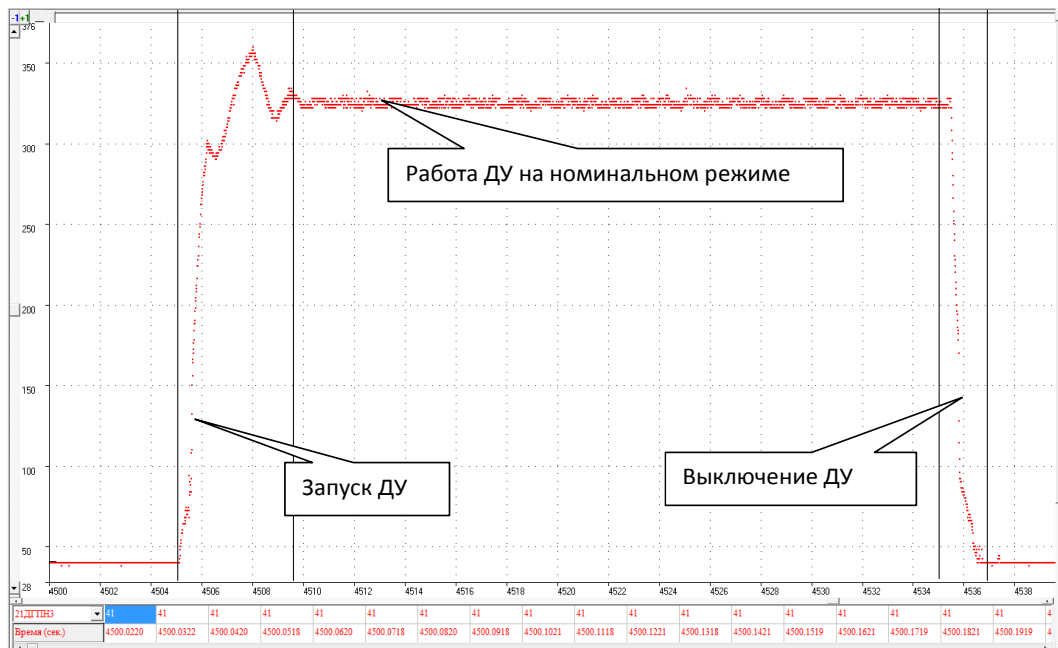


Рисунок 1.9 – График изменения параметра «Давление горючего после насоса»

Анализ графика показывает относительно короткую продолжительность участков переходных процессов по сравнению с длительностью участков установившихся режимов функционирования.

На рисунке 1.10 приведена обобщенная функциональная схема программной кусочно-равномерной дискретизации. Блок управления (БУ) в зависимости от состоявшегося события циклограммы полета РКН (C_j) либо по времени (T) выдает команду в коммутатор на изменение режима опроса телеметрических параметров в соответствии с заданной программой. Коммутатор, в соответствии с текущей программой сбора ТМИ, осуществляет опрос измерительных каналов телеметрических параметров, формирует групповой телеметрический поток и выдает его в устройство сопряжения с линией связи (УСЛ). Так как очередность опроса измерительных каналов определяется известной программой, то наличие буферной памяти в составе УСЛ и передача ТМИ на динамичных участках не в РМВ не приводит к дополнительной погрешности и, в отличие от автоматической адаптивной дискретизации, нет необходимости передавать посылки времени каждого отчета телеметрических параметров.

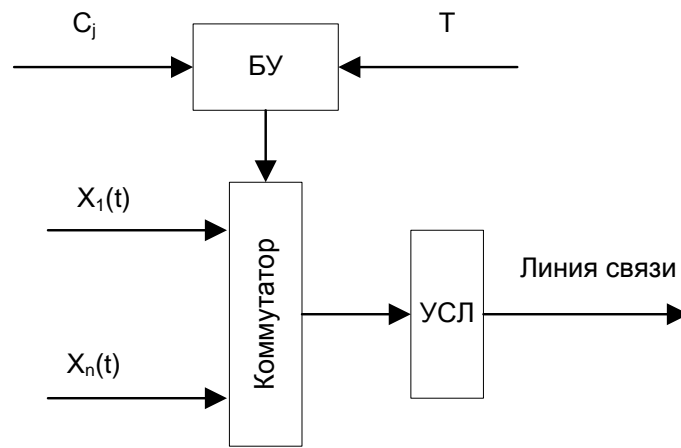


Рисунок 1.10 – Обобщенная функциональная схема программной кусочно-равномерной дискретизации

Программное изменение режимов опроса телеметрических параметров позволяет сократить объемы передаваемых данных за счет меньшей частоты передачи отсчетов телеметрических параметров на участках установившихся значений по сравнению с телеметрическими системами с постоянным интервалом дискретизации, частота опроса в которых настраивается на максимальную динамику. Однако применение программной кусочно-равномерной дискретизации в подсистеме сбора ТМИ приводит к нарушению однородности состава телеметрического кадра в передаваемых по линиям связи сообщениях, что вызывает необходимость передачи адресных посылок.

Основными достоинствами программного изменения режимов опроса телеметрических параметров являются относительная простота реализации, высокая надежность и гибкость, обеспечивающая возможность оперативного изменения состава ТМИ.

Подход программного изменения режимов опроса телеметрических параметров реализован в современных БРТС «Орбита-ИВМО» и «Пирит». Данные БРТС позволяют гибко строить систему измерений РКН, в широких пределах варьируя количество, тип и частоту опроса телеметрических параметров; изменять параметры системы измерений (состав и частоту опроса телеметрических параметров, суммарную информативность) путем выбора одной из программ измерений, заложенных в память системы, в том числе и в ходе полета РКН [103].

Важнейшей специфической характеристикой адаптирующихся систем телеизмерений является коэффициент сжатия k_c [4, 64], который может быть определен как отношение отсчетов при равномерной временной дискретизации S_m к числу отсчетов при сокращении плотности потока сообщений S за промежуток времени при условии равенства уровней квантования и погрешности восстановления непрерывного процесса по дискретным отсчетам

$$k_c = S_m / S. \quad (1.1)$$

Однако коэффициент сжатия, ввиду необходимости передачи служебной информации – адресных и временных посылок, не позволяет в полной мере оценить эффективность применения адаптивных процедур с точки зрения устранения информационной избыточности. Эффект от применения адаптивных процедур существует при уменьшении информационного потока V по сравнению с информационным потоком при равномерной временной дискретизации V_m

$$V = S * (n_p + n_s + n_t); \quad (1.2)$$

$$V_m = S_m * n_p = S * n_p * k_c, \quad (1.3)$$

где n_p – число разрядов кода значения параметра;

n_s – число разрядов кода номера параметра (адреса);

n_t – число разрядов кода времени.

Выражения 1.2 и 1.3 позволяют определить минимальное значение коэффициента сжатия, при котором проявляется эффект от адаптации при различных числах уровней квантования и телеметрических параметров

$$V_m > V; \quad (1.4)$$

$$S * n * k_c > S * (n_p + n_s + n_t); \quad (1.5)$$

$$k_c > (n_p + n_s + n_t) / n_p. \quad (1.6)$$

На рисунке 1.11 приведены графики зависимости минимального коэффициента сжатия от количества телеметрируемых параметров для $n = 10, 15$ и 20 без учета посылок кода времени (а) и с учетом посылок кода времени (б). Результаты расчетов показывают, что наибольший эффект от адаптивных процедур в СИТО может быть получен при высокоточном (высокий уровень квантования) телеметрировании относительно небольшого числа параметров.

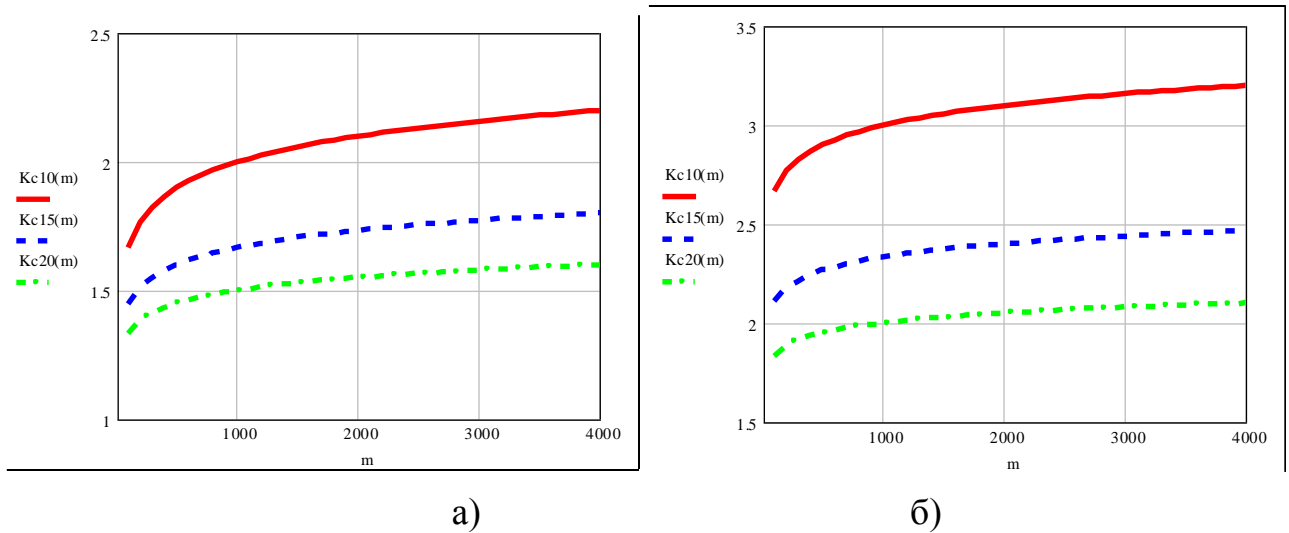


Рисунок 1.11 – Графики зависимости минимального коэффициента сжатия от числа параметров и числа уровней квантования

При этом современные РКН отличаются большим числом телеметрических параметров с относительно невысоким уровнем квантования: 8 – 12 разрядов кода. То есть эффект устранения информационной избыточности от адаптивных процедур сбора ТМИ может быть достигнут начиная с двукратного сокращения телеметрических сообщений в телеметрических линиях связи при реализации программного подхода и с трехкратного – при реализации автоматического подхода изменения режимов опроса телеметрических параметров.

Так как применение адаптивных процедур в СИТО снижает объемы передаваемых данных за счет устранения информационной избыточности на участках установившихся значений телеметрических параметров, то при сохранении максимальной частоты опроса, обеспечивающей равенство погрешности восстановления непрерывного процесса по дискретным отсчетам на переходных участках, коэффициент сжатия может быть определен как

$$k_c = (T_p + T_u) / T_p \quad (1.7)$$

для автоматического изменения режимов опроса телеметрических параметров и

$$k_c = (T_p + T_u) / (T_p + T_u / K_t) \quad (1.8)$$

для программного, где T_p – суммарная длительность участков переходных процессов на интервале оценивания;

T_u – суммарная длительность участков установившихся значений телеметрического параметра;

K_t – коэффициент увеличения дискретности опроса телеметрических параметра.

Коэффициент уменьшения информационного потока k_v при передаче адресных и временных посылок принимает вид

$$K_v = \frac{(T_p + T_u) \cdot n_p}{T_p \cdot (n_p + n_s + n_t)} \quad (1.9)$$

для автоматического и

$$K_v = \frac{(T_p + T_u) \cdot n_p}{(T_p + T_u / K_t) \cdot (n_p + n_s)} \quad (1.10)$$

для программного изменения режимов опроса телеметрических параметров.

На рисунке 1.12 приведен график зависимости коэффициента уменьшения информационного потока от отношения длительности интервала контроля телеметрического параметра к суммарной длительности переходных процессов при автоматическом и программном изменении режимов опроса с коэффициентом увеличения дискретности опроса 10, 25, 50 и 100 для СИТО, обеспечивающей телеметрирование 1000 параметров в 10-разрядных кодах значений.

Из графика видно, что формирование адаптивных процедур в СИТО запусков РКН на основе подхода автоматического изменения режимов опроса телеметрических параметров имеет преимущество перед программным изменением только при большой относительной длительности участков установившихся значений телеметрических параметров. Так, для параметров «Давление горючего на форсунках двигателей 1 ступени» РН «Протон-М», где контролируемый интервал составляет 180 с, суммарная длительность переходных процессов запуска и выключения двигателей – ≈ 8 с, коэффициент сжатия для автоматического и программного изменения режимов опроса с коэффициентами увеличения дискретности – 10, 25, 50 и 100 соответственно составляет 22.5, 7.14,

12.09, 15.73, 18.52, а коэффициент уменьшения информационного потока 7.5, 3.57, 6.05, 7.87, 9.26.

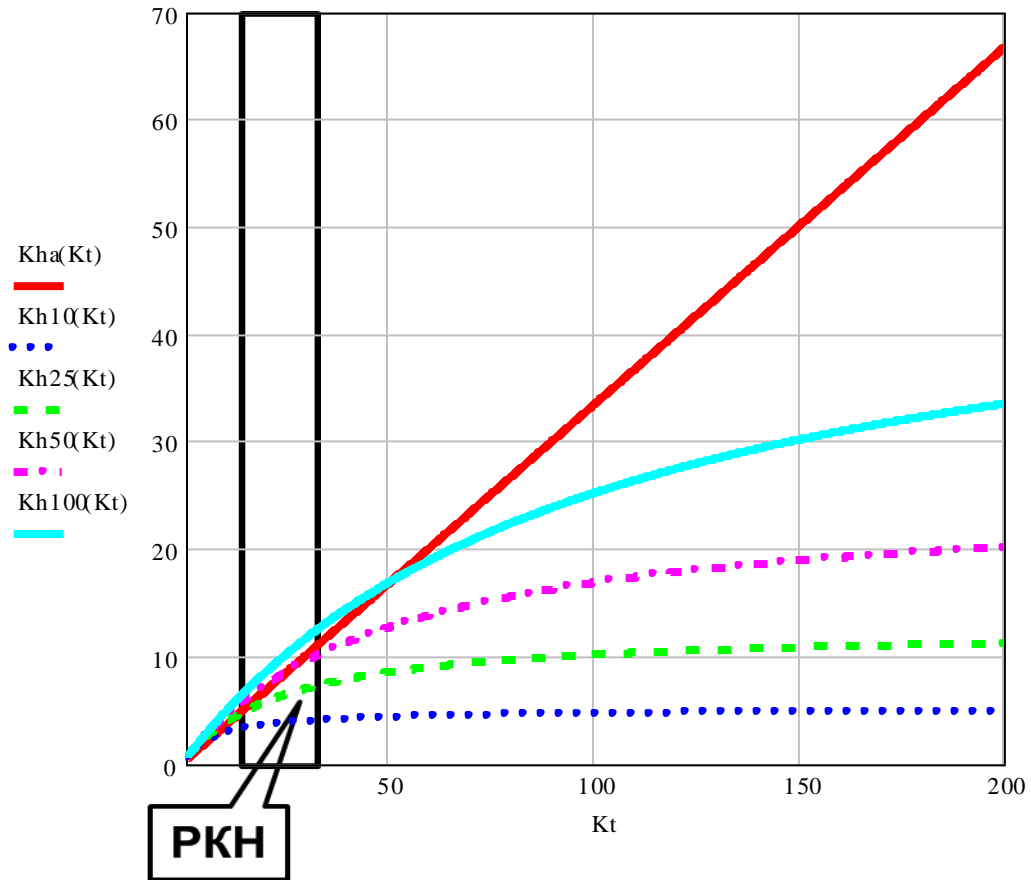


Рисунок 1.12 – График зависимости коэффициента уменьшения информационного потока от отношения интервала оценивания к суммарной длительности переходных процессов

Из графика видно, что формирование адаптивных процедур в СИТО запусков РКН на основе подхода автоматического изменения режимов опроса телеметрических параметров имеет преимущество перед программным изменением только при большой относительной длительности участков установившихся значений телеметрических параметров. Так, для параметров «Давление горючего на форсунках двигателей 1 ступени» РН «Протон-М», где контролируемый интервал составляет 180 с, суммарная длительность переходных процессов запуска и выключения двигателей – ≈ 8 с, коэффициент сжатия для автоматического и программного изменения режимов опроса с коэффициентами увеличения дискретности – 10, 25, 50 и 100 соответственно составляет 22.5, 7.14,

12.09, 15.73, 18.52, а коэффициент уменьшения информационного потока 7.5, 3.57, 6.05, 7.87, 9.26.

Таким образом, анализ методических подходов к формированию адаптивных процедур в СИТО запусков РКН показывает преимущества метода «программной кусочно-равномерной дискретизации» для исключения (сокращения) избыточности ТМИ при выполнении задач ИТО запусков РКН. Метод «программной кусочно-равномерной дискретизации» основан на изменении шага дискретизации сообщений телеметрических параметров по заранее установленной программе, хранящейся в памяти системы.

1.3 Формализация основных процессов функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения

При проведении исследований, связанных с обоснованием и выбором рациональных характеристик и параметров СИТО запусков РКН, их изменением во времени на различных этапах функционирования, СИТО рассматривается как информационно-измерительная техническая система. Такой подход обосновывается особенностями структурно-функциональных признаков СИТО и условиями проведения ИТО запусков РКН. Следует отметить, что в классе систем измерений СИТО запусков РКН имеет наиболее сложную структуру для решения задач прямых, косвенных, совокупных или совместных измерений.

Как техническая система [50, 111], СИТО запусков РКН, представляет собой совокупность взаимосвязанных и совместно функционирующих измерительных, приемно-передающих, вычислительных и других технических средств, выполняющих единую конечную задачу. Как информационная система [50], она является взаимосвязанной совокупностью информационных процессов и потоков, обеспечивающих потребителей информацией, необходимой для выполнения задач контроля полета, оценки лётно-технических характеристик и диагностики РКН. СИТО запусков РКН характеризуются высокой размерностью, множественностью и сложностью зависимостей, наличием прямых и обратных связей материального

и информационного типа, иерархичностью, оперативностью реализации процессов ИТО [50]. При этом, СИТО запусков РКН, как информационно-измерительная техническая система, одновременно является подсистемой системы более высокого уровня – автоматизированной системы информационного обеспечения подготовки к пуску, пуска и полета РКН.

Анализ структуры, информационных и технических свойств СИТО, процессов функционирования ее составных элементов показал, что она в полной мере обладает характеристиками сложной динамической системы. СИТО запусков РКН определяется большим набором параметров, характеризующих ее составные элементы и процессы ИТО пуска и полета РКН. Множественность параметров системы, наличие между ними сложных прямых и обратных связей обусловлены большим количеством частных элементов различного назначения и сложности, предназначенных для описания процессов функционирования СИТО [46, 47].

Как самостоятельная структурно-организованная система, СИТО запусков РКН содержит ряд подсистем [21, 38, 50, 75, 95], выполняющих сложные измерительно-информационные и управляющие функции, которые сами состоят из подчиненных элементов более низкого уровня. В соответствии с принципами построения сложных многоуровневых иерархических систем [50, 68, 85, 108], составным элементам СИТО запусков РКН отводятся строго определенные функции.

В ходе реализации системного подхода [20, 85, 118] к обоснованию и выбору рациональных параметров адаптивной СИТО запусков РКН решаются следующие основные задачи:

- формулировка конечной цели системы;
- декомпозиция системы на подсистемы и элементы, выявление их функций, закономерностей описания основных процессов функционирования системы;
- выявление параметров, отображающих структуру системы и процессы ее функционирования;

- выбор и формирование критерия оценки качества функционирования СИТО запусков РКН;
- установление функциональных связей между параметрами;
- разработка математической модели функционирования системы;
- выявление случайных и неопределенных факторов, анализ их влияния на результаты расчетов;
- поиск рациональных (по выбранному критерию) значений параметров СИТО запусков РКН с учетом информации о возможных ситуациях в рамках выполнения задач ИТО запуска РКН, взаимодействующих системах и т.д.;
- оценка полученного решения.

Необходимо отметить, что конечной целью ИТО пуска и полета РКН является своевременное получение достоверной информации о функционировании и состоянии составных частей, систем и агрегатов РКН на различных участках полета, в том числе в случае возникновения и развития нештатных или аварийных процессов на борту [50].

Для формализации процессов функционирования СИТО запусков РКН, влияющих на выполнение задач ИТО пуска и полета РКН, введем следующие обозначения [17, 45, 59]:

- $\{R\}$ – множество входов СИТО – телеметрических параметров РКН;
- $\{R_{SP}\}$ – множество сигнальных параметров РКН;
- $\{R_{FP}\}$ – множество функциональных параметров РКН;
- $\{Y\}$ – множество выходов СИТО – форм представления телеметрических параметров РКН;
- $\{Y_{SP}\}$ – множество форм представления сигнальных параметров РКН;
- $\{Y_{FP}\}$ – множество форм представления функциональных параметров РКН;
- $\{M\}$ – множество элементов, составляющих технические средства СИТО;
- $\{M_{BRTS}\}$ – множество элементов, составляющих бортовые радиотелеметрические средства;
- $\{M_{PP}\}$ – множество элементов, составляющих бортовые первичные преобразователи телеметрических параметров РКН;

$\{M_{IP}\}$ – множество элементов, составляющих наземные приемно-регистрирующие средства измерительных пунктов;

$\{M_{PPS}\}$ – множество элементов, составляющих приемно-передающие средства;

$\{M_{LS}\}$ – множество элементов, составляющих линии связи;

$\{M_{СКР}\}$ – множество элементов, составляющих средства центров контроля полета РКН;

$\{S\}$ – множество элементов, составляющих информационные потоки в СИТО;

$\{S_I\}$ – множество элементов, составляющих источники телеметрических сообщений;

$\{S_{LS}\}$ – множество элементов, составляющих информационные потоки в линиях связи;

$\{S_{PI}\}$ – множество элементов, составляющих выходные информационные потоки;

$\{A\}$ – множество постоянных во времени параметров, характеризующих элементы СИТО;

$\{A^R\}$ – множество постоянных во времени параметров, характеризующих входы СИТО;

$\{A^Y\}$ – множество постоянных во времени параметров, характеризующих выходы СИТО;

$\{A^M\}$ – множество постоянных во времени параметров, характеризующих технические средства СИТО;

$\{A^S\}$ – множество постоянных во времени параметров, характеризующих информационные потоки СИТО;

$\{P\}$ – множество переменных во времени параметров, характеризующих элементы СИТО;

$\{P^R\}$ – множество переменных во времени параметров, характеризующих входы СИТО;

$\{P^Y\}$ – множество переменных во времени параметров, характеризующих выходы СИТО;

$\{P^M\}$ – множество переменных во времени параметров, характеризующих технические средства СИТО;

$\{P^S\}$ – множество переменных во времени параметров, характеризующих информационные потоки СИТО;

$\{T\}$ – множество параметров, характеризующих изменение переменных во времени параметров элементов СИТО;

$\{T^R\}$ – множество параметров, характеризующих изменение переменных во времени параметров элементов входов СИТО;

$\{T^M\}$ – множество параметров, характеризующих изменение переменных во времени параметров технические средства СИТО;

$\{G\}$ – множество элементов, оказывающих возмущающее воздействие на элементы СИТО.

В общем виде множество $\{R\}$ состоит из элементов, соответствующих следующей совокупности:

$$\begin{aligned} \{R\} &= \{R_{SP}\} \cup \{R_{FP}\}; \\ \{R_{SP}\} &= \{A^{RSP}\} \cup \{P^{RSP}\} \cup \{T^R\}; \\ \{R_{FP}\} &= \{A^{RFP}\} \cup \{P^{RFP}\} \cup \{T^R\}; \\ \{R\} &= \{A^{RSP}\} \cup \{P^{RSP}\} \cup \{A^{RFP}\} \cup \{P^{RFP}\} \cup \{T^R\}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Множество $\{Y\}$, состоящее из элементов, определяющих выходы СИТО запусков РКН, можно представить в виде следующей совокупности:

$$\begin{aligned} \{Y\} &= \{Y_{SP}\} \cup \{Y_{FP}\}; \\ \{Y_{SP}\} &= \{A^{YSP}\} \cup \{P^{YSP}\}; \\ \{Y_{FP}\} &= \{A^{YFP}\} \cup \{P^{YFP}\}; \\ \{Y\} &= \{A^{YSP}\} \cup \{P^{YSP}\} \cup \{A^{YFP}\} \cup \{P^{YFP}\}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Для формализованного описания структуры СИТО запусков РКН, приведенной в первом параграфе, множеством элементов $\{M\}$, используем понятия – БИТС и наземный измерительный комплекс (НИК). Для чего множество $\{M\}$ представим в виде двух не пересекающихся подмножеств $\{M_{BITS}\}$ и $\{M_{NIK}\}$:

$$\{M\} = \{M_{BITS}\} \cup \{M_{NIK}\}.$$

Множество $\{M_{BITS}\}$ состоит из элементов бортовой информационно-телеметрической системы и представляет собой упорядоченную совокупность элементов множеств $\{M_{BRTS}\}$ и $\{M_{PP}\}$: $\{M_{BITS}\} = \bigcup_{b \in B} \{m_{BRTS_b}, \{M_{PP_b}\}\}$,

где: B – мощность множества $\{M_{BRTS}\}$ – количество БРТС, установленных на борту РКН;

$\{M_{PP_b}\}$ – комплекты первичных преобразователей телеметрических параметров РКН, коммутированных на b -ю БРТС (взаимно не пересекающиеся подмножества множества $\{M_{PP}\}$):

$$\begin{aligned} \{M_{PP}\} &= \bigcup_{b \in B} \{M_{PP_b}\}; \\ \{M_{BRTS}\} &= \{A^{BRTS}\} \cup \{\Pi^{BRTS}\} \cup \{T^{BRTS}\}; \\ \{M_{PP}\} &= \{A^{PP}\}; \\ \{M_{BITS}\} &= \bigcup_{b \in B} \{A_b^{BRTS}, \Pi_b^{BRTS}, T_b^{BRTS}, \{A_b^{PP}\}\}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Множество $\{M_{NIK}\}$ состоит из элементов, входящих в состав НАКУ ГИКЦ и ИКК, привлекаемых для ИТО запуска РКН:

$$\begin{aligned} \{M_{NIK}\} &= \{M_{IP}\} \cup \{M_{PPS}\} \cup \{M_{LS}\} \cup \{M_{CKP}\}; \\ \{M_{IP}\} &= \{A^{IP}\}; \\ \{M_{PPS}\} &= \{A^{PPS}\} \cup \{\Pi^{PPS}\} \cup \{T^{PPS}\}; \\ \{M_{LS}\} &= \{A^{LS}\} \cup \{\Pi^{LS}\} \cup \{T^{LS}\}; \\ \{M_{CKP}\} &= \{A^{CKP}\} \cup \{\Pi^{CKP}\}; \\ \{M_{NIK}\} &= \{A^{IP}\} \cup \{A^{PPS}\} \cup \{\Pi^{PPS}\} \cup \{A^{LS}\} \cup \{\Pi^{LS}\} \cup \{A^{CKP}\} \cup \{\Pi^{CKP}\} \cup \{T^{PPS}\} \cup \{T^{LS}\}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

При формализации множества $\{S\}$, элементы которого составляют информационные потоки в СИТО, следует исходить из того положения, что процессы сбора, передачи и отображения информационных потоков реализуются техническими средствами СИТО, то есть элементами множества $\{M\}$. Множество $\{S\}$ можно представить в виде следующей совокупности:

$$\begin{aligned} \{S\} &= \{S_I\} \cup \{S_{LS}\} \cup \{S_{PI}\}; \\ \{S_I\} &= \{A^{SI}\} \cup \{\Pi^{SI}\}; \\ \{S_{LS}\} &= \{A^{SLS}\} \cup \{\Pi^{SLS}\}; \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\{S_{PI}\} = \{A^{SPI}\} \cup \{\Pi^{SPI}\};$$

$$\{S\} = \{A^{SI}\} \cup \{\Pi^{SI}\} \cup \{A^{SLS}\} \cup \{\Pi^{SLS}\} \cup \{A^{SPI}\} \cup \{\Pi^{SPI}\}.$$

При этом элементы множества $\{S\}$ могут быть формализовано описаны, как выходы элементов множества технических средств СИТО $\{M\}$ в условиях влияния возмущающих воздействий $\{G\}$:

$$S_I \Rightarrow F(\{R\}, \{M_{BITS}\}); \quad (1.16)$$

$$S_{LS} \Rightarrow F(\{S_I\}, \{M_{IP}\}, \{M_{PPS}\}, \{M_{LS}\}, \{G\}); \quad (1.17)$$

$$S_{PI} \Rightarrow F(\{S_{LS}\}, \{M_{СКР}\}). \quad (1.18)$$

При таком представлении функциональное формализованное описание выходов СИТО $\{Y\}$ принимает вид

$$Y \Rightarrow F(\{S_{PI}\}, \{M_{СКР}\}). \quad (1.19)$$

Для формализованного описания функционирования СИТО запусков РКН, как целенаправленной системы с программным управлением, требуется однозначно определить [85, 92] из множества переменных во времени параметров, характеризующих элементы СИТО – $\{П\}$:

- параметры, характеризующие степень достижения цели системы;
- варьируемые параметры, которыми имеется возможность распоряжаться при формировании программы функционирования системы;
- допустимые пределы изменения этих параметров;
- влияние изменения варьируемых параметров на достижение цели функционирования системы.

Проведенный анализ функционирования СИТО запусков РКН показывает, что при определении программы сбора ТМИ в ходе планирования работы средств НИК, в СИТО запусков РКН устанавливаются значения элементов множеств $\{\Pi^{PPS}\}$, $\{\Pi^{LS}\}$, $\{T^{PPS}\}$ и $\{T^{LS}\}$. Допустимые пределы изменения определяются характеристиками технических средств СИТО – элементы множеств $\{A^{PP}\}$, $\{A^{BRTS}\}$, $\{A^{IP}\}$, $\{A^{PPS}\}$, $\{A^{LS}\}$, и характеристиками их режимов функционирования – элементы множеств $\{\Pi^{BRTS}\}$, $\{T^{BRTS}\}$. При этом элементы множеств $\{\Pi^{LS}\}$ и $\{T^{LS}\}$ определяют план задействования каналов передачи ТМИ (распределение ресурсов СИТО), а элементы множеств $\{\Pi^{PPS}\}$ и $\{T^{PPS}\}$ определяют план

формирования потока телеметрических сообщений СИТО (реализацию метода передачи телеизмерений от НИП до ЦКП РКН).

Исходя из цели функционирования СИТО запусков РКН и формализованного описания формирования информационных потоков и выходов СИТО (1.16 – 1.19), степень достижения цели системы характеризуют элементы множества $\{\Pi^{SLS}\}$.

Влияние параметров функционирования СИТО запусков РКН на степень достижения цели ИТО запуска может быть представлено правилами определения параметров, составляющих программу сбора ТМИ РКН, и параметров, определяющих степень достижения цели:

$$\Pi^{LS}=F(\{M_{BRTS}\}, \{A^{IP}\}, \{A^{LS}\}); \quad (1.20)$$

$$T^{LS}=F(\{T^{BRTS}\}, \{A^{IP}\}); \quad (1.21)$$

$$\Pi^{PPS}=F(\{R\}, \{M_{BITS}\}, \{A^{SLS}\}, \{\Pi^{LS}\}, \{T^{LS}\}); \quad (1.22)$$

$$T^{PPS}=F(\{T^R\}, \{T^{BRTS}\}, \{T^{LS}\}); \quad (1.23)$$

$$\Pi^{SLS}=F(\{S_I\}, \{\Pi^{PPS}\}, \{T^{PPS}\}). \quad (1.24)$$

Таким образом, в ходе исследования обоснована необходимость системного подхода к определению рациональных значений варьируемых параметров адаптивной СИТО запусков РКН. При этом в рамках системного подхода проведена формализация процессов функционирования СИТО запусков РКН, влияющих на выполнение задач ИТО подготовки к пуску, пуска и полета РКН.

1.4 Выбор и обоснование системы показателей и критериев качества системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения

При исследованиях сложных систем их оценка, как правило, проводится не по одному показателю и критерию, а на основе комплексного учета совокупности показателей и критериев [33, 79]. Поэтому для оценки качества СИТО запусков перспективных РКН необходимо сформировать систему показателей и критериев качества, в наибольшей степени отвечающих цели системы.

Анализ работ, посвященных вопросам ИТО, контроля и оценки состояния сложных динамических технических систем [12, 14, 21, 31, 35, 55, 87, 109, 116] показывает, что целевому назначению СИТО запуска РКН в наибольшей степени соответствуют показатели и критерии количества информации.

Множество показателей качества СИТО запусков РКН можно условно разделить на ряд групп:

интегральные (обобщенные) показатели качества СИТО, по которым оценивается качество информации о состоянии бортовых систем РКН, доставляемой потребителям;

частные показатели качества СИТО, которые характеризуют качество информационных операций, выполняемых составными элементами СИТО.

В качестве интегральных (обобщенных) показателей качества СИТО [28, 34, 36] целесообразно принять:

– неопределенность телеметрических данных, которая характеризуется апостериорной энтропией сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО $H_{aps}(Y)$;

– информационная производительность, которая характеризуется плотностью потока телеметрических сообщений на выходе СИТО $V(Y)$.

В качестве частных показателей БИТС целесообразно принять следующие:

– количество телеметрических параметров РКН b -й БРТС при p -й программе измерений $R_{b,p}^{BRTS}$, $b=1...B$, $p=1...P_b^{BRTS}$;

– суммарная погрешность измерения и первичного преобразования r -го телеметрического параметра РКН δ_r , $r=1...R^{BITS}$;

– частота опроса r -го телеметрического параметра РКН при p -й программе измерений $f_{r,p}^{BITS}$, $r=1...R^{BITS}$, $p=1...P$,

где B – количество БРТС в составе БИТС;

$R^{BITS} = \sum R_{b,p}^{BRTS}$ – количество телеметрических параметров РКН;

P_b^{BRTS} , $b=1...B$ – множество программ измерений, реализуемых b -й БРТС;

$P = \left| \bigcup_{b \in B} P_b^{BRTS} \right|$ – количество программ измерений, реализуемых БИТС РКН.

В качестве частных показателей элементов НИК целесообразно принять следующие:

1. Показатели плана задействования каналов передачи ТМИ:

– интервал времени выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в

каналах передачи ТМИ $T^{SLS} = \bigcup_{m \in M_{IP}} \left(t_m^{ipZRV} \cap \bigcup_{l \in L} t_{m,l}^{kLS} \right)$;

– количество каналов передачи ТМИ от НИП, с коммутированных в l -й линии связи при n -й комбинации коммутации НИП в каналы передачи ТМИ $m_{n,l}^{kLS}$, $n = 1 \dots N$, $l = 1 \dots L$;

– пропускная способность канала передачи ТМИ, которая характеризуется максимально возможным объемом сообщений, который может быть передан в единицу времени по каналу с m -м НИП в l -й линии связи $v_{m,l}^{LS}$, $m = 1 \dots M_{IP}$, $l = 1 \dots L$, где M_{IP} – количество НИП по трассе полета РКН;

t_m^{ipZRV} – интервал времени зоны радиовидимости m -го НИП;

$t_{m,l}^{kLS}$ – интервал времени коммутации m -го НИП в l -й линии связи;

L – количество телеметрических линий связи в составе НИК;

N – количество участков плана задействования каналов передачи ТМИ при проведении ИТО запуска РКН.

2. Показатели плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО:

– количество параметров РКН, выдаваемых в каналах передачи ТМИ на q -м участке плана формирования потока телеметрических сообщений S_q^{LS} , $q = 1 \dots Q$;

– коэффициент прореживания s -го телеметрического параметра РКН в каналах передачи ТМИ на q -м участке плана формирования потока телеметрических сообщений – целое число, характеризующее размер выборки

сообщений телеметрического параметра: $k_{s,q}^{prLS} = \frac{f_{s,p}^{BITS}}{f_{s,q}^{LS}}, s = 1 \dots S^{LS}, q = 1 \dots Q, p = 1 \dots P$

для всех $t_q^{prPPS} \cap t_p^{prBITS} \neq \emptyset$, где Q – количество участков плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО;

$f_{q,s}^{LS}$ – частота выдачи s -го телеметрического параметра РКН в канал передачи ТМИ на q -м участке плана формирования потока телеметрических сообщений;

t_p^{prBITS} – интервал времени действия p -й программы измерений;

t_q^{prPPS} – интервал времени действия q -го участка плана формирования потока телеметрических сообщений.

Частные показатели качества составных элементов СИТО определяют обобщенные следующим образом:

– неопределенность телеметрических данных в СИТО определяется показателями $R_{b,p}^{BRTS}$, δ_r , $f_{r,p}^{BITS}$, T^{SLS} , $m_{n,l}^{kLS}$, S_q^{LS} , $k_{s,q}^{prLS}$;

– информационная производительность определяется показателями $R_{b,p}^{BRTS}$, $f_{r,p}^{BITS}$, S_q^{LS} , $k_{s,q}^{prLS}$, $v_{m,l}^{LS}$.

При этом изменение частных показателей, направленное на улучшение качества СИТО по показателю неопределенность телеметрических данных, приводит к увеличению информационной производительности СИТО и потребной пропускной способности каналов передачи данных.

Структура принятой в настоящей работе системы показателей качества СИТО запусков РКН представлена на рисунке 1.13.

Исходя из цели функционирования, критерием качества СИТО запусков РКН является обеспечение потребителей максимальным количеством информации о состоянии бортовых систем РКН при наличии ограничений на ресурсы пропускной способности каналов передачи ТМИ. Соответственно, критерии интегральных (обобщенных) показателей формулируются следующим образом:

- критерий неопределенности телеметрических данных в СИТО – обеспечение минимальной апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО;
- критерий информационной производительности СИТО – обеспечение информационной производительности не более располагаемой пропускной способности каналов передачи ТМИ.

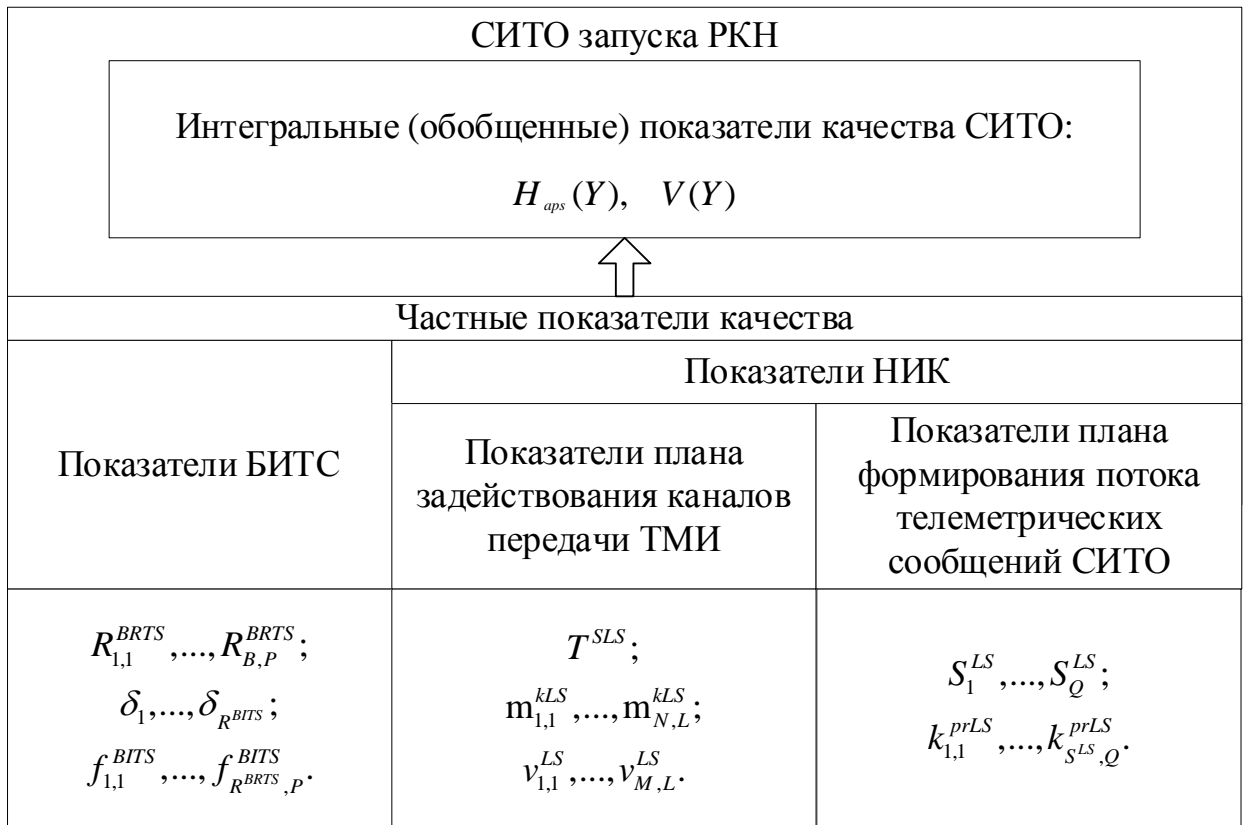


Рисунок 1.13 – Система показателей качества СИТО запусков РКН

В общем виде указанные критерии интегральных (обобщенных) показателей качества СИТО можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} H^{aps}(Y) &\rightarrow \min; \\ V(Y) &\leq V_{расп}. \end{aligned} \quad (1.25)$$

При рассмотрении критериев частных показателей качества элементов СИТО следует исходить из того положения, что значения показателей БИТС

формируются на этапах создания РКН и определяют границы области допустимых значений показателей функционирования элементов НИК.

Таким образом, критерии частных показателей качества СИТО, направленных на обеспечение выполнения критериев интегральных (обобщенных) показателей, формулируются следующим образом:

1. Критерии показателей плана задействования каналов передачи ТМИ [48]:

– критерий времени выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ – обеспечение непрерывности доставки ТМИ в ЦКП на всем протяжении полета РКН в пределах зоны радиовидимости НИК;

– критерий количества каналов передачи ТМИ – обеспечение достаточности количества одновременно с коммутированных в линии связи НИП для обеспечения непрерывности доставки ТМИ при ограничениях на количество комплектов каналообразующей аппаратуры центральной станции;

– критерий распределения пропускной способности каналов передачи ТМИ – обеспечение распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП пропорционально плотности потока ТМИ, выдаваемой от средств НИП в ЦКП, при ограничениях ресурса каналов передачи ТМИ.

В формализованном виде критерии показателей плана задействования каналов передачи ТМИ можно представить следующим образом:

$$T^{SLS} = T^{ZRV}; \quad (1.26)$$

$$m_{n,l}^{kLS\ tr} \leq m_{n,l}^{kLS} \leq C_l, n=1\dots N, l=1\dots L; \quad (1.27)$$

$$\left(\frac{\sum_{l \in L} v_{i,l}^{LS}}{\max_i v_{S_q}^{LS}} - \frac{\sum_{l \in L} v_{j,l}^{LS}}{\max_j v_{S_q}^{LS}} \right) \rightarrow 0, i=1\dots m_{n,l}^{kLS}, j=1\dots m_{n,l}^{kLS}, i \neq j, n=1\dots N, \quad (1.28)$$

при $\sum_{i \in m_{n,l}^{kLS}} v_{i,l}^{LS} \leq v_l^{LS\ rasp}$ для всех $t_n^{prLS} \cap t_q^{prPPS} \neq \emptyset, n=1\dots N, q=1\dots Q, l=1\dots L$

где $T^{ZRV} = \bigcup_{m \in M_{IP}} t_m^{ipZRV}$ – зона радиовидимости наземных радиотехнических средств

приема ТМИ из состава НИК РКН;

$m_{n,l}^{kLS tp}$ – достаточное для обеспечения непрерывности передачи ТМИ количество одновременно с коммутированных в l -й линии связи НИП на n -м участке плана задействования каналов передачи ТМИ при проведении ИТО запуска РКН;

c_l – количество комплектов каналообразующей аппаратуры центральной станции l -й линии связи;

v_l^{LSrasp} – ресурс пропускной способности l -й линии связи;

$v_{S_q}^{LS} = \sum_{s \in S_q^{LS}} \frac{f_{s,p}^{BITS}}{k_{s,q}^{prLS}} \cdot \mu_s^{SLS}$ – плотность потока телеметрических сообщений на q -м

участке плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО и при

$t_q^{prPPS} \cap t_p^{prBITS} \neq \emptyset$;

μ^{SLS} – количество разрядов сообщений телеметрических параметров РКН;

t_n^{prLS} – интервал времени действия n -го участка плана задействования каналов передачи ТМИ при проведении ИТО запуска РКН.

2. Критерии частных показателей плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО [48]:

– критерий количества телеметрических параметров РКН, выдаваемых в каналах передачи ТМИ – обеспечение максимальной полноты охвата контролем телеметрических параметров РКН при ограничении на пропускную способность каналов передачи ТМИ;

– критерий частоты выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в канал передачи ТМИ – обеспечение максимальной частоты выдачи сообщений телеметрических параметров при ограничении на пропускную способность каналов передачи ТМИ и наличии верхней границы области допустимых решений по частоте формирования выборок телеметрических параметров БИТС РКН.

В формализованном виде критерии показателей плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО можно представить следующим образом:

$$S_q^{LS} \rightarrow \sum_{b \in B} R_{b,p}^{BRTS}, q = 1 \dots Q, b = 1 \dots B, p = 1 \dots P, \text{ для всех } t_q^{prPPS} \cap t_p^{prBITS} \neq \emptyset \quad (1.29)$$

$$k_{s,q}^{prLS} \rightarrow 1, s = 1 \dots S_q^{LS}, q = 1 \dots Q; \quad (1.30)$$

$$v_{S_q}^{LS} \leq \min_{m \in n_{n,l}^{kLS}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LS}, q=1...Q, n=1...N, p=1...P, \quad (1.31)$$

для всех $(t_q^{prPPS} \cap t_n^{prLS} \neq \emptyset) \wedge (t_q^{prPPS} \cap t_p^{prBITS} \neq \emptyset)$.

Разработанная система показателей и критериев является основой для постановки задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

1.5 Постановка задачи исследования по синтезу адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения. Структурная схема решения задачи.

Вербальная постановка задачи исследования по синтезу адаптивной СИТО запусков перспективных РКН сформулирована следующим образом:

Для исследуемых зависимостей множества параметров выходов (Y) СИТО запусков РКН от множества параметров входов (R), множества постоянных во времени параметров технические средства (A^M), множества параметров состояния БИТС (P^{BRTS}, T^{BRTS}) и множества варьируемых параметров (параметры состояния НИК: $P^{PPS}, P^{LS}, T^{PPS}, T^{LS}$) в условиях различных возмущающих воздействий G , необходимо построить математические описания, обеспечивающие параметрический синтез адаптивной СИТО запусков перспективных РКН в сформированной системе показателей и критериев качества.

Математическая постановка задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН выглядит следующим образом.

Дано:

Ракета космического назначения, функционирующая в соответствии с полетным заданием.

Функционирование РКН при подготовке к пуску, пуске и в полете характеризуется телеметрическими параметрами – R .

РКН оснащена БИТС – M_{BITS} .

Для выполнения задач ИТО запуска РКН сформирован НИК – M_{NIK} .

Составные элементы СИТО запуска РКН формируют, передают и отображают потребителю информационные потоки – S .

Телеметрические параметры РКН характеризуются параметрами A^{RSP} , Π^{RSP} , A^{RFP} , Π^{RFP} , T^R .

БИТС характеризуется параметрами A^{PP} , A^{BRTS} . Режимы функционирования БИТС характеризуются параметрами Π^{BRTS} , T^{BITS} .

НИК характеризуется параметрами A^{IP} , A^{PPS} , A^{LS} , A^{COI} .

Форматы данных в потоках телеметрических сообщений характеризуются параметрами A^{SI} , A^{SLS} , A^{SPI} . Содержание потока телеметрических сообщений, формируемого БИТС, характеризуется параметрами Π^{SI} .

Возмущающие воздействия на составные элементы СИТО характеризуются параметрами G .

Формирование и выдача в линии связи информационных потоков осуществляется составными элементами СИТО запуска РКН, входящими в состав НИК, в соответствии с программой сбора ТМИ, которая характеризуется варьируемыми параметрами СИТО: Π^{LS} , T^{LS} , Π^{PPS} , T^{PPS} . Содержание информационных потоков в линиях связи характеризуется параметрами Π^{SLS} .

Необходимо определить рациональные значения варьируемых параметров и параметров выходов СИТО, описываемых следующими функциональными зависимостями:

$$\begin{aligned}
 \Pi^{LS} &= F(M_{BRTS}, A^{IP}, A^{LS}); \\
 T^{LS} &= F(T^{BITS}, A^{IP}, G); \\
 \Pi^{PPS} &= F(R, M_{BITS}, A^{SLS}, \Pi^{LS}, T^{LS}); \\
 T^{PPS} &= F(T^R, T^{BITS}, T^{LS}, G); \\
 Y &= F(R, M, G).
 \end{aligned}
 \tag{1.32}$$

В связи с тем, что объектом исследования является информационно-измерительная техническая система, функционирующая в целях обеспечения потребителей информацией, необходимой для устранения (снижения) неопределенности состояния контролируемого объекта испытаний, дальнейшие

исследования целесообразно проводить, ориентируясь на показатель «апостериорная энтропия сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО». Показатель информационной производительности СИТО, при заданных параметрах средств НИК, рассматривается в качестве ограничения по распределению ресурсов каналов передачи ТМИ.

При этом содержание потока телеметрических сообщений на выходе СИТО запусков РКН (Π^{SPI}) соответствует потоку в телеметрических линиях связи

$$S_{pi} \triangleq S_{LS}, \quad \Pi^Y \triangleq \Pi^{SPI}, \quad \Pi^{SPI} \triangleq \Pi^{SLS}. \quad (1.33)$$

Отсюда, обобщенную характеристику качества функционирования СИТО запуска РКН можно представить в виде следующей функциональной взаимосвязи:

$$Y \Rightarrow S_{LS}. \quad (1.34)$$

В этом случае функциональные зависимости искомых варьируемых параметров при принятых показателях и критерии качества функционирования СИТО принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} T^{LS} &= F(T^{BITS}, A^{IP}, G); \\ \Pi^{LS} &= F(A^{BRTS}, \Pi^{BRTS}, T^{BITS}, T^{LS}, A^{LS}); \\ T^{PPS} &= F(T^R, T^{BITS}, T^{LS}, G); \\ \Pi^{PPS} &= F(A^{RSP}, \Pi^{RSP}, A^{RFP}, \Pi^{RFP}, A^{BRTS}, \Pi^{BRTS}, T^{BITS}, T^{PPS}, A^{SLS}, \Pi^{LS}, T^{LS}) \end{aligned} \quad (1.35)$$

при

$$\begin{aligned} H^{aps}(S_{LS}) &= F(A^{RSP}, \Pi^{RSP}, A^{RFP}, \Pi^{RFP}, T^R, A^{PP}, \Pi^{PPS}, T^{PPS}, G) \rightarrow \min \\ V(S_{LS}) &\leq V_{расп}(\Pi^{LS}, T^{LS}). \end{aligned} \quad (1.36)$$

Таким образом, в принятой системе показателей и критериев качества СИТО требуется найти решение векторных функциональных зависимостей варьируемых параметров адаптивной СИТО запусков РКН

$$\begin{aligned} \mathbf{t}^{prLS} &= f(\mathbf{t}^{ipZRV}, \mathbf{g}); \\ \mathbf{m}^{kLS} &= f(\mathbf{t}^{ipZRV}, \mathbf{t}^{prLS}); \\ \mathbf{v}^{LS} &= f(\mathbf{v}^{LSрасп}, \mathbf{v}^{BRTS}, \mathbf{t}^{prBITS}, \mathbf{t}^{prLS}, \mathbf{m}^{kLS}); \end{aligned} \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{t}^{\text{prPPS}} &= f(\mathbf{t}^{\text{RSP}}, \mathbf{t}^{\text{RFP}}, \mathbf{t}^{\text{prBITS}}, \mathbf{g}); \\ \mathbf{s}^{\text{LS}} &= f(\mathbf{r}^{\text{BITS}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}, \mathbf{t}^{\text{RFP}}, \Delta^{\text{RFP}}, \mathbf{t}^{\text{prPPS}}); \\ \mathbf{k}^{\text{prLS}} &= f(\mathbf{s}^{\text{LS}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}, \mathbf{t}^{\text{RFP}}, \Delta^{\text{RFP}}, \mathbf{f}^{\text{BITS}}, \mathbf{t}^{\text{prPPS}}), \end{aligned}$$

обеспечивающее выполнение критериев обобщенных и частных показателей качества СИТО запусков РКН

$$H^{\text{aps}} = f(\mathbf{r}^{\text{BITS}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}, \mathbf{t}^{\text{RFP}}, \Delta^{\text{RFP}}, \delta^{\text{R}}, \mathbf{s}^{\text{LS}}, \mathbf{f}^{\text{BITS}}, \mathbf{k}^{\text{prLS}}, \mathbf{g}) \rightarrow \min; \quad (1.38)$$

$$T^{\text{SLS}} = T^{\text{ZRV}};$$

$$m_{n,l}^{\text{LSr}} \leq m_{n,l}^{\text{kLS}} \leq C_l, n=1\dots N, l=1\dots L;$$

$$\left(\frac{\sum_{l \in L} v_{i,l}^{\text{LS}}}{\max_i v_{S_q}^{\text{LS}}} - \frac{\sum_{l \in L} v_{j,l}^{\text{LS}}}{\max_j v_{S_q}^{\text{LS}}} \right) \rightarrow 0, i=1\dots m_{n,l}^{\text{kLS}}, j=1\dots m_{n,l}^{\text{kLS}}, i \neq j, n=1\dots N$$

для всех $t_n^{\text{prLS}} \cap t_p^{\text{prBITS}} \neq \emptyset, n=1\dots N, p=1\dots P,$

при $\left(\sum_{m \in m_{n,l}^{\text{LS}}} v_{m,l}^{\text{LS}} \leq v_l^{\text{LSraps}} \right) \wedge (v_{m,l}^{\text{LS}} = \text{const} \oplus v_{m,l}^{\text{LS}} = 0), n=1\dots N, l=1\dots L;$

$$v_{S_q}^{\text{LS}} \leq \min_{m \in m_{n,l}^{\text{kLS}}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{\text{LS}}, q=1\dots Q, n=1\dots N, p=1\dots P,$$

для всех $(t_q^{\text{prPPS}} \cap t_n^{\text{prLS}} \neq \emptyset) \wedge (t_q^{\text{prPPS}} \cap t_p^{\text{prBITS}} \neq \emptyset);$

где \mathbf{t}^{RSP} – вектор расчетных времен характерных участков телеметрических сигнальных параметров РКН;

\mathbf{t}^{RFP} – вектор расчетных времен характерных участков телеметрических функциональных параметров РКН;

Δ^{RFP} – вектор расчетных диапазонов изменения телеметрических функциональных параметров РКН на характерных участках.

Искомые математические описания исследуемого процесса параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН позволят определить рациональные параметры программы сбора ТМИ в СИТО, характеризующейся апостериорной энтропией сообщений телеметрических

параметров РКН на выходе СИТО в условиях ограничений на ресурсы пропускной способности каналов передачи ТМИ.

Структурная схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН представлена на рисунке 1.14.

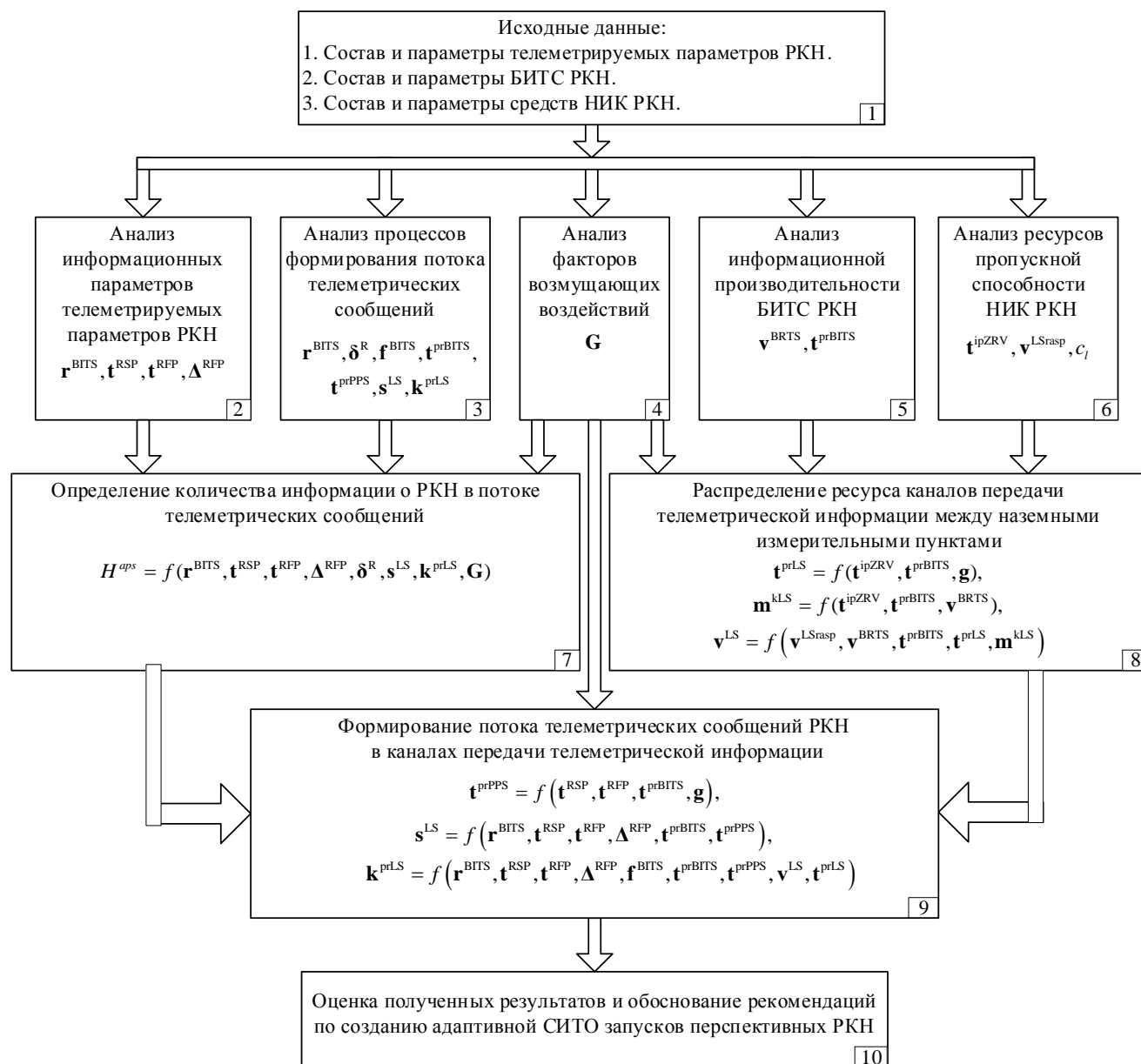


Рисунок 1.14 – Структурная схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН

Таким образом, исследование по синтезу адаптивной СИТО запусков РКН заключается в формировании и анализе исходных данных телеметрических параметров РКН, потоков телеметрических сообщений в СИТО, бортовых

и наземных технических средств СИТО, возмущающих воздействий на элементы СИТО, определении количества информации в потоке телеметрических сообщения, распределении ресурса каналов передачи ТМИ между НИП, формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, оценке полученных результатов и обосновании рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Выводы по первой главе

1. Анализ функционирования СИТО запусков РКН показывает необходимость установления соответствия потребностей специалистов по анализу ТМИ – возможностям средств сбора ТМИ. Реализованные в СИТО методы сбора ТМИ характеризуются высокой информационной избыточностью и перегрузкой каналов сбора ТМИ «холостыми» данными, что не позволяет обеспечить доставку в ЦКП РКН объема ТМИ, необходимого для оценки характеристик РН в реальном масштабе времени полета и в оперативном послеполетном режиме. Основной недостаток применяемых методов «жесткой коммутации» – выдача потребителям неизменного состава телеметрических параметров с постоянной частотой их следования в информационном потоке, что обосновывает необходимость применения адаптивных процедур при организации информационного обмена, особенно в реальном масштабе времени полета РКН.

2. Адаптивные процедуры в СИТО запусков РКН являются важнейшим фактором, обеспечивающим повышение качества функционирования как ее составных элементов, так и СИТО в целом. Анализ методических подходов к формированию адаптивных процедур в СИТО показывает преимущества метода «программной кусочно-равномерной дискретизации» для исключения (сокращения) избыточности измерительной информации при выполнении задач ИТО запуска РКН. Основными достоинствами метода являются относительная простота реализации, высокая надежность и гибкость, обеспечивающая возможность оперативного изменения потока телеметрических сообщений.

3. СИТО запуска РКН характеризуется всеми атрибутами сложной динамической системы, имеющей наиболее сложную структуру в классе систем измерений. Высокая размерность, множественность параметров СИТО, наличие между ними сложных прямых и обратных связей обосновывают необходимость системного подхода к определению рациональных значений варьируемых параметров адаптивной СИТО запусков РКН.

4. По результатам анализа обобщенных и частных показателей качества СИТО запусков РКН сформирована система показателей и обоснован критерий

качества СИТО – «обеспечение минимальной апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО при ограничении на информационную производительность СИТО по пропускной способности каналов передачи ТМИ». Разработанная система показателей и критериев качества является основой для постановки задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

5. На основе сформированной системы показателей и критериев качества сформулирована задача параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН и разработана структурная схема ее решения. Исследование по синтезу адаптивной СИТО запусков РКН заключается в формировании и анализе исходных данных телеметрических параметров РКН, потоков телеметрических сообщений в СИТО, бортовых и наземных технических средств СИТО, возмущающих воздействий на элементы СИТО, определении количества информации в потоке телеметрических сообщения, распределении ресурсов каналов передачи ТМИ между НИП, формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, оценке полученных результатов и обосновании рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПУСКОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

2.1 Выбор методов, обеспечивающих параметрический синтез адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения

Параметрический синтез адаптивной СИТО запусков РКН относится к классу задач условной многомерной минимизации при ограничениях типа неравенств. К настоящему времени разработано и исследовано большое число методов минимизации функций многих переменных.

Методы решения задач многомерной минимизации [22, 24, 63, 93, 100] многочисленны и разнообразны, при этом ни один метод или класс методов не обладает универсальностью и не позволяет с одинаковой эффективностью решать оптимизационные задачи различных типов. В частности, возможны случаи, когда вычисление значений целевой функции требует чрезмерных затрат времени и вычислительных ресурсов ЭВМ, в ряде задач не выполнимо, либо весьма затруднительно найти аналитические выражения для производных целевой функции. В итоге возникает необходимость в сопоставлении и анализе основных закладываемых принципов и способов решения конкретной прикладной задачи.

В общем случае можно выделить два подхода к решению задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН:

- аналитический;
- поисковый.

В основе аналитического подхода лежат классические методы, среди которых методы функционального анализа, вариационных исчислений и др. Аналитические методы позволяют получить наиболее полное и общее представление об исследуемом процессе параметрического синтеза, наглядно установить влияние варьируемых параметров и ограничений на целевую функцию. Однако их применение во многих случаях ограничивается характером целевой

функции и ограничений [5, 7, 23, 92]. Аналитическое представление функциональных зависимостей, описывающих основные процессы функционирования СИТО, является весьма сложным, что серьезно затрудняет отыскание совокупности стационарных точек и множества точек, где производная от целевой функции не определена. Число варьируемых параметров элементов СИТО запусков современных и перспективных РКН достигает нескольких тысяч. Высокая размерность задачи параметрического синтеза СИТО резко усложняет вычислительные процедуры, так как возникает необходимость решать систему соответствующего числа уравнений, являющихся следствием условий экстремума функции многих переменных. Наличие ограничений на область допустимых значений варьируемых параметров приводит к необходимости анализа на выполнение условий глобального минимума целевой функции не только стационарных точек (и точек, где производная не определена), но и всех крайних точек области допустимых решений. Поэтому использование аналитических методов в значительной степени утрачивает силу при переходе к реальному процессу параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН.

Поисковый подход [18, 27, 73], позволяющий решать большинство задач условной минимизации, основан на использовании итерационных процедур последовательного приближения к точке минимума целевой функции. В отличие от аналитических, поисковые методы не дают точного решения, однако позволяют получить приближенные решения оптимизационных задач большой размерности с требуемой точностью. При этом используемые в поисковых методах итерационные процедуры имеют сравнительно простую численную реализацию на ЭВМ.

Результаты анализа математических методов оптимизации [5, 7, 18, 24, 35, 63, 93, 94, 106, 119] показали целесообразность применения аппарата последовательной оптимизации для решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН. Последовательная оптимизация заключается в сведении решения исходной задачи большой размерности к последовательному решению нескольких более простых задач меньшей размерности. При этом основная идея состоит в разделении варьируемых

параметров на две группы. В одну группу объединяются параметры, для которых трудно определить аналитические описания, а в другую – параметры, аналитические описания которых сравнительно легко сформировать при фиксированных значениях параметров первой группы. Частные задачи с варьируемыми параметрами первой и второй групп решаются отдельно с проведением при необходимости координирующих расчетов, обеспечивающих связь подзадач и сходимость решения.

Решение задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН на основе подхода последовательной оптимизации заключается в последовательном решении задач поиска рациональных значений параметров: плана задействования каналов передачи ТМИ и плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО. Решение данных задач сводится к [93, 94]:

- анализу и классификации варьируемых параметров;
- построению математической модели, описывающей взаимосвязи независимых параметров, варьируемых параметров и параметров, определяющих качество функционирования СИТО;
- анализу сформированной модели и определению специфических особенностей решения задач;
- определению частных подзадач и методов поиска их решения;
- вычислению варьируемых параметров;
- оценке влияния независимых переменных (параметров возмущающих воздействий) на зависимые выходные переменные (параметры выходов СИТО).

В общем виде функциональные зависимости искомых варьируемых параметров (1.37) при применении аппарата последовательной оптимизации можно представить совокупностью следующих векторных функций:

1. Функциональные зависимости варьируемых параметров, не имеющих четкого аналитического описания:

$$\begin{aligned}
\mathbf{t}^{kLS} &= f(\mathbf{t}^{ipZRV}, \mathbf{g}); \\
\mathbf{M}^{mLS}(t) &= f(\mathbf{t}^{ipZRV}, \mathbf{t}^{kLS}, \mathbf{K}^{mLS}); \\
\mathbf{t}^{prPPS} &= f(\mathbf{t}^{RSP}, \mathbf{t}^{RFP}, \mathbf{t}^{prBITS}, \mathbf{g}); \\
\mathbf{s}^{LS}(t) &= f(\mathbf{r}^{BITS}(t), \Delta^{RFP}(t), \mathbf{t}^{RSP}, \mathbf{t}^{RFP}, \mathbf{t}^{prPPS});
\end{aligned} \tag{2.1}$$

при $T^{SLS} = T^{ZRV}$, $m_{n,l}^{LS tr} \leq m_{n,l}^{kLS} \leq c_l, n=1\dots N, l=1\dots L$;

$$s_q^{LS} \geq s_q^{tr}, s_q^{LS} \rightarrow \sum_{b \in B} r_{b,p}^{BRTS}, q=1\dots Q, b=1\dots B, p=1\dots P, \text{ для всех } t_q^{prPPS} \cap t_p^{prBITS} \neq \emptyset.$$

2. Функциональные зависимости варьируемых параметров, имеющих четкие аналитические описания:

$$\begin{aligned}
\mathbf{v}^{LS}(t) &= f(\mathbf{v}^{LSrasp}, \mathbf{s}^{LS}(t), \mu_s^{SLS}, \mathbf{f}^{BITS}(t), \mathbf{M}^{mLS}(t), \mathbf{t}^{prPPS}, \mathbf{t}^{kLS}); \\
\mathbf{k}^{prLS}(t) &= f(\mathbf{s}^{LS}(t), \Delta^{RFP}(t), \mathbf{t}^{RSP}, \mathbf{t}^{RFP}, \mathbf{f}^{BITS}(t), \mathbf{v}^{LS}(t), \mathbf{t}^{prPPS}),
\end{aligned} \tag{2.2}$$

при $H^{aps}(t) = f(\mathbf{r}^{BITS}(t), \Delta^{RFP}(t), \delta^R, \mathbf{t}^{RFP}, \mathbf{t}^{RSP}, \mathbf{s}^{LS}(t), \mathbf{f}^{BITS}(t), \mathbf{k}^{prLS}(t), \mathbf{G}) \rightarrow \min$;

$$\left(\frac{\sum_{l \in L} v_{i,l}^{LS}}{\max_i v_{S_q}^{LS}} - \frac{\sum_{l \in L} v_{j,l}^{LS}}{\max_j v_{S_q}^{LS}} \right) \rightarrow 0, i=1\dots M^{kLS}, j=1\dots M^{kLS}, i \neq j,$$

для всех $(t_q^{prPPS} \cap t_m^{kLS} \neq \emptyset) \wedge (t_q^{prPPS} \cap t_p^{prBITS} \neq \emptyset), q=1\dots Q, p=1\dots P, m=1\dots M^{kLS}$;

$$\left(\sum_{m \in m_{n,l}^{LS}} v_{m,l}^{LS} \leq v_l^{LSrasp} \right) \wedge (v_{m,l}^{LS} = const \oplus v_{m,l}^{LS} = 0), n=1\dots N, l=1\dots L;$$

$$k_{s,q}^{prLS} \geq 1, k_{s,q}^{prLS} \rightarrow 1, q=1\dots Q, s=1\dots S_q^{LS};$$

$$v_{S_q}^{LS} \leq \min_{m \in M_{IP}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LS}, q=1\dots Q, \text{ для всех } t_q^{prPPS} \cap t_m^{kLS} \neq \emptyset,$$

где \mathbf{t}^{kLS} – времена коммутации НИП в линии связи;

\mathbf{K}^{mLS} – матрица признаков возможности коммутации НИП в телеметрические линии связи ($k_{i,j}^{mLS} = 0$ – отсутствует возможность коммутации i -го НИП в j -ю телеметрическую линию связи, $k_{i,j}^{mLS} = 1$ – имеется возможность коммутации i -го НИП в j -ю телеметрическую линию связи);

\mathbf{M}^{mLS} – матрица признаков коммутации НИП в телеметрических линиях связи ($m_{i,j}^{mLS} = 0$ – i -й НИП не коммутирован в j -ю телеметрическую линию связи, $m_{i,j}^{mLS} = 1$ – i -й НИП коммутирован в j -ю телеметрическую линию связи);

s_q^{tr} – требуемый минимальный состав телеметрических параметров, необходимых для оценивания бортовых систем РКН на время действия q -го участка плана формирования потока телеметрических сообщений СИТО.

Таким образом, для решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН целесообразно сформировать методику последовательного поиска рациональных значений шести групп варьируемых параметров элементов СИТО на основе аппарата последовательной оптимизации. Такая методика позволит найти значения искомых параметров и послужит основой для интерпретации и практического использования результата.

К настоящему времени опубликовано значительное число работ, в которых последовательная оптимизация применяется для построения работоспособного методического аппарата параметрического синтеза сложных технических систем. Наряду с работами, содержащими положительный опыт применения последовательной оптимизации, отмечались случаи, когда достичь желаемого результата не удавалось. Основная причина неудач заключается в неполном анализе данных, необходимых для учета специфических особенностей задачи.

Эти обстоятельства весьма существенны, и их нельзя игнорировать без риска получить отрицательный результат. К ним относятся:

- высокая размерность задачи;
- неоднородный характер изменения независимых параметров входов и элементов СИТО во времени;
- различные типы варьируемых параметров СИТО;
- вид и характеристики целевой функции и ограничений;
- воздействие случайных возмущающих факторов и др.

Многообразие и разнородный характер перечисленных особенностей требует разработки специальных мер, обеспечивающих работоспособность методического аппарата последовательной оптимизации.

В связи с этим весьма ответственным этапом параметрического синтеза является анализ целевых функций и ограничений для выявления специфических особенностей подзадач, которые оказывают существенное влияние на процесс их решения, это: неразрывность и дифференцируемость целевой функции, вид ограничений, ограниченность области допустимых решений и значений целевой функции, возможность существования неединственных решений, существование допустимого решения [63, 74, 94, 106]. Данные характеристики определяют вид используемой информации при определении начальной допустимой точки, направлений, шага и условия останова поиска рациональных значений варьируемых параметров, то есть определяют частный метод решения подзадачи. Применение поискового подхода при решении задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН не исключает использование аналитических методов в качестве частных при решении подзадач.

Необходимо отметить, что аппарат последовательной оптимизации построен в предположении, что решения подзадач оптимальны относительно предшествующих. Однако в реальных условиях оптимальные результаты решения подзадач не всегда приводят к желаемому решению исходной задачи. Это обусловлено наличием методических погрешностей вычислений, связанных с допущениями в модели реальной системы, приближенным характером решения поисковыми методами, а также аппаратно-программными погрешностями вычислительных процедур на ЭВМ. Практически это проявляется в возрастании погрешности вычисления при решении каждой последующей подзадачи.

В общем случае, приращение погрешности вычислений может быть столь значительным, что может привести к нарушению сходимости решения задачи, либо решение теряет практический смысл. Поэтому важно проводить оценку результатов решения подзадач с целью определения необходимости уточнения

целевой функции, области допустимых решений и значений варьируемых параметров с последующим проведением координирующих расчетов.

Все это приводит к необходимости разработки соответствующих прикладных методических подходов, совокупности специальных процедур, обеспечивающих корректность применения аппарата последовательной оптимизации для разработки комплексной методики параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН и реализуемого на ее основе поиска рациональных значений параметров программы сбора ТМИ.

Таким образом, анализ методов решения задач многомерной условной минимизации показывает, что для решения поставленной задачи необходимо использовать математический аппарат последовательной оптимизации. Суть данного метода заключается в декомпозиции исходной оптимизационной задачи на подзадачи меньшей размерности. Решение поставленной задачи получается в результате решения последовательности подзадач. При этом необходимо учитывать обстоятельства, вызывающие нарушения сходимости и адекватности решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН.

2.2 Методические основы модели функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения

Под функционированием СИТО запусков РКН понимается совокупность процессов формирования, передачи и использования ТМИ, реализуемых в ходе выполнения задач ИТО на различных этапах запуска РКН. Проведение ИТО планируется, исходя из баллистической схемы полета РКН при выведении КА на орбиту, типа пускаемой РКН и ее оснащением БИТС. Безусловно, реальное проведение ИТО при каждом конкретном запуске РКН имеет свои специфические особенности. Вместе с тем, можно выделить ряд общих элементов ИТО запусков РКН [46, 50].

Содержание ИТО запусков РКН представляет собой совокупность согласованных информационных процессов, выполняемых бортовыми и наземными средствами СИТО, основные из которых представлены на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Основные информационные процессы СИТО запусков РКН

Основным методом исследований функционирования сложных систем является математическое моделирование [65, 90, 99, 122]. Замена выше представленных реальных процессов ИТО запусков РКН соответствующими моделями и вычислительными экспериментами с ними на ЭВМ позволяет проводить исследования процессов функционирования СИТО запусков РКН. При этом, руководствуясь принципом приближенного подобия, учету (отображению) при моделировании процессов ИТО запуска РКН подлежат только те условия, процессы и объекты, которые оказывают существенное влияние на его результат.

При исследованиях сложных систем, к категории которых относится СИТО запусков РКН, описание процессов их функционирования одной моделью является практически неразрешимой задачей. В связи с чем при моделировании

функционирования СИТО применяется принцип декомпозиции, в соответствии с которым СИТО запусков РКН условно разделена на отдельные более простые функциональные элементы, допускающие их независимые исследования с учетом взаимовлияния данных элементов. При данном подходе математическая модель функционирования СИТО строится в виде иерархической структуры взаимосвязанных элементов [46, 65]. Методологический подход к исследованию информационных систем предполагает наличие следующих элементов [38, 46, 58, 95, 97, 102]: источника информации, потребителя информации и канала передачи информации.

Для учета изменения параметров элементов СИТО запусков РКН во времени в модели применяется дискретное представление динамики процессов ИТО, в соответствии с которым значения параметров элементов СИТО изменяются при наступлении соответствующих событий или в определенные моменты времени [46].

В настоящее время имеется ряд моделей отдельных составных элементов СИТО [10, 29, 30, 46, 61, 103, 109, 117]. Данные модели состоят из специального математического и программного обеспечения и базы данных. Отдельные блоки этих моделей используются в интересах проведения исследований в настоящей работе. Основным предназначением данной модели является получение количественных оценок, необходимых для решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН и оценивания результатов ее решения через установление зависимостей влияния варьируемых параметров системы на результат ИТО запуска РКН [46].

Анализ процессов целевого функционирования СИТО показал целесообразность представления ее модели в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 2.2.

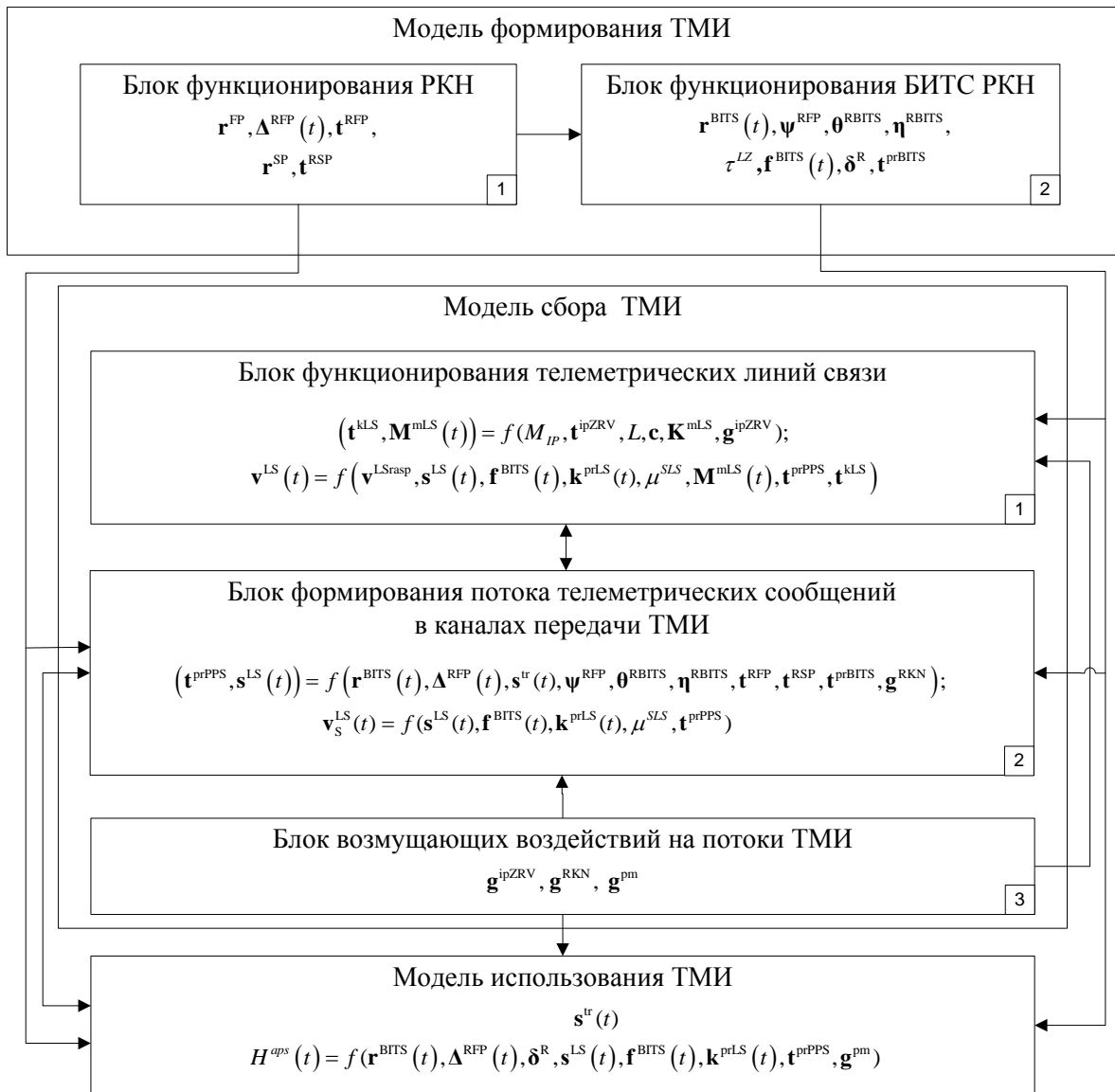


Рисунок 2.2 – Структурная схема модели функционирования СИТО запусков РКН

В соответствии с принятой методологией, динамическая модель функционирования СИТО запусков РКН включает:

- модель формирования ТМИ;
- модель сбора ТМИ;
- модель использования ТМИ.

В модели формирования ТМИ РКН, как источник информации, рассматривается с двух позиций: как материальный и информационный объект. Как материальный объект, РКН функционирует при пуске и в полете, изменяя свое состояние в соответствии с заложенным полетным заданием независимо от того,

формируются ТМИ или нет. Как информационный объект, РКН посредством БРТС формирует и передает сообщения телеметрических параметров, характеризующих состояние РКН в целом и ее бортовых систем в частности [46].

Модель формирования ТМИ состоит из следующих элементов:

- блок функционирования РКН;
- блок функционирования БИТС РКН.

Первый блок описывает РКН как материальный объект, который представлен в модели потоками сообщений телеметрических параметров РКН. Изменения переменных во времени параметров телеметрических параметров РКН происходят при наступлении определенных событий циклограммы полета РКН и функционирования ее бортовых систем [46].

Второй блок описывает процессы формирования сообщений телеметрических параметров на борту РКН, которые представлены в модели параметрами БИТС, включая:

- ψ^{RFP} – вектор признаков вида измерений функциональных телеметрических параметров: косвенные или прямые;
- θ^{RBITS} – вектор признаков вида телеметрического сообщения: сообщение цифровых абонентов согласующих устройств с бортовой цифровой вычислительной машиной (БЦВМ) и навигационной аппаратурой потребителя (НАП, либо аппаратурой спутниковой навигации (АСН)) или сообщение первичного преобразователя;
- η^{RBITS} – вектор признаков наличия дублирования передачи сообщений телеметрических параметров из БЗУ и (или) через линию задержки (ЛЗ) статического кольцевого запоминающего устройства (СКЗУ);
- τ^{LZ} – смещение времени выдачи телеметрических сообщений через ЛЗ СКЗУ.

Изменение во времени переменных параметров БИТС происходит при наступлении событий, связанных с разделением основных элементов конструкции РКН, а для программируемых БРТС – и при смене программы измерений [46].

Результаты моделирования динамических процессов формирования ТМИ, являются входными данными моделей сбора и использования ТМИ [46]. Данная модель позволяет описывать процесс формирования ТМИ как при моделировании штатного полета РКН, так и при имитации возникновения и развития различных нештатных (аварийных) процессов на борту РКН.

Модель сбора ТМИ описывает процессы передачи ТМИ от НИП в ЦКП РКН по телеметрическим линиям связи. Исходные данные модели включают постоянные во времени параметры средств НИК РКН и параметры форматов телеметрических сообщений, а именно: состав задействованных телеметрических линий связи, количество комплектов каналообразующей аппаратуры в линиях связи и их располагаемые пропускные способности, состав НИП, времена их зон радиовидимости и интервалы ухудшения условий приема радиотелеметрического сигнала, матрица признаков возможности коммутации НИП в телеметрические линии связи \mathbf{K}^{mLS} [46].

Модель сбора ТМИ состоит из следующих элементов [46]:

- блок функционирования телеметрических линий связи;
- блок формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ;
- блок возмущающих воздействий на потоки ТМИ.

Первый блок содержит математические описания процессов распределения ресурса пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП. Процессы функционирования телеметрических линий связи представлены параметрами плана задействования каналов передачи ТМИ. Блок содержит две дискретные функциональные зависимости [46]:

- зависимость параметров коммутации НИП в линии связи от параметров средств НИК РКН;
- зависимость пропускной способности каналов передачи ТМИ от параметров входов СИТО, коммутации НИП в линии связи, располагаемой пропускной способности линий связи, состава потока телеметрических сообщений и форматов их передачи.

Второй блок описывает процессы формирования и передачи группового потока телеметрических сообщений, представленных в модели параметрами плана формирования потока телеметрических сообщений. Блок содержит две дискретные функциональные зависимости [46]:

- зависимость параметров группового потока телеметрических сообщений от параметров входов, требований к минимальному составу сообщений телеметрических параметров в групповом потоке, интервалов ухудшений условий передачи радиотелеметрического сигнала с РКН;

- зависимость плотности группового потока телеметрических сообщений от параметров плана формирования потока телеметрических сообщений и форматов передачи телеметрических сообщений.

Первые два блока модели сбора ТМИ используются в поисковых процедурах последовательной многомерной оптимизации, проводимых при решении задачи параметрического синтеза СИТО запусков РКН. Второй блок, кроме того, используется при проведении координирующих расчетов.

Третий блок описывает прогнозируемые и случайные возмущающие воздействия на потоки телеметрических сообщений, которые используются в модели для учета прогнозируемых искажений ТМИ при проведении оптимизационных процедур и при оценке влияния случайных возмущений на результат решения исходной задачи. Возмущающие воздействия представлены в модели параметрами искажений ТМИ:

- $\mathbf{g}^{\text{ipZRV}}$ – вектор интервалов времени прогнозируемых искажений ТМИ, обусловленных плохими условиями приема радиосигнала в зонах радиовидимости НИП;

- \mathbf{g}^{RKN} – вектор интервалов времени прогнозируемых искажений ТМИ, обусловленных плохими условиями излучения радиосигнала при проведении динамических операций отделения составных частей РКН;

– \mathbf{g}^{pm} – вектор интервалов времени искажений ТМИ, обусловленных воздействием преднамеренных или непреднамеренных помех, имеющих случайный характер.

Модель использования ТМИ описывает влияние варьируемых параметров и параметров входов СИТО запусков РКН на параметры, характеризующие степень достижения цели ее функционирования. Данная модель служит основой для проведения поисковых процедур заключительного этапа последовательной оптимизации при расчетах коэффициентов прореживания телеметрических сообщений, а также расчетов по оценке влияния случайных возмущающих воздействий на результат решения задачи параметрического синтеза и оценки влияния адаптивных процедур на качество функционирования СИТО запусков РКН. Кроме того, модель использования ТМИ задает требования по минимальному составу телеметрических параметров в потоке сообщений для различных участков функционирования РКН [46].

При проведении вычислительных экспериментов модель функционирования СИТО конкретизируется путем задания расчетных параметров РКН, наземных и бортовых средств СИТО. Для обеспечения адекватности модели в соответствующих функциональных зависимостях учтены все наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на результат информационного обеспечения пуска и полета РКН [46].

Модульная архитектура модели функционирования СИТО запусков РКН обеспечивает необходимую взаимосвязь модулей (по входным и выходным данным) при их объединении в вычислительные схемы моделирования основных процессов ИТО, а также достаточную автономность модулей при проведении вычислительных экспериментов и при реализации поисковых процедур и расчетов параметрического синтеза. Структурная схема разработанной математической модели ориентирована на ее применение в оптимизационном и оценочном вариантах [46].

Таким образом, математическая модель функционирования СИТО запусков РКН представляет собой иерархическую структуру, включающую три модели:

формирования ТМИ, сбора ТМИ и использования ТМИ. В основу модели функционирования СИТО положены дискретные математические описания динамических процессов формирования, сбора и использования ТМИ РКН.

Структурная схема предложенной математической модели является основой методической схемы параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН и позволяет получать результаты для формирования рациональных программ сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН.

2.3 Методическая схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения

Методический подход к параметрическому синтезу адаптивной СИТО запусков перспективных РКН представляет многоуровневую иерархическую систему решения поставленной задачи и включает ряд этапов.

Основным содержанием первого этапа является [47]:

- анализ телеметрических параметров РКН, характера изменений их значений на основных участках функционирования РКН при подготовке к пуску, пуске и в полете, процессов формирования ТМИ;
- анализ информационных процессов формирования и передачи потока телеметрических сообщений в основных элементах СИТО запусков РКН;
- анализ воздействия возмущающих факторов на поток телеметрических сообщений в основных элементах СИТО;
- формирование системы исходных данных, необходимых для решения поставленной задачи.

На втором этапе с использованием частных методик проводится решение подзадач поиска рациональных значений параметров плана задействования каналов передачи ТМИ и плана формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ.

На третьем заключительном этапе реализации методического аппарата проводится оценка результатов численных расчетов по определению

рациональных значений варьируемых параметров СИТО запусков РКН. Указанные результаты служат основой для обоснования рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Сложность решения задачи параметрического синтеза обуславливает применение принципа декомпозиции, в соответствии с которым исходная задача разбивается на последовательность частных, решаемых с использованием различных методик.

Декомпозиция производится по иерархическому принципу в соответствии со структурой СИТО, определяемой, во-первых, составом и режимами функционирования технических средств БИТС и НИК РКН, во-вторых, составом и характером изменений значений телеметрических параметров на основных этапах функционирования РКН. Она ориентируется в этом случае на последовательный поиск рациональных значений параметров программы сбора ТМИ в СИТО запусков РКН как для штатного функционирования РКН, так и для возможных вариантов возникновения и развития нештатных или аварийных ситуаций на борту РКН [47].

Методическое обеспечение верхнего уровня описывает влияние варьируемых параметров на степень достижения цели ИТО подготовки к пуску, пуска и полета РКН через соответствующие обобщенные показатели. Методическое обеспечение более низкого уровня ориентировано на обеспечение качественного выполнения информационных операций в элементах СИТО.

Результаты исследования являются основой для последующего обоснования рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН. Методическая схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН представлена на рисунке 2.3.

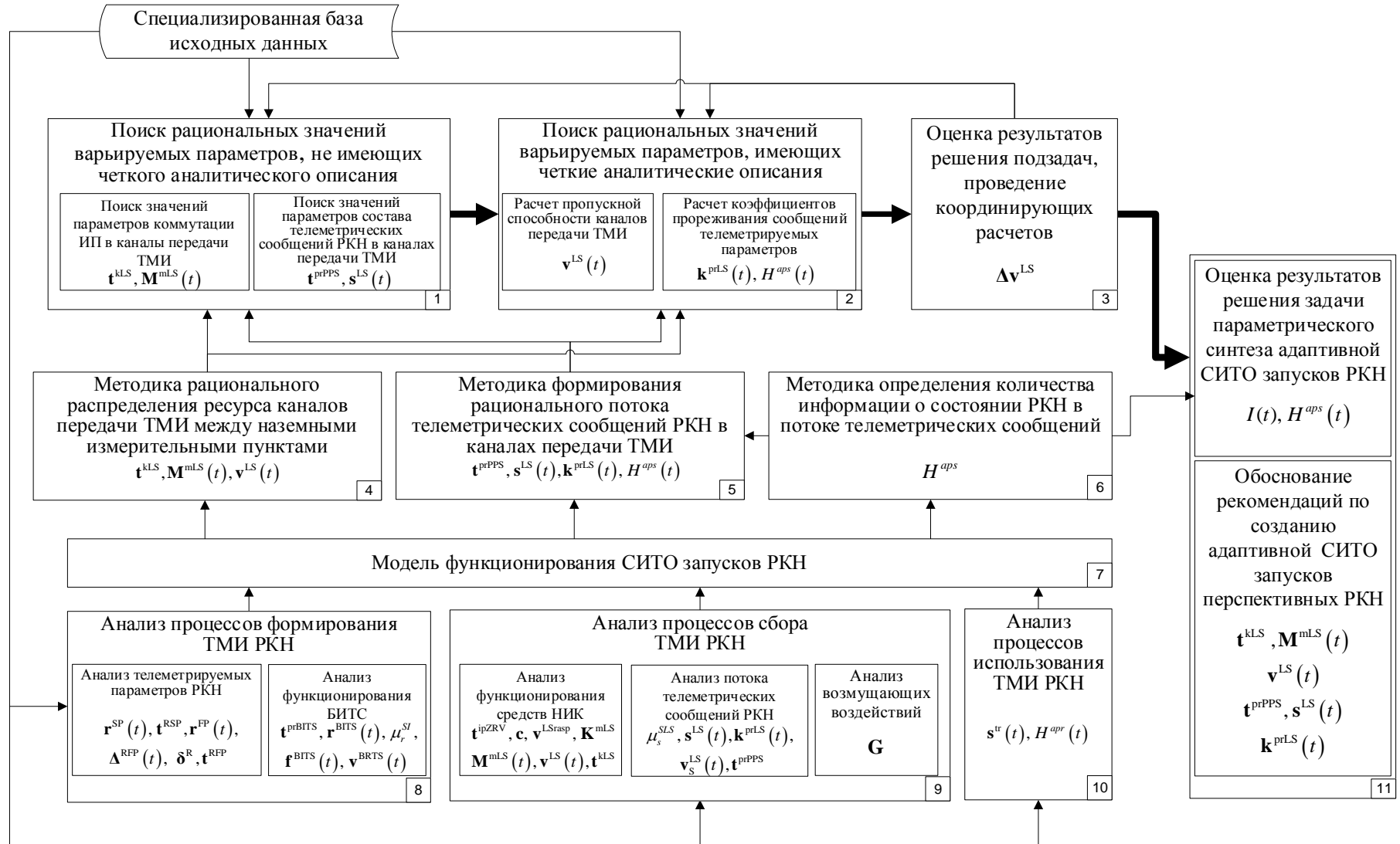


Рисунок 2.3 – Методическая схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения

Приведенная схема методического подхода является обобщенной, она детализируется и наполняется конкретным содержанием отдельно для задач поиска рациональных значений параметров плана задействования каналов передачи ТМИ и плана формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ.

Методическая схема параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН основывается на структурной схеме модели функционирования СИТО запусков РКН и учитывает количество и качество ТМИ о состоянии РКН, которая может быть получена в ходе ИТО, динамику работы бортовых систем РКН на различных этапах запуска, качественный и количественный состав бортовых и наземных технических средств СИТО, пространственно-временную динамику ИТО пуска и полета, а также прогнозируемые возмущающие воздействия на потоки ТМИ в основных элементах СИТО [46, 47].

Информация о функционировании РКН представлена телеметрическими параметрами РКН для реализованных в БИТС программ телеметрических измерений, способами формирования и форматами передачи сообщений телеметрических параметров в структуре телеметрического кадра, их основными информационными параметрами и диагностической ценностью для оценивания технического состояния РКН на этапах пуска и полета.

Динамика функционирования РКН на этапах пуска и полета учитывается через расчетную циклограмму выполнения динамических операций на борту РКН, которая определяет времена характерных участков и диапазоны изменения значений телеметрических параметров РКН, а также смену программ телеизмерений БИТС РКН.

Технические средства СИТО представлены числом и типом бортовых и наземных средств измерений, приема и передачи ТМИ, вектором их основных информационных параметров. Также в методике учитывается возможность коммутации НПС НИП в телеметрические линии связи. Пространственно-временная динамика ИТО учитывает изменение состава и информационных параметров потока ТМИ РКН во времени и времена зон радиовидимости НИП.

Прогнозируемые возмущающие воздействия характеризуются временными интервалами ухудшения условий радиосвязи БИТС РКН и НПСР НИК, связанных с низким «углом места» антенных систем в начале и окончании зоны радиовидимости НИП, а также динамическими процессами разделения отработавших ступеней и сброса отделяемых частей РКН [47].

Среди отмеченных блоков и этапов методической схемы параметрического синтеза важное место занимают следующие вычислительные процедуры [47]:

- процедура поиска рациональных значений варьируемых параметров, не имеющих четкого аналитического описания;
- процедура поиска рациональных значений варьируемых параметров, имеющих четкое аналитическое описание;
- процедура оценки результатов решения подзадач, проведения координирующих расчетов и формирования программы функционирования СИТО запусков РКН.

Процедура поиска рациональных значений варьируемых параметров, не имеющих четкого аналитического описания, включает два исполняемых блока, реализующих поисковые процедуры соответствующей группы варьируемых параметров [48]:

- блок поиска рациональных значений параметров коммутации НИП в каналы передачи ТМИ;
- блок поиска рациональных значений параметров состава потока сообщений телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ.

Блок поиска рациональных значений параметров коммутации НИП в каналы передачи ТМИ реализует процедуры поиска значений варьируемых параметров СИТО, обеспечивающих выполнение критериев непрерывности доставки ТМИ в ЦКП РКН. Поиск рациональных значений осуществляется для каждой линии связи на основе данных о возможности коммутации НИП, количестве комплектов каналобразующей аппаратуры в линиях связи и времен зон радиовидимости НИП. В результате поисковых процедур определяются временные интервалы t^{prLS} и состав коммутированных НИП в многоканальных

телеметрических линиях связи $\mathbf{M}^{mLS}(t)$, которые определяют график коммутации НИП в каналах передачи ТМИ. График коммутации представляется в виде ленточных графиков для каждой телеметрической линии связи, где в качестве оборудования выступают комплекты каналообразующей аппаратуры, а в качестве работ – коммутированные в каналы передачи ТМИ НИП. При этом график коммутации может быть уточнен при проведении координирующих расчетов по результатам оценки результатов расчетов по распределению ресурсов пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи [47].

Блок поиска рациональных значений параметров состава телеметрических сообщений РКН в каналы передачи ТМИ реализует процедуры поиска значений варьируемых параметров СИТО, обеспечивающих выполнение критерия полноты охвата контролем телеметрических параметров РКН. При поиске используются следующие исходные данные: времена характерных участков и динамика изменения телеметрических параметров РКН на участках, способы формирования телеметрических сообщений, интервалы действия программ телеизмерений БИТС РКН и требования по контролю телеметрических параметров РКН. При проведении поисковых процедур план формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ представляется в виде ленточного графика, где в качестве работ выбираются характерные участки изменения телеметрических параметров РКН. В результате поисковых процедур определяются временные интервалы программ формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ t^{prPPS} и состав сообщений телеметрических параметров РКН, выдаваемых в каналы передачи ТМИ для всех характерных участков изменения телеметрических параметров РКН $s^{LS}(t)$. При этом состав сообщений телеметрических параметров может быть уточнен при проведении координирующих расчетов [47].

Полученные в результате поисковых процедур значения варьируемых параметров являются исходными данными для расчетов по распределению ресурсов пропускной способности телеметрических линий связи и определению параметров сжатия потока телеметрических сообщений.

Процедура поиска рациональных значений варьируемых параметров, имеющих четкое аналитическое описание, представляет собой комплекс модулей, реализующих алгоритмы расчетов пропускной способности каналов передачи ТМИ и коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН. Процедура реализуется последовательным исполнением двух расчетных блоков:

- блок расчета пропускной способности каналов передачи ТМИ;
- блок расчета коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров.

В основу расчетов пропускной способности каналов передачи ТМИ положено описание процессов передачи ТМИ РКН от НИП в ЦКП по телеметрическим линиям связи. Расчеты предполагают решение задачи распределения ограниченного ресурса пропускной способности телеметрических линий связи v^{LSrasp} между каналами передачи ТМИ с НИП пропорционально плотности потока телеметрических сообщений и последующей оценкой загрузки каналов передачи ТМИ потоком телеметрических сообщений. При решении отмеченной задачи используется частная методика рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП [47].

Решение задачи проводится в две итерации.

Вначале проводятся расчеты пропускной способности каналов передачи ТМИ исходя из частот опроса БРТС телеметрических параметров РКН, транслируемых в линии связи. То есть определяется начальное решение.

На следующей итерации, по результатам расчетов коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН, проводятся расчеты по уточнению распределения пропускной способности телеметрических линий связи между НИП. При проведении уточняющих расчетов используются частоты выдачи телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ.

Полученные в результате расчетов значения пропускной способности каналов передачи ТМИ $v^{LS}(t)$ являются ограничивающим фактором при

последующих расчетах рациональных значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН.

Расчеты значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН в каналах передачи ТМИ являются заключительным этапом параметрического синтеза и направлены на выполнение интегральных (обобщенных) критериев качества функционирования адаптивной СИТО запусков РКН. При решении задачи используется частная методика формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ. Содержанием расчетов является поиск вектора рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$), обеспечивающих минимизацию апостериорной энтропии потока телеметрических сообщений РКН на выходе СИТО ($H^{\text{aps}}(t)$) при наличии ограничений по пропускной способности каналов передачи ТМИ ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$) [47, 48]. При этом для определения апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН в ходе проведения поисковых процедур используется частная методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений. Отмеченные поисковые процедуры проводятся для всех характерных участков изменения телеметрических параметров РКН, представленных в плане формирования потока телеметрических сообщений, и повторяются после проведения уточняющих расчетов по распределению ресурса пропускной способности телеметрических линий связи между НИП.

В результате повторения алгоритма по изложенной схеме определяются рациональные значения параметров распределения ресурсов пропускной способности телеметрических линий связи между НИП и параметров сжатия потоков сообщений телеметрических параметров РКН при фиксированных значениях параметров коммутации НИП в телеметрических линиях связи и параметров состава телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ.

Процедура координирующих расчетов направлена на согласование процедур поиска рациональных значений групп варьируемых параметров и обеспечение

сходимости решения исходной задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН. Основной целью координирующих расчетов является установление соответствия пропускной способности каналов передачи ТМИ плотности потока телеметрических сообщений. Расчеты заключаются в вычислении ресурсов пропускной способности каналов передачи ТМИ, не используемых под передачу телеметрических сообщений. Не используемый ресурс телеметрических линий связи вычисляется для всех коммутаций НИП в каналы передачи ТМИ по формуле

$$\Delta v_l^{LS} = v_l^{LSrasp} - \max_{q \in Q} \sum_{m \in M_l^{mLS}} v_{S_q, m}^{LS}, q = 1 \dots Q, \text{ при } (t_q^{prPPS} \cap t_m^{prLS} \neq \emptyset), \quad (2.3)$$

где: Δv_l^{LS} – величина неиспользуемого ресурса l -й телеметрической линии связи в каналах передачи ТМИ с НИП [47].

На основе рассчитанных величин проводится уточнение параметров коммутации НИП в каналах передачи ТМИ и состава сообщений телеметрических параметров. После чего повторяются расчеты по распределению ресурса пропускной способности телеметрических линий связи и определению параметров сжатия потока телеметрических сообщений.

В результате повторения отдельных реализаций поисковых процедур по такой схеме и анализа альтернативных вариантов определяются рациональные значения варьируемых параметров СИТО запусков РКН.

Необходимо отметить, что структура специализированной базы исходных данных, принимаемая при формировании информационного обеспечения исследования по параметрическому синтезу адаптивной СИТО запусков РКН, в силу многомерности исходной задачи и разноплановости решаемых подзадач должна обеспечивать следующее одновременное сочетание преимуществ технологий информационного обеспечения:

- синтез структуры исходных данных по концепции «от решаемых задач»;
- синтез структуры исходных данных по концепции «от предметной области».

Основными требованиями, предъявляемыми к специализированным базам исходных данных поставленной задачи, являются:

- целесообразное удовлетворение информационных потребностей систем обработки данных;
- избыточность данных;
- адаптивность информации к различным типам РКН и вариантам баллистической схемы выведения полезной нагрузки;
- раздельное хранение условно постоянных и переменных данных.

Наличие специализированной базы исходных данных позволяет использовать ее возможности в интересах спектра прикладных задач, среди которых – формирование планов задействования каналов передачи ТМИ при проведении ИТО запусков РКН, определение телеметрических параметров РКН, имеющих наибольшую диагностическую ценность при проведении оперативного анализа лётно-технических характеристик РКН, определение рациональных программ сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН.

Таким образом, разработанная методическая схема позволяет создать методический аппарат параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, состоящий из трех методик [47, 48]:

- определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений;
- рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП;
- формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ.

Реализация методической схемы предполагает оценку результатов решения задачи параметрического синтеза и формирование предложений по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Выводы по второй главе

1. Анализ методов решения задач многомерной условной минимизации показывает, что для решения поставленной задачи необходимо использовать математический аппарат последовательной оптимизации. Суть данного метода заключается в декомпозиции исходной оптимизационной задачи на подзадачи меньшей размерности. Решение поставленной задачи получается в результате решения последовательности подзадач. При этом необходимо учитывать обстоятельства, вызывающие нарушения сходимости и адекватности решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН.

2. Математическая модель функционирования СИТО запусков РКН представляет собой иерархическую структуру, включающую три модели: формирования ТМИ, сбора ТМИ и использования ТМИ. В основу модели функционирования СИТО положены дискретные математические описания динамических процессов формирования, сбора и использования ТМИ РКН. Предложенная модель позволяет получать результаты для формирования рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН.

3. Разработанная методическая схема решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН реализует математический аппарат последовательной оптимизации через разработку трех методик: определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений, рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП, формирования рационального потока телеметрических сообщений о состоянии РКН в каналах передачи ТМИ.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПУСКОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

3.1 Методика определения количества информации о состоянии ракеты космического назначения в потоке телеметрических сообщений

Методика предназначена для оценки влияния варьируемых параметров и параметров входов СИТО на степень достижения цели ИТО пуска и полета РКН, через определение значений показателей количества информации. Данная методика используется на заключительном этапе параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН при проведении расчетов рациональных значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН в групповом потоке, а также в ходе проведения расчетов при оценивании результатов решения задачи параметрического синтеза [47, 55].

В основу методики определения количества информации положены концепция «интервальных» гипотез средств контроля и измерений и математический аппарат энтропии дискретных случайных процессов и событий [55, 91, 96, 117]. В обосновании данного подхода лежит дискретное представление сигналов телеметрируемых событий и процессов как по величине, так и по времени, а также то обстоятельство, что значения телеметрических параметров находятся в пределах интервалов, установленных измерительной шкалой БРТС [55].

Следует подчеркнуть, что количество информации, содержащейся в потоке телеметрических сообщений зависит от степени детализации контролируемого процесса. При этом выбор элементарного (наименьшего различимого) интервала определяется, исходя из тактико-технических характеристик БРТС и условий проведения измерений. В настоящей методике в качестве элементарных интервалов приняты: по шкале времени – длительность канального интервала БРТС и цена уровня квантования (величина младшего разряда) по шкале значений телеметрических параметров РКН [29, 55, 91].

В имеющихся трудах в области телеметрии рассматриваются следующие показатели количества информации в потоках телеметрических данных на выходе СИТО [38, 47, 55, 91, 103, 117]:

- апостериорная энтропия телеметрических сообщений (H_{aps});
- количество информации, содержащейся в телеметрических сообщениях (I);
- коэффициент информативности телеметрических сообщений, определяемый как отношение количества информации, содержащейся в телеметрических сообщениях, к объему данных на интервале контроля $J = I / (v_s^{LS} \cdot t_K)$, где t_K – длительность интервала времени контроля значений и характера изменения телеметрических параметров.

В методике вводится новый частный показатель количества информации – коэффициент потери информации, определяемый как отношение значения апостериорной энтропии потока телеметрических сообщений на выходе СИТО к значению апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН на выходе БИТС $K_H^{LS} = H_{aps} / H_{aps}^{BITS}$, где H_{aps}^{BITS} – апостериорная энтропия сообщений телеметрических параметров РКН на выходе БИТС [55]. Данный показатель характеризует качество реализации процессов сокращения информационной избыточности телеметрических данных при их сборе в ЦКП РКН по каналам передачи ТМИ

Принятые в методике показатели количества информации рассчитываются как для потоков сообщений отдельных телеметрических параметров, так и для группового потока телеметрических сообщений.

Основными исходными данными, которые используются в методике, являются параметры процесса формирования ТМИ РКН, параметры телеметрических параметров РКН, параметры потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, среди которых:

параметры процесса формирования ТМИ РКН:

- состав телеметрических параметров РКН (\mathbf{r}^{BITS});

- частоты опроса телеметрических параметров РКН (f^{BITS});
- аппаратные погрешности измерений функциональных параметров (δ^R);
параметры телеметрических параметров РКН:
- расчетные диапазоны изменения функциональных параметров (Δ^{RFP});
- расчетные длительности переходных процессов функциональных параметров (τ^{RFP});
- расчетные диапазоны срабатывания сигнальных параметров (t^{RSP});
параметры потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ:
- состав телеметрических сообщений в потоке (s^{LS});
- коэффициенты прореживания сообщений телеметрических параметров (k^{pLS}).

Структурная схема методики определения количества информации в потоке телеметрических сообщений представлена на рисунке 3.1.

Блок 1 предназначен для формирования области исходных данных – состав и параметры потоков телеметрических сообщений от БИТС РКН и в каналах передачи ТМИ (S_I, S_{LS}), а также параметры телеметрических параметров РКН (R).

В блоках 2, 3, 4 определяются показатели количества информации сообщений телеметрических параметров соответствующих групп в потоке телеметрических сообщений. Выходные результаты блоков используются в блоке 5 при расчетах показателей количества информации в потоке ТМИ.

В блоке 2 проводятся расчеты по определению значений показателей количества информации, содержащейся в сообщениях сигнальных параметров.

Сигнальные параметры несут информацию о дискретных событиях: включения и выключения элементов аппаратуры, срабатывания клапанов и пироустройств, формирование и исполнение команд управления, и т.п. При этом передаются только факты наступления событий без их количественных характеристик, а потребителя интересуют направления и времена срабатываний сигнальных параметров [44, 103, 116].

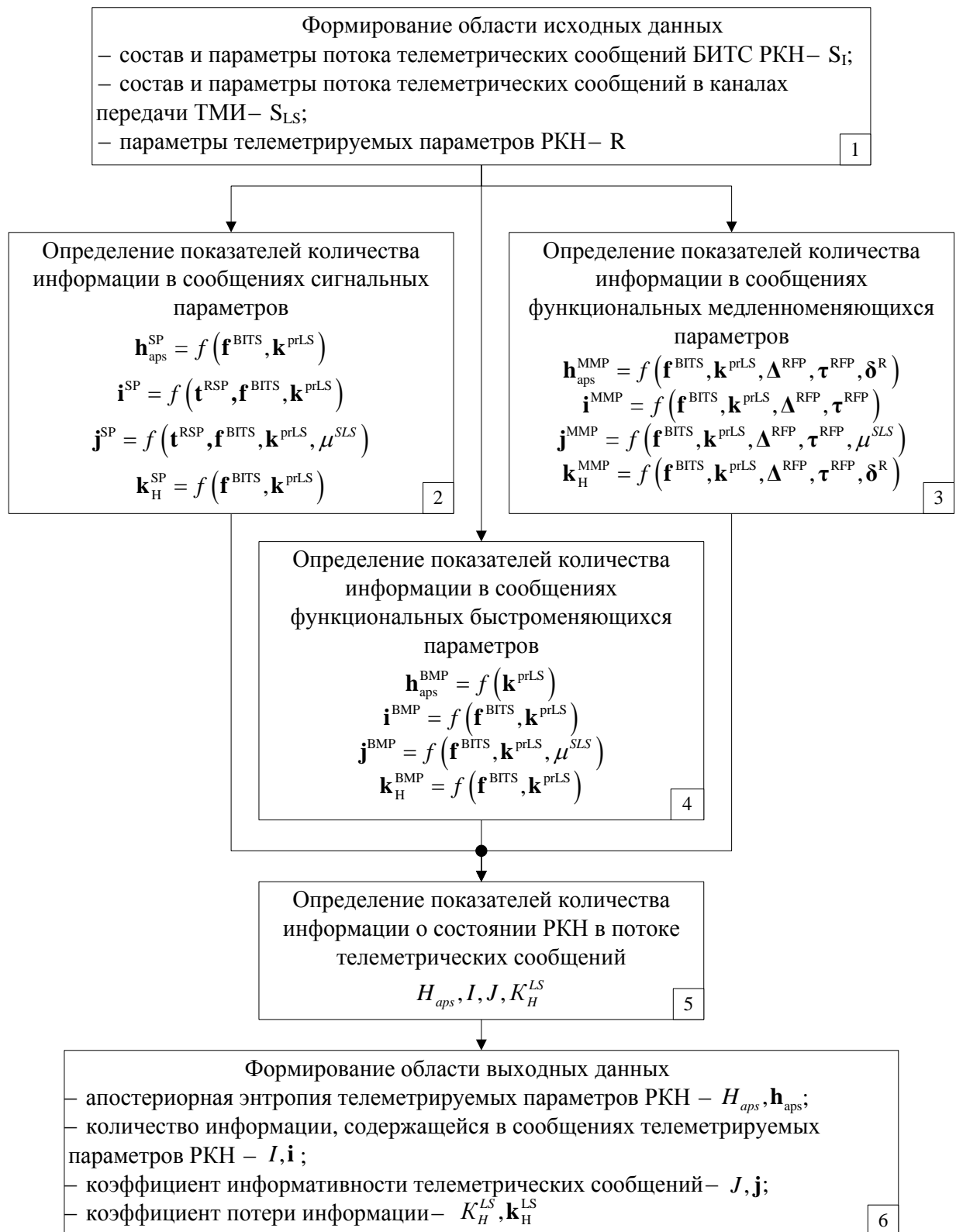


Рисунок 3.1 – Структурная схема методики определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений

Энтропия сигнального параметра определяется распределением момента срабатывания параметра во времени, в основу вычисления которой положена формула

$$h^{SP} = \log_2(2k_s \cdot \sigma), \quad (3.1)$$

где k_s – энтропийный коэффициент;

σ – дисперсия распределения времени срабатывания.

Распределение момента срабатывания сигнального параметра описывается законом равномерного распределения, для которого $k_s=1,73$ [71, 78]. Дисперсия времени срабатывания рассчитывается как отношение половины ожидаемого времени срабатывания к времени канального интервала БРТС. На основе вышеизложенного, расчет энтропии сообщений s -го сигнального параметра проводится по формуле

$$h_{apr}^{SPs} = \log_2 \left(1.73 \cdot \frac{t_s^{RSP}}{\tau_k} \right) \quad (3.2)$$

для априорной энтропии, и для апостериорной

$$h_{aps}^{SPs} = \log_2 \left(1.73 \cdot \frac{1}{f_s \cdot \tau_k} \right), \quad (3.3)$$

где τ_k – период опроса основного коммутатора БРТС;

f_s – частота выдачи сообщений s -го сигнального параметра в потоке ТМИ, равная

f_r^{BITS} для потока БИТС, и равная $\frac{f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}}$ для потока в каналах передачи ТМИ [55].

Количество информации, содержащееся в потоке сообщениях s -го сигнального параметра в результате фиксации его срабатывания, рассчитывается по формуле

$$i^{SPs} = \log_2 \left(\frac{t_s^{RSP} \cdot f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \right). \quad (3.4)$$

Коэффициент информативности потока сообщений s -го сигнального параметра рассчитывается по формуле

$$j^{SPs} = \frac{\log_2 \left(\frac{t_s^{RSP} \cdot f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \right)}{\frac{f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \cdot \mu^{SLS} \cdot t_{sLS}^{RSP}}, \quad (3.5)$$

где t_{sLS}^{RSP} – время выдачи в каналы передачи ТМИ сообщений s -го сигнального параметра.

Коэффициент потери информации потока сообщений s -го сигнального параметра рассчитывается по формуле

$$k_{Hs}^{SP} = 1 + \frac{\log_2(k_s^{prLS})}{\log_2 \left(1.73 \cdot \frac{1}{f_s^{BITS} \cdot \tau_k} \right)}. \quad (3.6)$$

В блоке 3 проводятся расчеты по определению показателей количества информации, содержащейся в сообщениях медленноменяющихся (с частотой опроса до 500 Гц) функциональных параметров РКН.

Медленноменяющиеся параметры содержат информацию о дискретных выборках измеряемых величин, по которым потребитель восстанавливает непрерывные физические процессы. Сообщения медленноменяющихся параметров содержат два элемента: значение параметра и время измерения. На практике, из-за несовершенства измерительных средств, значения телеметрических параметров отличаются от истинных и представляют собой сумму двух независимых сигналов: непосредственно измеряемой величины и шумового сигнала измерительных средств, который определяется погрешностью первичных измерителей-преобразователей [55]. С учетом свойства аддитивности, энтропия сообщений медленноменяющихся параметров рассчитываются по формуле

$$h^{MMP} = \log_2(2k_{\sigma_n} \cdot \sigma_n) + \log_2(2k_{\sigma_\delta} \cdot \delta^R), \quad (3.7)$$

где σ_n – дисперсия возможных значений телеметрического параметра;

k_{σ_n} , k_{σ_δ} – энтропийные коэффициенты измеряемой величины и погрешности измерений.

Распределение значений телеметрических медленноменяющихся параметров описывается законом равномерного распределения случайных величин в диапазоне возможных значений, для которого $k_{\varepsilon_n} = 1,73$. Интегральная погрешность первичных измерителей-преобразователей содержит большое количество составляющих, в результате чего описывается законом нормального распределения случайных величин, для которого $k_{\varepsilon_\delta} \approx 2,07$ [55, 71, 78].

Расчеты значений показателей количества информации последовательных сообщений телеметрического параметра проводятся с учетом возможности прогнозирования значения последующего сообщения по предшествующим дискретным сообщениям с ошибкой восстановления промежуточных значений непрерывного процесса. В настоящее время [11, 55, 84, 98, 109, 116] наибольшее распространение получило восстановление интерполяционным полиномом Лагранжа низкой степени, для которого ошибка восстановления определяется остаточным членом и зависит от степени воспроизводящего полинома.

При расчетах значений априорной энтропии применяется воспроизводящий полином нулевой степени (ступенчатая интерполяция по предыдущему сообщению), ошибка воспроизведения достигает наибольшего значения в конце интервала прогнозирования. Выражение 3.7 для априорной энтропии i -го сообщения s -го медленноменяющегося параметра принимает вид

$$h_{apr}^{MMPsi} = \log_2 \left(3,46 \cdot \left[\left| \varphi_s'^{RFP}(t_{i-1}) \right| \cdot \frac{k_s^{prLS}}{f_s^{BITS}} \right] \right) + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^R), \quad (3.8)$$

где t_{i-1} – время предыдущего отсчета;

$\left| \varphi_s'^{RFP}(t_{i-1}) \right|$ – модуль значения первой производной функции, описывающий идеальный процесс s -го медленноменяющегося параметра на время предыдущего отсчета [55].

При расчетах апостериорной энтропии применяется воспроизводящий полином первой степени (линейная интерполяция по предыдущему и текущему сообщениям), ошибка достигает наибольшего значения в середине интервала

прогнозирования. Выражение (3.7) для апостериорной энтропии i -го сообщения s -го медленноменяющегося параметра принимает вид

$$h_{aps}^{MMPsi} = \log_2 \left(3,46 \cdot \left[\frac{|\varphi_s^{nRFP}(t_{i-1})|}{8} \cdot \frac{k_s^{prLS^2}}{f_s^{BITS^2}} \right] \right) + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^R), \quad (3.9)$$

где $|\varphi_s^{nRFP}(t_{i-1})|$ – модуль значения второй производной функции, описывающий идеальный процесс s -го медленноменяющегося параметра на время предыдущего сообщения [55].

Апостериорная энтропия потока сообщений s -го медленноменяющегося параметра принимает значение сообщения с максимальной энтропией. Для расчетов верхних граничных значений производных в методике применяется неравенство Бернштейна

$$|\varphi_s^{(n)RFP}| \leq \omega_s^n \cdot |\Delta_s|, \quad (3.10)$$

где $\omega_s = \frac{\pi}{\tau_s^{RFP}}$ – круговая частота процесса на характерном участке изменения телеметрического параметра [55, 103, 109, 116].

При использовании методики в поисковых процедурах производные рассчитываются исходя из длительностей переходных процессов (τ^{RFP}) и диапазонов изменения значений (Δ^{RFP}) функциональных параметров, заданных в эксплуатационной документации на РКН, а при оценке результата параметрического синтеза – исходя из их фактических значений, полученных в ходе эксперимента с использованием ТМИ, зарегистрированной при запусках РКН.

Количество информации, содержащееся в i -м сообщении s -го медленноменяющегося параметра, рассчитывается по формуле

$$i^{MMPsi} = \log_2 \left(\frac{\left[|\varphi_s^{nRFP}(t_{i-1})| \cdot \frac{k_s^{prLS}}{f_s^{BITS}} \right]}{\left[\frac{|\varphi_s^{nRFP}(t_{i-1})|}{8} \cdot \frac{k_s^{prLS^2}}{f_s^{BITS^2}} \right]} \right). \quad (3.11)$$

Количество информации, содержащейся в потоке сообщений s -го медленноменяющихся параметров, вычисляется как сумма количества информации, содержащейся в i -х сообщениях.

Коэффициент информативности потока телеметрических сообщений s -го медленноменяющегося параметра рассчитывается по формуле

$$j^{MMPs} = \frac{\sum_i I^{MMPsi}}{\frac{f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \cdot \mu^{SLS} \cdot t_{oc}}, \quad (3.12)$$

где t_{oc} – время оценки сообщений параметра.

Коэффициент потери информации потока сообщений s -го медленноменяющегося параметра рассчитывается по формуле

$$k_{Hs}^{MMP} = \frac{\log_2 \left(3,46 \cdot \left[\frac{\max |\varphi_s^{RFP}(t)|}{8} \cdot \frac{k_s^{prLS^2}}{f_s^{BITS^2}} \right] \right) + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^R)}{\log_2 \left(3,46 \cdot \left[\frac{\max |\varphi_s^{RFP}(t)|}{8 f_s^{BITS^2}} \right] \right) + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^R)}. \quad (3.13)$$

В блоке 4 проводятся расчеты по определению показателей количества информации, содержащейся в сообщениях быстроменяющихся (с частотой опроса более 500 Гц) функциональных параметров РКН.

Быстроменяющиеся параметры представляют собой сумму сигналов множества колебательных процессов и содержат информацию о вибрациях в узлах и агрегатах РКН и акустических нагружениях элементов конструкции. Потребителя в большей степени интересуют не столько сами значения параметров, а сколько их спектральные характеристики, получаемые при разложении потоков телеметрических сообщений в ряд Фурье [2, 6, 64, 103]. Для конечного интервала наблюдения верхняя граница энергетического спектра восстановленного сигнала рассчитывается на основе теоремы Котельникова

$$f_m = 0,5 f_o, \quad (3.14)$$

где f_m – верхняя граница спектра быстроменяющегося параметра;

f_o – частота опроса быстроменяющегося параметра [55].

Распределение спектральной плотности мощности быстроменяющихся параметров описывается законом равномерного распределения случайных величин в диапазоне возможных значений, для которого $k_s=1,73$. Для s -го быстроменяющегося параметра априорная энтропия рассчитывается по формуле

$$h_{apr}^{BMPs} = \log_2(1,73 \cdot f_s^{BITS}) + \log_2(1,73 \cdot \frac{t_{oc}}{\tau_k}). \quad (3.15)$$

Апостериорная энтропия s -го быстроменяющегося параметра включает две составляющих: энтропия детализации разложения в спектр и энтропия сужения полосы оцениваемого спектра, вследствие прореживания отсчетов,

$$h_{aps}^{BMPs} = \log_2(1,73 \cdot f_s^h) + \log_2(1,73 \cdot \frac{t_s^h}{\tau_k}) + \log_2(k_s^{prLS}), \quad (3.16)$$

где f_s^h, t_s^h – шаг детализации по частоте и времени спектрального разложения [55].

Количество информации, содержащейся в потоке телеметрических сообщениях s -го быстроменяющегося параметра, рассчитывается по формуле

$$i^{BMPs} = \log_2\left(1,73 \cdot \frac{f_s^{BITS}}{f_s^h}\right) + \log_2(1,73 \cdot \frac{t_{oc}}{t_s^h}) - \log_2(k_s^{prLS}). \quad (3.17)$$

Коэффициент информативности потока телеметрических сообщений s -го быстроменяющегося параметра рассчитывается по формуле

$$j^{BMPs} = \frac{i^{BMPs}}{\frac{f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \cdot \mu_s^{SLS} \cdot t_{oc}}. \quad (3.18)$$

Коэффициент потери информации потока сообщений s -го быстроменяющегося параметра рассчитывается по формуле

$$k_{Hs}^{BMP} = 1 + \frac{\log_2(k_s^{prLS})}{\log_2\left(2,9929 \cdot \frac{f_s^{BITS} \cdot t_{oc}}{f_s^h \cdot t_s^h}\right)}. \quad (3.19)$$

В блоке 5 проводятся расчеты показателей количества информации группового потока телеметрических сообщений. Расчеты основываются на свойстве аддитивности энтропии независимых процессов. В качестве входных данных используются результаты расчетов, полученных в блоках 2, 3, 4.

Значения апостериорной энтропии и количества информации группового потока телеметрических сообщений вычисляются как суммы соответствующих показателей потоков сообщений отдельных телеметрических параметров:

$$\begin{aligned} H_{aps} &= \sum_{s \in s^{SP}} h_{aps}^{SPs} + \sum_{s \in s^{MMP}} h_{aps}^{MMPs} + \sum_{s \in s^{BMP}} h_{aps}^{BMPs}; \\ I &= \sum_{s \in s^{SP}} i^{SPs} + \sum_{s \in s^{MMP}} i^{MMPs} + \sum_{s \in s^{BMP}} i^{BMPs}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

для телеметрических параметров РКН, не включенных в поток телеметрических сообщений, апостериорная энтропия принимает значение априорной ($h_{aps}^s = h_{apr}^s$), а количество информации равняется нулю ($i^s = 0$) [55].

Коэффициент информативности группового потока телеметрических сообщений рассчитывается по формуле

$$J = \frac{I}{v_s^{LS} \cdot t_{oc}}. \quad (3.21)$$

Коэффициент потери информации группового потока телеметрических сообщений рассчитывается по формуле

$$K_H^{LS} = \frac{H_{aps}}{H_{aps}^{BITS}}. \quad (3.22)$$

Выходные результаты блоков используются при поиске рациональных значений параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ и при оценке результатов параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН. При этом применение нового частного показателя количества информации (\mathbf{k}_H^{LS}) позволяет проводить оценку сообщений разнородных телеметрических параметров РКН в единой относительной шкале.

При расчетах значений показателей количества информации потоков телеметрических сообщений в вышеизложенных блоках учитываются только достоверные сообщения телеметрических параметров РКН. На практике, возмущающие воздействия приводят к искажениям телеметрических сообщений, проявляющихся в виде пропусков и (или) ложных срабатываниях сигнальных параметров и в аномальных значениях функциональных параметров [55].

Возмущающие воздействия учитываются в методике посредством увеличения интервала следования телеметрических сообщений (снижение частоты выдачи достоверных сообщений) в результате отбраковки аномальных сообщений на интервалах искажения ТМИ.

Таким образом, разработанная методика определения количества информации в потоке телеметрических сообщений базируется на математическом аппарате дискретной энтропии случайных событий и процессов. Методика представляет собой двухуровневую структуру расчетных блоков: расчетные блоки первого уровня предназначены для определения значений показателей количества информации потоков сообщений отдельных телеметрических параметров, расчетный блок второго уровня для определения значений показателей количества информации телеметрических сообщений группового потока.

Предложенная методика определения количества информации в потоке телеметрических сообщений является составной частью методического аппарата параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН и используется как в процедурах поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО, так и при оценивании результатов параметрического синтеза.

Использование нового частного показателя количества информации позволяет проводить оценку сообщений разнородных телеметрических параметров РКН в единой относительной шкале.

3.2 Методика рационального распределения ресурса каналов передачи телеметрической информации между наземными измерительными пунктами

Методика рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП предназначена для поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО запусков РКН, определяющих план задействования каналов передачи ТМИ при проведении ИТО запуска РКН.

Методика основывается на совокупности математических описаний модели сбора ТМИ. Показателями плана задействования каналов передачи ТМИ являются [47, 49]:

- время выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ (T^{SLS});
- количество НИП, коммутированных в телеметрических линиях связи ($\mathbf{m}^{kLS}(t)$);
- пропускная способность каналов передачи ТМИ ($\mathbf{v}^{LS}(t)$).

В качестве исходных данных для проводимых по данной методике поисковых процедур используются: состав и параметры средств НИК РКН, параметры БИТС РКН, параметры потребителя информации, параметры прогнозируемых возмущающих воздействий, а также начальное решение поиска рациональных значений варьируемых параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ и результаты координирующих расчетов, основными из которых являются:

- параметры средств НИК РКН:
- состав НИП в НИК (M_{IP});
 - времена зон радиовидимости НИП (\mathbf{t}^{ipZRV});
 - состав телеметрических линий связи в НИК (L);
 - количество комплектов каналообразующей аппаратуры в телеметрических линиях связи (\mathbf{c});
 - ресурс пропускной способности телеметрических линий связи (\mathbf{v}^{LSrasp});
 - минимальный шаг деления ресурса пропускной способности (элементарный интервал пропускной способности) телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ ($\mathbf{h}\mathbf{v}^{LS}$);
 - размер сообщений телеметрических параметров в каналах передачи ТМИ (μ^{SLS});
 - возможности коммутации НИП в телеметрические линии связи (\mathbf{K}^{mLS});
- параметры средств БИТС РКН:
- частоты опроса телеметрических параметров БИТС ($\mathbf{f}^{BITS}(t)$);
- параметры потребителя информации:

– требуемый минимальный состав телеметрических параметров, необходимых для оценивания бортовых систем РКН ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$);

параметры возмущающих воздействий:

– интервалы времени искажений ТМИ, обусловленные плохими условиями приема радиотелеметрического сигнала средствами НИК в пределах зон радиовидимости НИП ($\mathbf{g}^{\text{ipZR}^V}$);

начальное решение поиска рациональных значений параметров плана формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ и результаты координирующих расчетов:

– состав телеметрических параметров в потоках телеметрических сообщений ($\mathbf{s}_{\text{nr}}^{\text{LS}}(t)$);

– коэффициенты прореживания сообщений телеметрических параметров в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}_{\text{nr}}^{\text{prLS}}(t)$);

– плотность информационного потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{v}_{\text{Snr}}^{\text{LS}}(t)$);

– ресурсы пропускной способности каналов передачи ТМИ, не используемые под передачу телеметрических сообщений ($\Delta\mathbf{v}_{\text{nr}}^{\text{LS}}(t)$).

Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в методике через отдельный поиск рациональных значений, не имеющих четкого аналитического описания параметров графика коммутации НИП в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{t}^{\text{KLS}}, \mathbf{M}^{\text{mLS}}(t)$) и имеющей четкое аналитическое описание пропускной способности каналов ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$) [47, 49]. При этом поисковые процедуры осуществляются в два этапа:

– на первом этапе по имеющимся исходным данным проводится поиск начального решения;

– на втором этапе, по результатам координирующих расчетов, проводится уточнение начального решения.

Анализ модели функционирования СИТО запусков РКН, особенностей функционирования телеметрических линий связи и методов оптимизации [13, 27, 49, 60, 74, 86, 106, 107] показал целесообразность использования математического аппарата теории расписаний при проведении поиска рациональных значений параметров плана задействования каналов передачи ТМИ.

Структурная схема методики рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП представлена на рисунке 3.2.

Блок 1 предназначен для формирования области исходных данных, необходимых для поиска рациональных значений параметров плана задействования каналов передачи ТМИ, которая включает: состав и параметры средств БИТС и НИК РКН ($M_{\text{БИТС}}, M_{\text{НИК}}$), минимальный состав контролируемых параметров РКН ($s^{\text{tr}}(t)$) и интервалы неустойчивого приема ТМИ наземными средствами (g^{ipZRV}). Для отражения динамики исходных данных о проведении ИТО запуска РКН строятся ленточные графики [49]:

- зон радиовидимости НИП (t^{ipZRV}) с указанием интервалов искажений ТМИ при ее приеме НПС (g^{ipZRV});
- функционирования БИТС ($f^{\text{БИТС}}(t)$);
- использования ТМИ ($s^{\text{tr}}(t)$).

В блоках 2 и 4 реализуются процедуры поиска рациональных значений параметров графика коммутации НИП в многоканальные телеметрические линии связи.

Выходными результатами блоков являются:

- вектор времен коммутации НИП в каналы передачи ТМИ (t^{KLS});
- матрица признаков коммутации НИП в каналы передачи ТМИ ($M^{\text{MLS}}(t)$).

Выходные результаты блоков используются при проведении расчетов по распределению ресурсов пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП.

Поисковые процедуры осуществляются графическим методом.

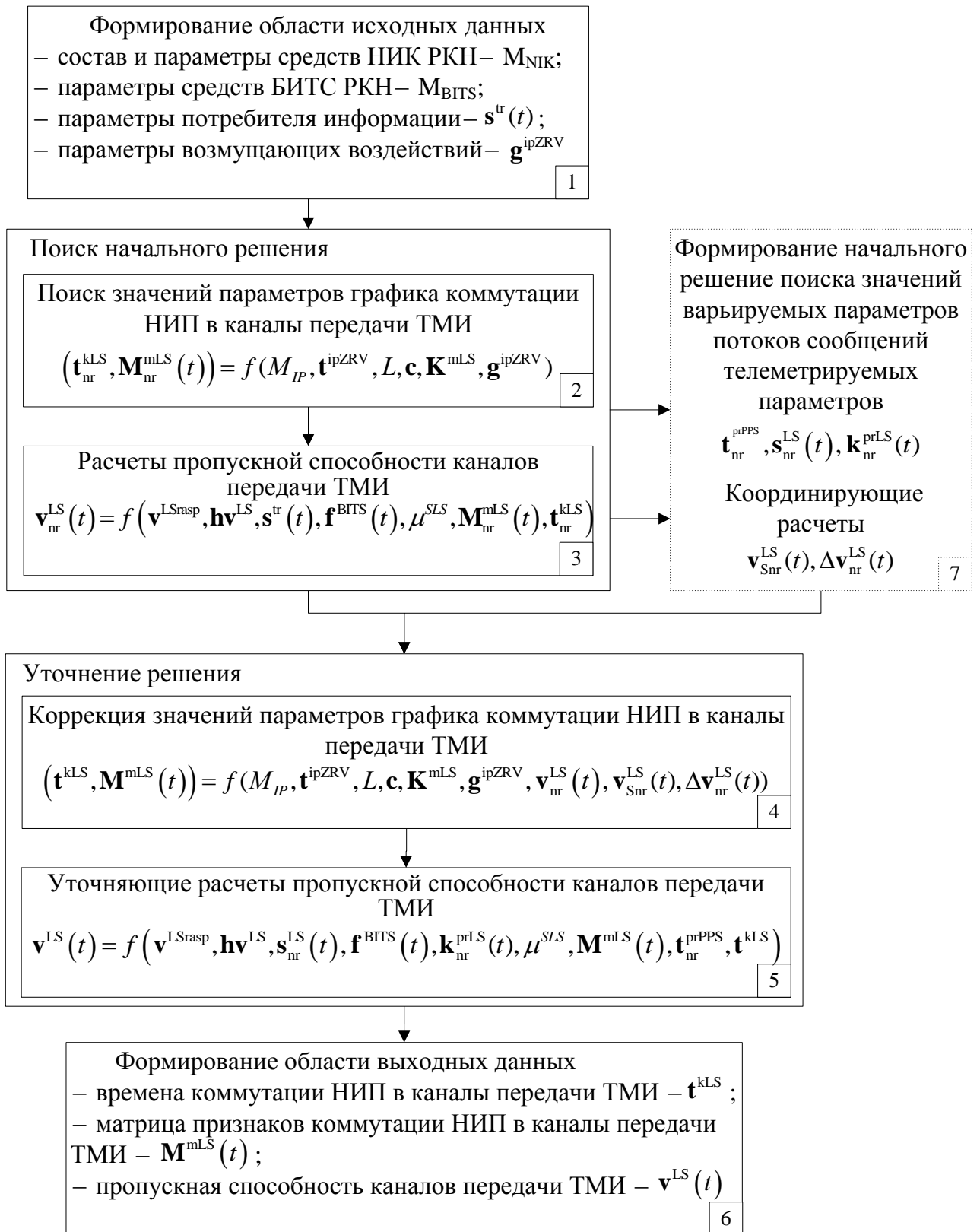


Рисунок 3.2 – Структурная схема методики рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП

В блоке 2 осуществляется поиск начального решения значений параметров. Для чего, с учетом возможностей коммутации НИП (\mathbf{K}^{mLS}), строятся ленточные графики коммутации НИП в многоканальные телеметрические линии связи, обеспечивающие выполнение критерия непрерывности передачи ТМИ в ЦКП РКН ($T^{SLS} = T^{ZRV}$) минимальным составом коммутированных НИП [49].

Коррекция параметров коммутации НИП в каналы передачи ТМИ на предмет увеличения коммутированных НИП осуществляется в блоке 4. Критерием включения в график коммутации дополнительных НИП является достаточность неиспользуемого для передачи потока телеметрических сообщений ресурса пропускной способности телеметрических линий связи и наличие свободных комплектов каналообразующей аппаратуры для организации дополнительных каналов передачи ТМИ от НИП

$$\min_t \left(v_l^{LSrasp} - \sum_{m \in M_{l,nr}^{mLS}} v_m^S(t) \right) \geq \max_t v^S(t), M_l^{mLS}(t) < c_l \text{ при } t \in t_m^{ipZRV}. \quad (3.23)$$

В блоках 3 и 5 проводятся расчеты по рациональному распределению ресурсов пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП.

Проводимые в блоках расчеты направлены на выполнение критерия пропорциональности распределения ограниченной пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ относительно плотности потока телеметрических сообщений от НИП. При этом изменение пропускной способности каналов передачи ТМИ в l -й телеметрической линии связи осуществляется дискретно с шагом $h v_l^{LS}$, а расчеты по распределению сводятся к определению элементарных интервалов пропускной способности l -й телеметрической линии связи, выделяемых в канал передачи ТМИ от m -го НИП. Выходным результатом расчетов является вектор значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ ($\mathbf{v}^{LS}(t)$) [49].

Для линеаризации формализованной записи критерия пропорциональности распределения ограниченной пропускной способности телеметрических линий

связи (выражения 1.28, 2.2), в методике введен параметр – коэффициент загрузки телеметрических линий связи, определяемый как отношение пропускной способности l -й телеметрической линии связи к максимальной суммарной плотности информационных потоков от НИП, одновременно коммутированных в l -ю телеметрическую линию связи, [49]

$$k_l^{zagr} = \frac{v_l^{LSrasp}}{\max_{m \in M, n \in N} \sum (v_m^p \cdot m_{lmn}^{mLS})} \quad (3.24).$$

В этом случае, расчеты пропускной способности каналов передачи ТМИ проводится по формуле:

$$a_{lm} = \left[\frac{v_m^p \cdot m_{lmn}^{mLS} \cdot k_l^{zagr}}{hv_l^{LS}} \right] \quad (3.25)$$

при ограничениях на располагаемую пропускную способность телеметрических линий связи в виде системы линейных неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11} \cdot hv_{11}^{LS} \cdot m_{111}^{mLS} + \dots + a_{1m} \cdot hv_{1m}^{LS} \cdot m_{1m1}^{mLS} + \dots + a_{1M} \cdot hv_{1M}^{LS} \cdot m_{1M1}^{mLS} \leq v_1^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{l1} \cdot hv_{l1}^{LS} \cdot m_{l11}^{mLS} + \dots + a_{lm} \cdot hv_{lm}^{LS} \cdot m_{lm1}^{mLS} + \dots + a_{lM} \cdot hv_{lM}^{LS} \cdot m_{lM1}^{mLS} \leq v_l^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{L1} \cdot hv_{L1}^{LS} \cdot m_{L11}^{mLS} + \dots + a_{Lm} \cdot hv_{Lm}^{LS} \cdot m_{Lm1}^{mLS} + \dots + a_{LM} \cdot hv_{LM}^{LS} \cdot m_{LM1}^{mLS} \leq v_L^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{11} \cdot hv_1^{LS} \cdot m_{11n}^{mLS} + \dots + a_{1m} \cdot hv_1^{LS} \cdot m_{1mn}^{mLS} + \dots + a_{1M} \cdot hv_1^{LS} \cdot m_{1Mn}^{mLS} \leq v_1^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{l1} \cdot hv_l^{LS} \cdot m_{l1n}^{mLS} + \dots + a_{lm} \cdot hv_l^{LS} \cdot m_{lmn}^{mLS} + \dots + a_{lM} \cdot hv_l^{LS} \cdot m_{lMn}^{mLS} \leq v_l^{LSrasp}, \\ \vdots \\ a_{L1} \cdot hv_L^{LS} \cdot m_{L1n}^{mLS} + \dots + a_{Lm} \cdot hv_L^{LS} \cdot m_{Lmn}^{mLS} + \dots + a_{LM} \cdot hv_L^{LS} \cdot m_{LMn}^{mLS} \leq v_L^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{11} \cdot hv_1^{LS} \cdot m_{11N}^{mLS} + \dots + a_{1m} \cdot hv_1^{LS} \cdot m_{1mN}^{mLS} + \dots + a_{1M} \cdot hv_1^{LS} \cdot m_{1MN}^{mLS} \leq v_1^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{l1} \cdot hv_l^{LS} \cdot m_{l1N}^{mLS} + \dots + a_{lm} \cdot hv_l^{LS} \cdot m_{lmN}^{mLS} + \dots + a_{lM} \cdot hv_l^{LS} \cdot m_{lMN}^{mLS} \leq v_l^{LSrasp} \\ \vdots \\ a_{L1} \cdot hv_L^{LS} \cdot m_{L1N}^{mLS} + \dots + a_{Lm} \cdot hv_L^{LS} \cdot m_{LmN}^{mLS} + \dots + a_{LM} \cdot hv_L^{LS} \cdot m_{LMN}^{mLS} \leq v_L^{LSrasp} \end{array} \right. \quad (3.26)$$

где M – количество НИП, коммутируемых в телеметрические линии связи при проведении сеанса ИТО запуска РКН;

a_{lm} – количество элементарных интервалов пропускной способности l -й телеметрической линии связи, выделяемых в канал передачи ТМИ от m -го НИП;

v_m^p – прогнозируемая максимальная плотность потока телеметрических сообщений от НИП;

N – количество участков разработанного плана коммутации НИП в телеметрические линии связи;

m_{lmn}^{mLS} – признак наличия коммутации m -го НИП в l -й телеметрической линии связи на n -м участке плана коммутации НИП («1» – НИП коммутируется, «0» – НИП не коммутируется).

Расчеты по поиску начального решения проводятся в блоке 3, при этом расчеты проводятся на основе начального решения параметров графика коммутации НИП, параметров средств БИТС РКН и потребителя информации [49]:

$$\begin{aligned}
 M &= f(\mathbf{M}_{nr}^{mLS}(t)), t \in T^{SLS}; \\
 (N, t_n^{prLS}) &= f(\mathbf{M}_{nr}^{mLS}(t), \mathbf{t}_{nr}^{kLS}), t \in T^{SLS}; \\
 M_{lm}^{mLS} &= f(\mathbf{M}_{nr}^{mLS}(t)), l = 1 \dots L, m = 1 \dots M, t \in T^{SLS}; \\
 m_{lmn}^{mLS} &= f(\mathbf{M}_{nr}^{mLS}(t), \mathbf{t}_{nr}^{kLS}), l = 1 \dots L, m = 1 \dots M, n = 1 \dots N, t \in t_n^{prLS}; \\
 v_m^p &= \max_t \sum_{s \in S^r(t)} (\mu^{SLS} \cdot f_s^{BITS}(t)), m = 1 \dots M, t \in t_m^{ipZRV}.
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Уточнение значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ проводится в блоке 5. При проведении расчетов в качестве исходных данных используются: результаты коррекции параметров графика коммутации НИП в телеметрические линии связи и результаты начального решения поиска рациональных значений варьируемых параметров плана формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ [49]:

$$\begin{aligned}
M &= f(\mathbf{M}^{mLS}(t)), t \in T^{SLS}; \\
(N, t_n^{prLS}) &= f(\mathbf{M}^{mLS}(t), \mathbf{t}^{kLS}), t \in T^{SLS}; \\
M_{lm}^{mLS} &= f(\mathbf{M}^{mLS}(t)), l = 1 \dots L, m = 1 \dots M, t \in T^{SLS}; \\
m_{lmn}^{mLS} &= f(\mathbf{M}^{mLS}(t), \mathbf{t}^{kLS}), l = 1 \dots L, m = 1 \dots M, n = 1 \dots N, t \in t_n^{prLS}; \\
v_m^p &= \max_t \sum_{s \in s_{snr}^{LS}(t)} \left(\frac{\mu^{SLS} \cdot f_s^{BITS}(t)}{k_{snr}^{prLS}(t)} \right), m = 1 \dots M, t \in t_m^{kLS}.
\end{aligned} \tag{3.28}$$

В отличие от используемых в настоящее время одноэтапных расчетов, предложенное в данной методике двухэтапное проведение поисковых процедур и расчетов позволяет отыскать рациональные значения параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ, адаптированные к изменяющейся во времени плотности потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ [49].

Таким образом, методика рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП базируется на математическом описании процессов функционирования телеметрических линий связи. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в методике через две группы процедур поиска рациональных значений варьируемых параметров: определения значений параметров графика коммутации НИП в каналы передачи ТМИ и расчетов пропускной способности каналов передачи ТМИ. При этом поисковые процедуры реализуются в два этапа:

- на первом этапе по имеющимся исходным данным проводится поиск начального решения;
- на втором этапе, с учетом координирующих расчетов и результатов начального решения значений параметров потока телеметрических сообщений, проводится уточнение значений искомых параметров.

В отличие от существующего подхода в методике используется двухэтапное проведение поисковых процедур и расчетов, что позволяет адаптировать распределение ограниченных ресурсов пропускной способности многоканальных

телеметрических линий связи к прогнозируемой максимальной плотности потока телеметрических сообщений от НИП.

Выходные результаты поиска рациональных значений параметров плана задействования каналов передачи ТМИ используются для формирования заявки на привлечение средств связи к проведению ИТО запуска РКН, а также в качестве исходных данных при проведении поиска рациональных значений варьируемых параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ.

3.3 Методика формирования рационального потока телеметрических сообщений ракеты космического назначения в каналах передачи телеметрической информации

Методика предназначена для поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО, определяющих поток телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ.

Следует отметить, что проводимые в методике поисковые процедуры и расчеты направлены на снижение информационной избыточности потока телеметрических сообщений. Показателем степени снижения избыточности является введенный при проведении настоящего исследования коэффициент прореживания телеметрических сообщений (k^{prLS}).

Методика формирования рационального потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ базируется на совокупности математических описаний процессов формирования, передачи и использования ТМИ.

В методике принят ряд допущений [16, 36, 44, 37, 38, 67, 91, 110, 117], обусловленных особенностями применения информационно-измерительных систем:

1. Для потребителя ТМИ, при проведении контроля полета РКН, оценки функционирования и диагностики состояния бортовых систем, более важным является не количество информации, полученной в ходе ИТО, а апостериорная энтропия телеметрических данных.

2. Ценность имеют те сообщения, из которых может быть извлечена ТМИ в конкретных условиях выполнения задач ИТО.

3. Недостаток информации по одним телеметрическим параметрам не возмещается избытком по другим.

4. Преобразования потока телеметрических сообщений в элементах СИТО неизбежно оказывают дезинформирующее воздействие, что приводит к увеличению апостериорной энтропии телеметрических сообщений на выходе системы.

5. Телеметрические параметры независимы между собой в части проведения измерений, формирования и передачи сообщений.

В настоящей методике процедуры поиска рациональных значений варьируемых параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ проводятся с использованием следующих показателей [47, 55, 67]:

- состав телеметрических сообщений группового потока в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{s}^{\text{LS}}(t)$);
- апостериорная энтропия сообщений телеметрических параметров РКН в групповом потоке телеметрических сообщений ($\mathbf{h}_{\text{aps}}(t)$);
- коэффициент потери информации телеметрических сообщений группового потока в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}_{\text{H}}^{\text{LS}}(t)$).

Исходными данными, используемыми в методике, являются параметры источника и получателя информации, форматов сообщений в каналах передачи ТМИ, параметры плана задействования каналов передачи ТМИ, а также параметры возмущающих воздействий, среди которых:

информационные параметры БИТС РКН:

- времена действия программы измерений БИТС ($\mathbf{t}^{\text{prBITS}}$);
- состав телеметрических параметров РКН ($\mathbf{r}^{\text{BITS}}(t)$);
- частоты опроса телеметрических параметров РКН ($\mathbf{f}^{\text{BITS}}(t)$);

- признаки вида измерений телеметрических функциональных параметров (Ψ^{RFP});
 - признаки вида телеметрических сообщений (Θ^{RBITS});
 - признаки режима передачи телеметрических сообщений (η^{RBITS});
 - смещение времени выдачи сообщений телеметрических параметров через ЛЗ СКЗУ (τ^{LZ});
 - аппаратные погрешности измерений функциональных параметров (δ^{R});
- параметры телеметрических параметров РКН:
- состав функциональных параметров РКН (\mathbf{r}^{FP});
 - расчетные времена характерных участков телеметрических функциональных параметров РКН (\mathbf{t}^{RFP});
 - расчетные диапазоны изменения функциональных параметров ($\Delta^{\text{RFP}}(t)$);
 - расчетные длительности переходных процессов функциональных параметров ($\tau^{\text{RFP}}(t)$);
 - состав сигнальных параметров РКН (\mathbf{r}^{SP});
 - расчетные диапазоны срабатывания сигнальных параметров (\mathbf{t}^{RSP});
- параметры получателя информации:
- требуемый минимальный состав телеметрических параметров, необходимых для оценивания бортовых систем РКН ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$);
- параметры форматов сообщений в каналах передачи ТМИ:
- количество разрядов сообщения телеметрических параметров (μ^{SLS});
- параметры плана задействования каналов передачи ТМИ:
- времена коммутации НИП в линии связи (\mathbf{t}^{KLS});
 - пропускная способность каналов передачи ТМИ с НИП ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$);
- параметры возмущающих воздействий:

– времена прогнозируемых искажений ТМИ, обусловленных плохими условиями излучения радиосигнала при проведении динамических операций отделения составных частей РКН (\mathbf{g}^{RKN}).

Структурная схема методики формирования рационального потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ приведена на рисунке 3.3.

Блок 1 предназначен для формирования области исходных данных, используемых при поиске рациональных значений параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, которая включает: состав и параметры потоков ТМИ, формируемых БИТС (S_I) (источник информации), параметры получателя ТМИ ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$), состав и параметры каналов передачи ТМИ (M_{LS}), параметры возмущающих воздействий на поток телеметрических сообщений (\mathbf{g}^{RKN}) [67].

Для формирования пространства поиска по составу телеметрических сообщений на характерных участках подготовки к пуску, пуска и полета РКН проводится классификация телеметрических сообщений.

По признаку «вид телеметрического сообщения» (θ^{RBITS}) устанавливаются сообщения, подлежащие передаче по телеметрическим линиям связи без «прореживания». В данную группу входят сообщения абонентов цифровых согласующих устройств (БЦВМ и НАП), для которых характерна высокая адаптивность к процессам на борту РКН, высокая информативность и степень сжатия (содержат до 60% телеметрических параметров РКН) при относительно небольшом объеме данных в потоке ТМИ (не более 25% для РКН, оснащенных средне информативными БРТС, и не превышает 6%, оснащенных высокоинформативными) [67].

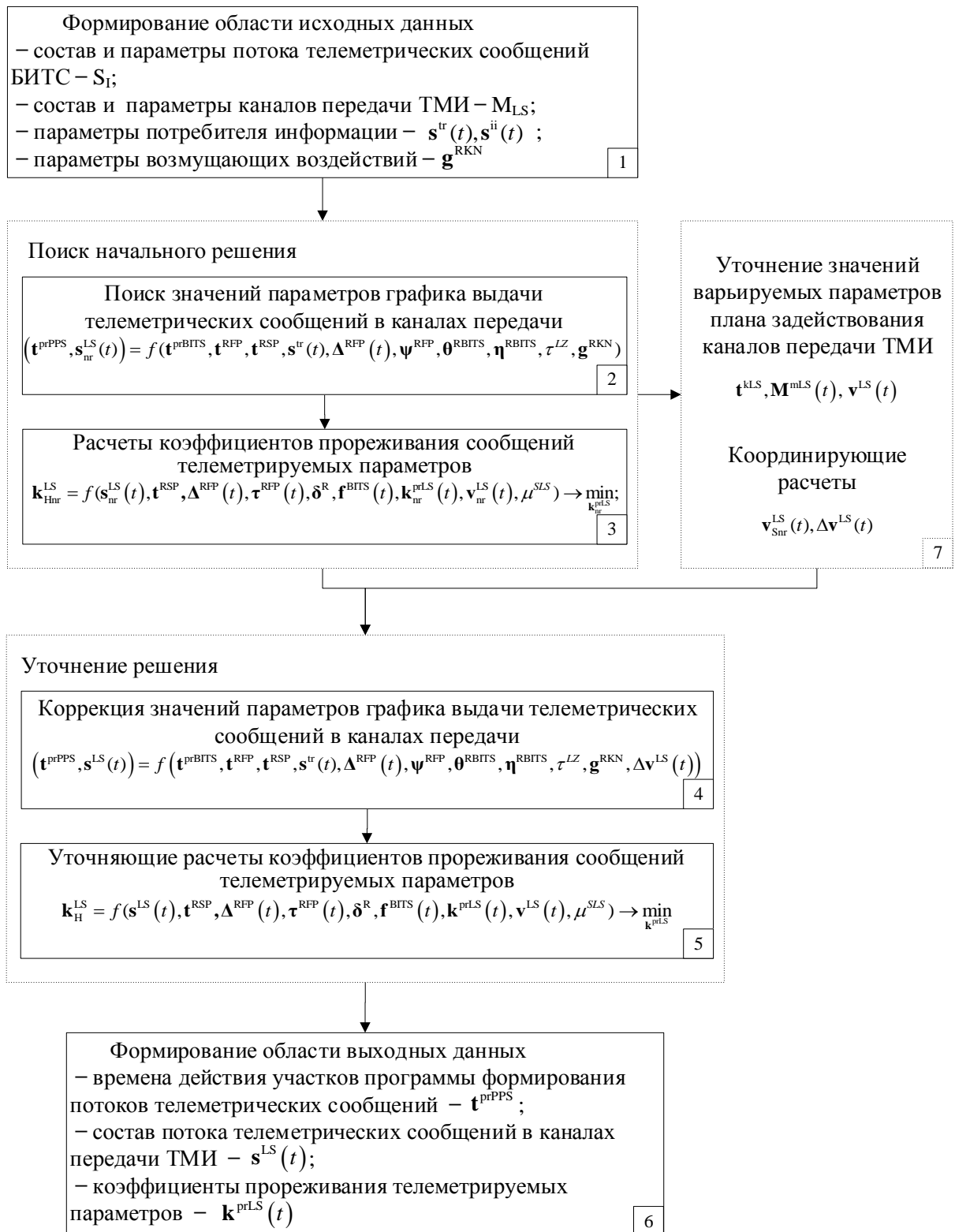


Рисунок 3.3 – Структурная схема методики формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ

По признакам вида измерений телеметрических функциональных параметров (ψ^{RFP}) и незавершенности физических процессов измеряемых величин определяется перечень телеметрических сообщений первичных преобразователей, из которых потребитель может извлечь информацию в реальном масштабе времени. К данной группе относятся сообщения незавершенных процессов сигнальных и функциональных параметров прямых измерений ($s^{ii}(t)$).

Для отражения динамики исходных данных при проведении ИТО запуска РКН строятся ленточные графики [47, 67]:

- функционирования каналов передачи ТМИ ($\mathbf{M}^{\text{mLS}}(t), \mathbf{t}^{\text{kLS}}, \mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$);
- функционирования БИТС РКН ($\mathbf{t}^{\text{prBITS}}, \mathbf{r}^{\text{BITS}}(t), \mathbf{f}^{\text{BITS}}(t)$) с отражением интервалов времени искажений передачи ТМИ в радиоканале (\mathbf{g}^{RKN});
- участков характерных изменений динамики телеметрических параметров РКН ($\mathbf{t}^{\text{RFP}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}$);
- использования ТМИ – минимальный состав контролируемых параметров РКН ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t), \mathbf{s}^{ii}(t)$).

На основе подхода последовательной оптимизации, процедуры поиска значений параметров плана формирования потока телеметрических сообщений проводится в два этапа отдельно для, не имеющих четкого аналитического описания, параметров графика выдачи телеметрических сообщений ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}, \mathbf{s}^{\text{LS}}(t)$) и, имеющих четкое аналитическое описание, коэффициентов прореживания телеметрических сообщений ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$) [67]. На первом этапе выполняется поиск начального решения, на втором проводится его уточнение.

В блоках 2, 4 проводится поиск рациональных значений параметров графика выдачи телеметрических сообщений в каналы передачи ТМИ, направленный на выполнение критерия обеспечения максимальной полноты охвата контролем телеметрических параметров РКН ($\mathbf{s}^{\text{LS}}(t) \geq \mathbf{s}^{\text{tr}}(t), \mathbf{s}^{\text{LS}}(t) \rightarrow \mathbf{s}^{ii}(t)$) [48].

Выходными результатами блоков являются:

- интервалы времен участков графика выдачи телеметрических сообщений в каналы передачи ТМИ ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}$);

– состав телеметрических сообщений, выдаваемых в каналы передачи ТМИ ($\mathbf{s}^{\text{LS}}(t)$).

Выходные результаты блоков используются при проведении расчетов коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$), кроме того, начальное решение состава сообщений телеметрических параметров, выдаваемых в каналы передачи ТМИ ($\mathbf{s}_{\text{nr}}^{\text{LS}}(t)$), используется при проведении второго этапа поиска рациональных значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ.

Поисковые процедуры осуществляются графическим методом.

Поиск значений параметров начального решения выполняется в блоке 2.

На первом шаге, на основе графиков функционирования БИТС РКН ($\mathbf{t}^{\text{prBITS}}$), использования ТМИ ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$) и участков характерных изменений динамики телеметрических параметров РКН ($\mathbf{t}^{\text{RFP}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}$) строится график выдачи телеметрических сообщений РКН режима непосредственной передачи ($\mathbf{s}_{\text{nr}}^{\text{LS}}(t) = \mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$). На втором шаге проводится оценка интервалов искажений ТМИ (\mathbf{g}^{RKN}) и состава потока сообщений через ЛЗ СКЗУ и БЗУ ($\boldsymbol{\eta}^{\text{RBITS}}$) с целью определения интервалов и состава сообщений дублирующей выдачи минимального состава контролируемых параметров РКН ($\mathbf{s}^{\text{trLZ}}(t)$), на основе которых строится график дублирующей выдачи телеметрических сообщений РКН воспроизводимых из БЗУ и (или) передаваемых через ЛЗ СКЗУ [67].

График выдачи сообщений телеметрических параметров РКН начального решения ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}, \mathbf{s}_{\text{nr}}^{\text{LS}}(t)$) строится объединением сформированных графиков выдачи телеметрических сообщений с учетом сдвига времени СКЗУ (τ^{LZ}).

В блоке 4 осуществляется уточнение графика выдачи сообщений телеметрических параметров РКН начального решения на предмет увеличения состава телеметрических сообщений ($\mathbf{s}^{\text{LS}}(t) \rightarrow \mathbf{s}^{\text{ii}}(t)$).

Условием расширения состава сообщений до $\mathbf{s}^{\text{ii}}(t)$ на q -м участке плана формирования потока телеметрических сообщений является наличие незадействованного ресурса пропускной способности в каналах передачи ТМИ

$$\Delta v_q^{LS} = \min_{m \in M^{mLS}} v_{m,l}^{LS}(t) - v_{nr}^S(t), \text{ при } t \in t_q^{prPPS}. \quad (3.29)$$

Предложенный двухэтапный поиск, в отличие от используемого в настоящее время подхода к формированию потока сообщений телеметрических параметров, позволяет изменять состав сообщений исходя из потребностей получателя ТМИ и наличия незадействованного ресурса пропускной способности телеметрических линий связи, а также применять сообщения, передаваемые из БЗУ и (или) через ЛЗ СКЗУ, для парирования искажений телеметрических данных, вызванных динамическими операциями РКН [67].

В блоках 3 и 5 проводится поиск значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{prLS}(t)$). Проводимые в блоках расчеты являются заключительным этапом параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН методом последовательной оптимизации и направлены на выполнение критериев обобщенных показателей качества функционирования СИТО.

Поисковые расчеты проводятся для каждого участка плана формирования потока телеметрических сообщений, при этом телеметрические сообщения делятся на две группы:

- параметры, подлежащие обязательному сбору ($\mathbf{s}^{tr}(t)$);
- дополнительные параметры ($\mathbf{s}^{dp}(t) = \mathbf{s}^{ii}(t) - \mathbf{s}^{tr}(t)$).

При проведении поисковых расчетов в методике принимается допущение, что телеметрические параметры одной группы равнозначны для получателя.

Структурные схемы алгоритмов проведения поисковых расчетов коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН приведены на рисунке 3.4.

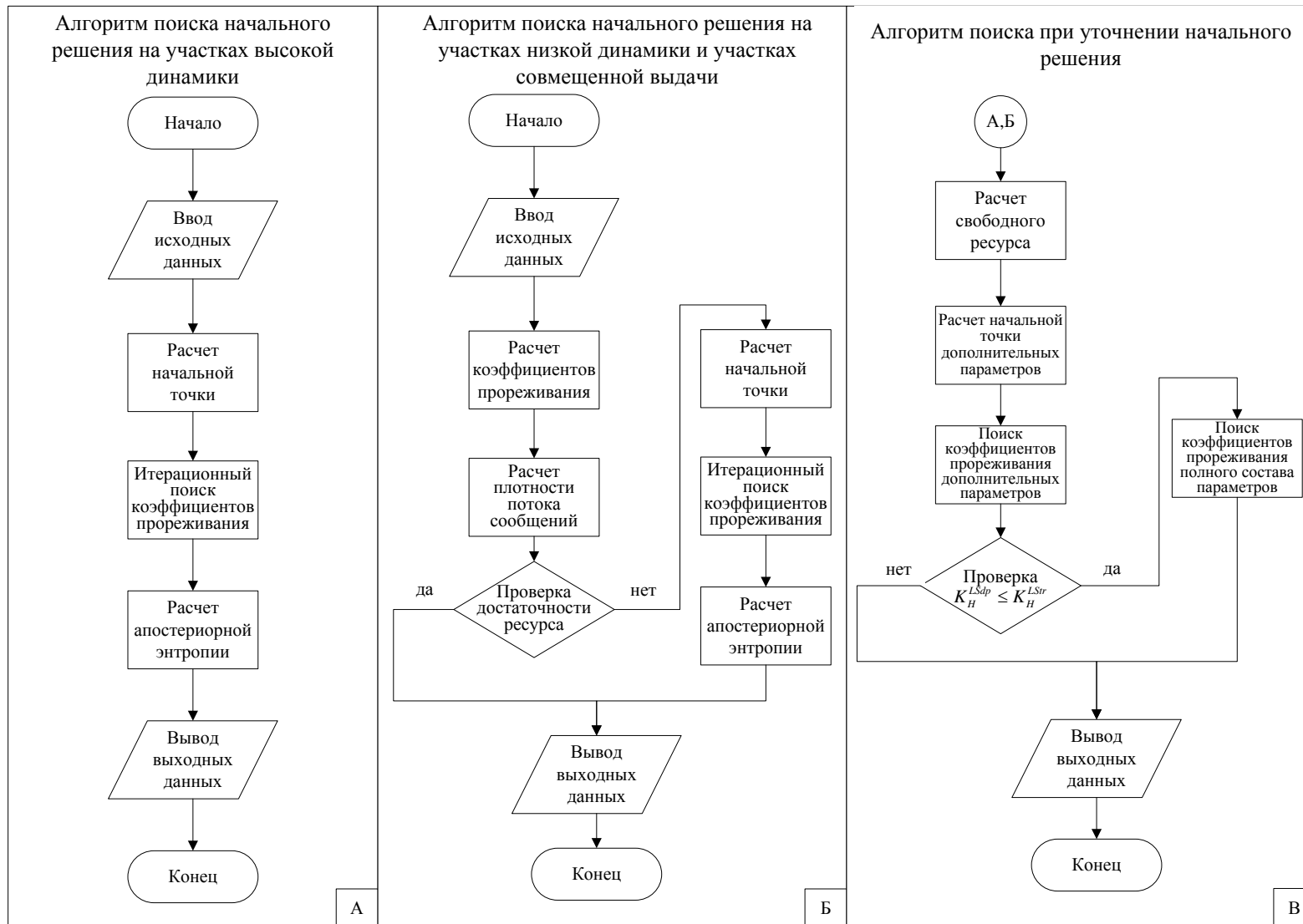


Рисунок 3.4 – Структурные схемы алгоритмов проведения поисковых расчетов коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН

Поиск начального решения проводится в блоке 3. Расчеты проводятся в следующем порядке:

1. Расчеты значений коэффициентов прореживания на участках непосредственной передачи сообщений высокой динамики телеметрических параметров РКН.

2. Расчеты значений коэффициентов прореживания на участках непосредственной передачи сообщений низкой динамики телеметрических параметров РКН и на участках совмещенной передачи сообщений непосредственной передачи и из БЗУ или (и) через ЛЗ СКЗУ.

На участках высокой динамики изменения телеметрических параметров поиск значений коэффициента прореживания проводится по критерию минимизации коэффициента потери информации

$$\mathbf{k}_H^{LS} \rightarrow \min_{\mathbf{k}^{prLS}} \quad (3.30)$$

при ограничениях на плотность группового потока телеметрических сообщений по ресурсу пропускной способности (начального решения) каналов передачи ТМИ и на нижнюю границу области допустимых значений коэффициента прореживания:

$$v_{Snr}^{LS}(t) \leq \min_{m \in M_{nr}^{kLS}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LSnr}(t) - v_{CM}^{LS}(t), \quad k_s^{prLS} \geq 1, \quad \text{при } t \in t_q^{prPPS}, \quad (3.31)$$

где $v_{CM}^{LS}(t)$ – плотность потока сообщений цифровых устройств [47, 67].

Возрастающий характер нелинейных функций $\mathbf{k}_H^{LS} = f(\mathbf{k}^{prLS})$ (выражения 3.6, 3.13, 3.22) при убывающем характере нелинейной функции плотности потока телеметрических сообщений $v_{Snr}^{LS} = f(\mathbf{k}^{prLS})$ обосновывают преимущества прямого итерационного поиска методом направленного спуска, при этом решение частной задачи лежит на нижней границе области допустимых решений [67, 69, 93, 106].

За начальную точку поиска принимается минимальное из максимально возможных значений коэффициентов потери информации телеметрических

сообщений $k_{H0}^{LS} = \min_{s_{nr}^{LS}} \left(\frac{h_{apr}^s}{h_{aps}^{BITSs}} \right)$. Поиск проводится в направлении $k_{Hs}^{LS} = 1$ переменным

по «Правилу золотого сечения» шагом спуска, обеспечивающему хорошую сходимость и скорость поиска. На каждой итерации коэффициент прореживания

принимает ближайшее верхнее целое значение $\lceil k_{sk}^{prLSnr} \rceil$. Поиск останавливается при достижении сверху границы области допустимых решений по располагаемой пропускной способности [67].

На участках низкой динамики телеметрических параметров и на участках совмещенной выдачи значения коэффициентов прореживания вычисляются на основе выражений (2.6, 2.12, 2.18) по критерию не ухудшения апостериорной энтропии телеметрических сообщений относительно участков высокой динамики ($h_{aps}^{sND} \leq h_{aps}^{sVD}$)

$$k_s^{npLSnr} = \left\lfloor f(h_{aps}^{sVD}) \right\rfloor \quad (3.32)$$

с проверкой выполнения ограничений (2.31). Если решение выходит за пределы допустимой области, то поиск проводится по алгоритму участков высокой динамики [67].

Результаты начального решения используются при проведении процедур уточнения параметров плана задействования каналов передачи ТМИ.

В блоке 5 проводятся повторные расчеты по поиску рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ. При этом ограничения на плотность группового потока устанавливаются на основе значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ уточненного решения, а поисковые процедуры на участках плана дополняются поиском значений коэффициентов прореживания сообщений дополнительных телеметрических параметров ($\mathbf{s}^{dp}(t)$) по алгоритму участков высокой динамики, при следующих ограничениях

$$v_{SDP}^{LS}(t) \leq \min_{m \in M^{kLS}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LS}(t) - v_{Str}^{LS}(t) - v_{SLZ}^{LS}(t) - v_{CM}^{LS}(t), \quad k_{SDP}^{prLS} \geq 1, \quad \text{при } t \in t_q^{prPPS}. \quad (3.33)$$

После чего осуществляются расчеты значений коэффициентов потери информации для потоков соответствующих групп телеметрических сообщений: $\mathbf{s}_{NP+LZ}^{tr}(t)$, $\mathbf{s}^{dp}(t)$ – если $K_H^{LSdp} \leq K_H^{LStr}$, то для всей совокупности телеметрических сообщений на участке плана проводится повторный поиск по алгоритму участков высокой динамики [67].

Значения используемых при проведении поиска показателей количества информации ($\mathbf{h}_{\text{aps}}(t)$, $\mathbf{k}_H^{\text{LS}}(t)$) рассчитываются с применением методики определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений. Использование для проведения поисковых расчетов нового показателя количества информации – коэффициент потери информации (\mathbf{k}_H^{LS}) при его относительной размерности и с учетом принятого допущения равнозначности телеметрических параметров РКН позволяет свести многомерную частную задачу поиска рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений (\mathbf{k}^{prLS}) к одномерной [47, 55, 67].

Таким образом, методика формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ базируется на математических описаниях процессов формирования, передачи и использования ТМИ. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в методике через две группы процедур поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО – процедуры поиска рациональных значений параметров графика выдачи сообщений телеметрических параметров РКН и поисковых расчетов рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений РКН [48].

Поисковые процедуры проводятся в два этапа:

- на первом этапе проводится поиск начального решения;
- на втором этапе, с учетом результатов координирующих расчетов, проводится уточнение решения.

Использование двухэтапного поиска позволяет адаптировать состав потока сообщений телеметрических параметров РКН к потребностям получателя ТМИ, наличию незадействованного ресурса пропускной способности каналов передачи ТМИ и парировать искажения ТМИ на участках динамических операций РКН.

Поисковые расчеты проводятся прямым поиском методом направленного спуска с применением методики определения количества информации в потоке телеметрических сообщений. Использование при расчетах частного показателя – коэффициента потери информации, позволяет свести многомерную частную

задачу поиска рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений РКН к одномерной [67].

Полученные в результате поиска рациональные значения варьируемых параметров применяются при разработке плана формирования потока телеметрических сообщений в ходе ИТО подготовки к пуску, пуска и полета РКН в реальном масштабе времени.

3.4 Комплексная методика параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения

Комплексная методика предназначена для поиска рациональных значений варьируемых параметров адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, реализует методическую схему параметрического синтеза адаптивной СИТО и базируется на ее модели функционирования.

В комплексной методике используются следующие обобщенные (интегральные) показатели качества СИТО запусков РКН [47]:

- апостериорная энтропия сообщений телеметрических параметров на выходе СИТО запусков РКН (H_{aps});
- информационная производительность СИТО запусков РКН ($v_S^{LS}(t)$).

Проводимые в комплексной методике поисковые процедуры и расчеты направлены на выполнение критериев обобщенных (интегральных) качества СИТО запусков РКН [47]:

- обеспечение минимальной апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО $H_{aps} \rightarrow \min$;

- ограничение информационной производительности не более располагаемой пропускной способности каналов передачи

$$\text{ТМИ } v_S^{LS}(t) \leq \min_{m \in M^{kLS}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LS}(t).$$

Параметрический синтез адаптивной СИТО запусков перспективных РКН осуществляется в комплексной методике через совокупность последовательно выполняемых расчетно-поисковых и оценочных процедур. Структурная схема

комплексной методики параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН приведена на рисунке 3.5.

Блок 1 предназначен для формирования области исходных данных – состав и параметры телеметрических параметров РКН (R), состав и параметры технических средств СИТО (M_{BITS} , $M_{\text{НИК}}$), параметры возмущающих воздействий (G), параметры потребителя информации ($s^{\text{tr}}(t)$), среди которых [47]:

состав и параметры телеметрических параметров РКН:

- состав функциональных параметров РКН (\mathbf{r}^{FP});
 - расчетные времена характерных участков телеметрических функциональных параметров РКН (\mathbf{t}^{RFP});
 - расчетные диапазоны изменения функциональных параметров ($\Delta^{\text{RFP}}(t)$);
 - расчетные длительности переходных процессов функциональных параметров ($\tau^{\text{RFP}}(t)$);
 - состав сигнальных параметров РКН (\mathbf{r}^{SP});
 - расчетные диапазоны срабатывания сигнальных параметров (\mathbf{t}^{RSP});
- параметры БИТС РКН:
- времена действия программы измерений БИТС ($\mathbf{t}^{\text{prBITS}}$);
 - состав телеметрических параметров РКН ($\mathbf{r}^{\text{BITS}}(t)$);
 - частоты опроса телеметрических параметров РКН ($\mathbf{f}^{\text{BITS}}(t)$);
 - признаки вида измерений телеметрических функциональных параметров (ψ^{RFP});
 - признаки вида телеметрического сообщения (θ^{RBITS});
 - признаки режима передачи телеметрического сообщения (η^{RBITS});
 - смещение времени выдачи сообщений телеметрических параметров через линию задержки (τ^{LZ});
 - аппаратные погрешности измерений функциональных параметров (δ^{R});

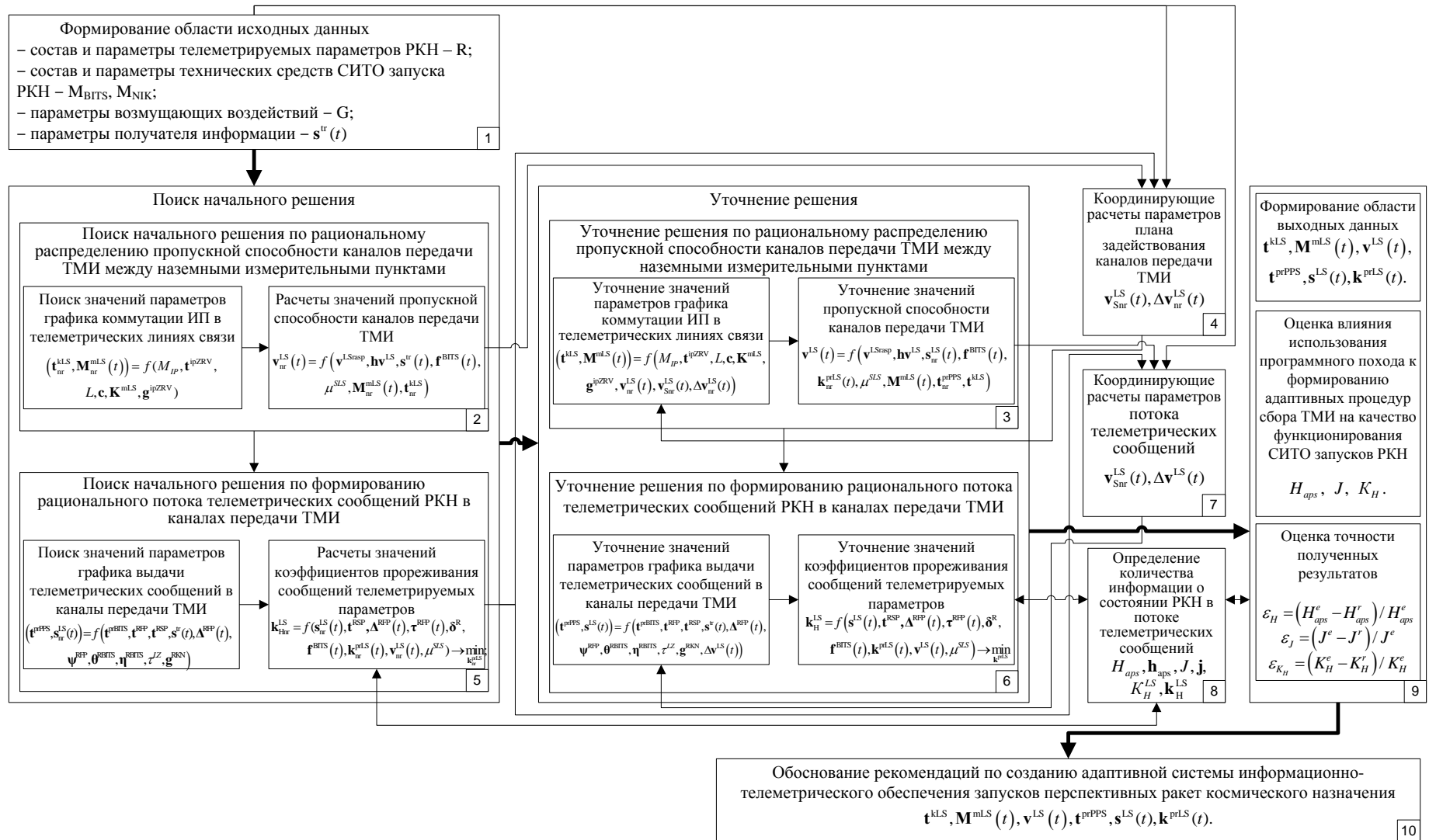


Рисунок 3.5 – Структурная схема комплексной методики параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения

параметры средств НИК РКН:

- состав измерительных пунктов в НИК (M_{ip});
- времена зон радиовидимости НИП (t^{ipZRV});
- состав телеметрических линий связи в НИК (L);
- количество комплектов каналообразующей аппаратуры в телеметрических линиях связи (c);
- ресурс пропускной способности телеметрических линий связи (v^{LSrasp});
- минимальный шаг деления ресурса пропускной способности (элементарный интервал пропускной способности) между каналами передачи ТМИ ($h v^{LS}$);
- размер сообщений телеметрических параметров в каналах передачи ТМИ (μ^{SLS});
- возможности коммутации НИП в телеметрические линии связи (K^{mLS});

параметры получателя информации:

- требуемый минимальный состав телеметрических параметров, необходимых для оценивания бортовых систем РКН ($s^{tr}(t)$);

параметры возмущающих воздействий:

- интервалы времени искажений ТМИ, обусловленные плохими условиями приема радиотелеметрического сигнала средствами НИК в пределах зон радиовидимости НИП (g^{ipZRV});
- времена прогнозируемых искажений ТМИ, обусловленных плохими условиями излучения радиосигнала при проведении динамических операций отделения составных частей РКН (g^{RKN}).

Для отражения временной динамики исходных данных строится детальный план проведения ИТО пуска и полета РКН, который включает следующие ленточные графики [47]:

- зон радиовидимости НИП (t^{ipZRV}) с указанием интервалов неустойчивого приема (g^{ipZRV});

- проведения динамических операций на борту РКН ($\mathbf{t}^{\text{RFP}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}$) с указанием интервалов искажений ТМИ при передаче с борта РКН (\mathbf{g}^{RKN});
- функционирования БИТС РКН ($\mathbf{t}^{\text{prBITS}}$);
- использования ТМИ получателем информации ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$).

Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в комплексной методике через последовательное решение частных задач поиска рациональных значений четырех групп варьируемых параметров [47, 48]:

- определение параметров графика коммутации НИП в каналы передачи ТМИ ($\mathbf{t}^{\text{KLS}}, \mathbf{M}^{\text{mLS}}(t)$);
- расчеты пропускной способности каналов передачи ТМИ ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$);
- определение параметров графика выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}, \mathbf{s}^{\text{LS}}(t)$);
- расчеты значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$).

Согласование входных и выходных данных поисковых подзадач и сходимость решения исходной задачи обеспечивается посредством проведения координирующих расчетов.

В блоках 2, 3, 4 проводятся поисково-расчетные процедуры по рациональному распределению ресурсов пропускной способности каналов передачи ТМИ между НИП. При проведении поисковых процедур и расчетов используются следующие частные показатели:

- время выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ (T^{SLS});
- количество НИП, коммутированных в телеметрических линиях связи ($\mathbf{m}^{\text{KLS}}(t)$);
- пропускная способность каналов передачи ТМИ ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$).

Проводимые в блоках поисковые процедуры и расчеты направлены на выполнение критериев частных показателей:

– непрерывности передачи ТМИ в ЦКП РКН ($T^{SLs} = T^{ZRV}$, $m^{kLS tr} \leq m_l^{kLS}(t) \leq c_l$);

– пропорциональности распределения ограниченной пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ относительно плотности потока телеметрических сообщений от НИП ($\delta_l \left(\frac{v_{lm}^{LS}}{\max v_{ml}} \right) \rightarrow 0$, для всех l).

Выходными результатами блоков являются рациональные значения параметров плана задействования каналов передачи ТМИ:

- признаки коммутации НИП в телеметрические линии связи ($\mathbf{M}^{mLS}(t)$);
- времена интервалов коммутации НИП в каналы передачи ТМИ (\mathbf{t}^{kLS});
- пропускная способность каналов передачи ТМИ от НИП ($\mathbf{v}^{LS}(t)$).

Поисковые процедуры и расчеты проводятся в два этапа: поиск начального решения задачи осуществляется в блоке 2, в блоке 3 проводится его уточнение по результатам координирующих расчетов, проводимых в блоке 4.

Поисково-расчетные процедуры по определению рационального плана формирования потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ проводятся в блоках 5, 6, 7. Поисковые процедуры и расчеты проводятся с использованием следующих показателей:

- состав телеметрических параметров в потоке телеметрических сообщений по каналам передачи ТМИ ($\mathbf{s}^{LS}(t)$);
- апостериорная энтропия телеметрических параметров РКН в потоке телеметрических сообщений ($\mathbf{h}_{aps}(t)$);
- коэффициент потери информации при формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}_H^{LS}(t)$).

Проводимые в блоках поисковые процедуры и расчеты направлены на выполнение критериев частных и обобщенного показателей [67]:

- обеспечение максимальной полноты охвата контролем телеметрических параметров РКН ($\mathbf{s}^{LS}(t) \geq \mathbf{s}^{tr}(t), \mathbf{s}^{LS}(t) \rightarrow \mathbf{s}^{ii}(t)$);
- минимизации коэффициента потери информации ($\mathbf{k}_H^{LS} \rightarrow \min_{\mathbf{k}^{prLS}}$);
- обеспечение не ухудшения апостериорной энтропии телеметрических сообщений на участках низкой динамики телеметрических параметров относительно участков высокой динамики ($h_{aps}^{sND} \leq h_{aps}^{sVD}$).

Выходными результатами блоков являются рациональные значения параметров плана формирования потока телеметрических сообщений:

- времена участков плана формирования потока телеметрических сообщений (\mathbf{t}^{prPPS});
- состав потока телеметрических сообщений ($\mathbf{s}^{LS}(t)$);
- коэффициенты прореживания сообщений телеметрических параметров РКН в потоке телеметрических сообщений ($\mathbf{k}^{prLS}(t)$).

Поисковые процедуры и расчеты проводятся в два этапа: поиск начального решения задачи осуществляется в блоке 5, в блоке 6 проводится его уточнение по результатам координирующих расчетов, проводимых в блоке 7.

В блоке 8 проводятся расчеты по определению значений показателей количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений. Выходными результатами расчетов являются следующие показатели качества СИТО запусков РКН:

- апостериорная энтропия сообщений телеметрических параметров РКН ($H_{aps}, \mathbf{h}_{aps}$);
- количество информации, содержащейся в телеметрических сообщениях РКН (I, \mathbf{i});
- коэффициент информативности сообщений телеметрических параметров РКН (J, \mathbf{j});
- коэффициент потери информации ($K_H^{LS}, \mathbf{k}_H^{LS}$).

Выходные результаты блока используются при поиске рациональных значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН в потоке телеметрических сообщений ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$) и при оценке результатов параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН.

Поисковые процедуры и расчеты рациональных значений указанных варьируемых параметров СИТО осуществляются с применением следующих частных методик [47, 48]:

- методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений;
- методика рационального распределения ресурсов каналов передачи ТМИ между НИП;
- методика формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ.

Используемое в комплексной методике двухэтапное проведение поисковых процедур позволяет отыскать взаимно адаптированные рациональные значения параметров плана задействования каналов передачи ТМИ ($\mathbf{t}^{\text{kLS}}, \mathbf{M}^{\text{mLS}}(t), \mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$) и параметров плана формирования потока телеметрических сообщений ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}, \mathbf{s}^{\text{LS}}(t), \mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$) [47, 48]. Кроме того, в комплексной методике вводится частный показатель качества – коэффициент потери информации (\mathbf{k}_H^{LS}), применение которого позволяет свести частную многомерную задачу поиска значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$) к одномерной в относительной шкале нормированного метрического пространства.

Оценка результатов решения задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН проводится в блоке 9 через анализ обобщенного ($H_{aps}(\mathbf{t}^{\text{prPPS}})$) и частных ($J(\mathbf{t}^{\text{prPPS}}), K_H^{\text{LC}}(\mathbf{t}^{\text{prPPS}})$) показателей качества функционирования СИТО.

Расчеты указанных показателей проводятся с помощью методики определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений с учетом «перекрытия» участков искажения ТМИ телеметрическими

сообщениями дублирующей выдачи через ЛЗ СКЗУ и (или) из БЗУ. При этом расчеты проводятся только для телеметрических параметров РКН, из сообщений которых потребителем может быть извлечена информация при выполнении задач ИТО в реальном масштабе времени полета РКН [47].

В связи с тем, что результаты оценки лежат в основе обоснования рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, то представляется целесообразным более подробно остановиться на существе подхода, реализованного в блоке 9.

Суть подхода основана на сравнительном анализе показателей качества СИТО запусков РКН, определенных на основе расчетных и расчетно-экспериментальных данных.

В качестве расчетных данных используются выходные результаты проводимого в блоках 2 – 7 поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО запусков РКН.

Накопление расчетно-экспериментальных данных осуществляется в ходе вычислительного эксперимента с использованием материалов регистрации ТМИ реальных запусков РКН в реальной помеховой обстановке, а также с использованием искусственной генерации случайных возмущающих воздействий различной интенсивности.

В качестве входных данных эксперимента используются файлы регистрации ТМИ запусков РКН в структуре «УС0 в двоичных единицах».

Выходными данными являются «прореженные» файлы ТМИ в структуре «УС0 в двоичных единицах».

В ходе исследования реализации эксперимента проводятся для трех подходов к формированию потока телеметрических сообщений в СИТО запусков РКН [47]:

– исследуемый в работе программный подход формирования адаптивных процедур на основе метода программной кусочно-равномерной дискретизации сообщений телеметрических параметров;

– используемый в настоящее время неадаптивный метод «жесткой коммутации» с постоянным составом телеметрических сообщений и постоянным шагом их дискретизации;

– альтернативный автоматический подход формирования адаптивных процедур на основе метода автоматической выборки дискретных сообщений телеметрических параметров.

Конкретизация используемой в экспериментальных исследованиях модели функционирования СИТО запусков РКН осуществляется посредством задания расчетных параметров наземных средств СИТО для [47]:

– реализаций программного подхода – результаты проводимого по настоящей комплексной методике поиска значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ и плана формирования потока телеметрических сообщений $(\mathbf{t}^{\text{kLS}}, \mathbf{M}^{\text{mLS}}(t), \mathbf{v}^{\text{LS}}(t), \mathbf{t}^{\text{prPPS}}, \mathbf{s}^{\text{LS}}(t), \mathbf{k}^{\text{prLS}}(t))$;

– реализаций существующего подхода – результаты проводимых по применяемой в настоящее время методике расчетов значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ и состава телеметрических параметров в потоке телеметрических сообщений $(\mathbf{t}^{\text{kLS}}, \mathbf{M}^{\text{mLS}}(t), \mathbf{v}^{\text{LS}}(t), \mathbf{s}^{\text{LS}})$;

– реализаций автоматического подхода – результаты проводимых по применяемой в настоящее время методике расчетов значений параметров пропускной способности каналов передачи ТМИ и используемых в современных СИТО управления КА значений относительного порога нечувствительности автоматических дискретизаторов функциональных параметров $(\mathbf{t}^{\text{kLS}}, \mathbf{M}^{\text{mLS}}(t), \mathbf{v}^{\text{LS}}(t), \mathbf{s}^{\text{LS}}, \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{FP}})$, где $\varepsilon_s^{\text{FP}} = \delta_s^R + 2$ (двоичные единицы) – относительный порог нечувствительности автоматических дискретизаторов функциональных параметров.

Оценка результатов параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН проводится по трем направлениям [47]:

– оценка точности решения;

- оценка влияния адаптивных процедур сбора ТМИ на основе программного подхода на качество функционирования СИТО запусков РКН;
- оценка устойчивости функционирования СИТО к нерасчетным изменениям значений телеметрических параметров РН, вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН.

Точность результатов параметрического синтеза оцениваются сравнением относительной разницы значений показателей количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений, рассчитанных на основе расчетных и расчетно-экспериментальных данных, полученных при реализациях эксперимента

$$\begin{aligned}\varepsilon_H &= \left(\left| H_{aps}^e - H_{aps}^r \right| \right) / H_{aps}^e; \\ \varepsilon_J &= \left(\left| J^e - J^r \right| \right) / J^e; \\ \varepsilon_{K_H} &= \left(\left| K_H^e - K_H^r \right| \right) / K_H^e,\end{aligned}\tag{3.34}$$

где ε_H – относительная разница значений апостериорной энтропии;

ε_J – относительная разница значений коэффициента информативности;

ε_{K_H} – относительная разница значений коэффициента потери информации.

Для оценки точности решения используются расчетно-экспериментальные данные реализаций эксперимента с использованием материалов регистрации ТМИ штатных запусков в реальной помеховой обстановке.

Оценка влияния использования программного подхода к формированию адаптивных процедур сбора ТМИ на качество функционирования СИТО запусков РКН осуществляется сравнением указанных показателей, полученных на основе расчетно-экспериментальных данных реализаций эксперимента для трех вариантов формирования потока телеметрических сообщений в СИТО запусков РКН.

Оценка устойчивости функционирования СИТО к нерасчетным изменениям значений телеметрических параметров РН, связанным с возникновением и развитием нештатных (аварийных) ситуаций на борту РКН, проводится сравнением относительных разностей значений апостериорной энтропии телеметрических параметров и коэффициентов потери информации потока

телеметрических сообщений, полученных на основе расчетно-экспериментальных данных реализаций эксперимента с прореживанием телеметрических сообщений и без него при моделировании аварийных ситуаций РКН.

Таким образом, комплексная методика параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных РКН базируется на совокупности математических описаний функционирования элементов СИТО при проведении ИТО запусков РКН и учитывает параметры информационных процессов, реализуемых всеми составными элементами системы, что позволяет согласовать изменяющиеся на различных этапах пуска и полета РКН потребности в ТМИ возможностям телеметрических линий связи.

Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в комплексной методике через последовательное решение частных задач поиска рациональных значений четырех групп варьируемых параметров СИТО запусков РКН, согласованных между собой по входным и выходным данным посредством координирующих расчетов. Решение частных поисковых задач проводится с помощью следующих методик [47, 48]:

- методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений;
- методика рационального распределения ресурсов каналов передачи ТМИ между НИП;
- методика формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ.

Используемое в комплексной методике двухэтапное проведение поисковых процедур позволяет отыскать рациональные взаимно адаптированные значения параметров плана задействования каналов передачи ТМИ и параметров плана формирования потока телеметрических сообщений.

Оценка результатов параметрического синтеза проводится через сравнительный анализ обобщенных (интегральных) и частных показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений, определенных

на основе расчетных и расчетно-экспериментальных данных. Расчетно-экспериментальные данные накапливаются при реализациях вычислительного эксперимента проводимых для трех подходов к формированию потока телеметрических сообщений в СИТО запусков РКН с использованием материалов регистрации ТМИ реальных запусков РКН.

Полученные в результате поисковых процедур значения варьируемых параметров используются для формирования рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН. Результаты оценки полученных при параметрическом синтезе результатов используются для обоснования рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Выводы по третьей главе

1. Методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений основывается на математических описаниях процессов формирования и использования ТМИ и математическом аппарате дискретной энтропии случайных процессов и событий. Методика представляет собой двухуровневую структуру: на первом уровне проводятся расчеты значений показателей количества информации в потоках сообщений отдельных телеметрических параметров, на втором – показателей количества информации телеметрических сообщений группового потока. Введение нового показателя количества информации «коэффициент потери информации» позволяет проводить оценку сообщений разнородных телеметрических параметров РКН в единой относительной шкале.

2. Методика рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП базируется на математическом описании процессов функционирования телеметрических линий связи. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется через две группы поисковых процедур рациональных значений варьируемых параметров СИТО: графика коммутации НИП в каналы передачи ТМИ и пропускной способности каналов передачи ТМИ. Использование двухэтапного поиска позволяет осуществить распределение ограниченных ресурсов пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи, адаптированное к прогнозируемой максимальной плотности потока телеметрических сообщений от НИП.

3. Методика формирования рационального потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ базируется на математических описаниях процессов формирования, передачи и использования ТМИ. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется в методике через две группы процедур поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО: параметров графика выдачи телеметрических сообщений и коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН. Использование двухэтапного поиска позволяет адаптировать состав потока телеметрических сообщений к потребностям получателя ТМИ, наличию незадействованного ресурса в

каналах передачи ТМИ и парировать искажения телеметрических данных на участках проведения динамических операций РКН. Применение при расчетах комплекса существующих и нового показателей количества информации позволяет свести многомерную частную задачу поиска значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений РКН к одномерной в относительной шкале нормированного метрического пространства.

4. Комплексная методика параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН базируется на совокупности математических описаний функционирования элементов СИТО и учитывает параметры информационных процессов, реализуемых всеми составными элементами системы, что позволяет согласовать изменяющиеся на различных этапах пуска и полета РКН потребности в ТМИ возможностям телеметрических линий связи. Математический аппарат последовательной оптимизации реализуется через последовательное решение подзадач поиска рациональных значений четырех групп варьируемых параметров, согласованных между собой посредством координирующих расчетов. Решение поисковых подзадач проводится с помощью частных методик. Используемое в методике двухэтапное проведение поисковых процедур позволяет отыскать рациональные взаимно адаптированные значения параметров плана задействования каналов передачи ТМИ и плана формирования потока телеметрических сообщений.

Оценка результатов параметрического синтеза проводится через сравнительный анализ показателей количества информации, определенных на основе расчетных и расчетно-экспериментальных данных. Расчетно-экспериментальные данные накапливаются при реализациях вычислительного эксперимента с использованием материалов регистрации ТМИ при запусках РКН.

Полученные в результате поисковых процедур значения варьируемых параметров используются для формирования рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН. Оценка результатов параметрического синтеза используется для обоснования рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

4. ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПУСКОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

4.1 Формирование расчетных исходных данных для проведения исследований по параметрическому синтезу адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения

Основными расчетными исходными данными, которые используются в комплексной методике параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН являются состав и параметры технических средств СИТО ($M_{\text{БИТС}}$, $M_{\text{НИК}}$), параметры возмущающих воздействий (G), параметры процессов формирования сообщений телеметрических параметров БИТС РКН (S_I), данные о телеметрических параметрах при функционировании РКН ($R(t)$) и потребностях получателя информации ($s^{\text{tr}}(t)$).

Расчетные исходные данные в первую очередь определяются типами РН и РБ, используемыми для проведения запуска. Используемые типы РН и РБ, ее конструкции и функционирование в полете определяют состав и параметры телеметрических параметров, состав и параметры БИТС, а реализуемые РКН баллистические схемы выведения полезной нагрузки на орбиту определяют состав НИК.

В таблице 4.1 приведены общие характеристики проведения ИТО запусков современных и перспективных РКН в период с 2006 по 2019 года.

Анализ характеристик проведения ИТО запусков РКН показывает целесообразность проведения практических исследований по параметрическому синтезу адаптивной СИТО запусков РКН на основе исходных данных запусков РКН «Протон-М», поскольку она обладает всеми характерными признаками ИТО запуска современных и перспективных РКН. Кроме того, в ЦКП РКН имеется большой объем необходимых для экспериментальных исследований данных

по результатам проведения ИТО как успешных, так и аварийных (нештатных) запусков РКН «Протон-М».

Таблица 4.1 – Характеристики проведения ИТО запусков РКН

Тип РН	Максимальное количество БРТС (на РН и РБ)	Максимальная информативность БИТС РН и РБ (Мбит/с)	Изменение информативности БИТС на АУТ	Состав ТМИ				Максимальная длительность АУТ (с)	Максимальное количество НИП на АУТ	Количество запусков	
				ММП	БМП	БЦВМ, АСН (НАП)	ТМИ через ЛЗСКЗУ			Всего	Аварийных (нештатных)
«Союз-2.1а (б)»	2	2.80	–	+	–	+	+	565	6	56	5
«Союз-1.в»	2	2.80	–	+	–	+	+	473	5	4	0
«Протон-М»	6	25.24	+	+	+	+	+	583	4	106	6
«Ангара-1.2ПП»	2	6.28	+	+	+	+	+	491	5	1	0
«Ангара-А5»	7	19.67	+	+	+	+	+	736	5	3	0

Практические исследования предполагается проводить на основе данных о телеметрических параметрах двигательных установок (ДУ), пневмо-гидросистемы питания (ПГС) ДУ и тракта управления ДУ РН с учетом поправочных коэффициентов к общему количеству телеметрических параметров РКН на различных этапах функционирования РН.

Область исходных данных для проведения практических исследований сформирована на основе данных ИТО подготовки к пуску, пуска и полета на активном участке траектории (АУТ) РКН в составе: РН «Протон-М», РБ «Бриз-М» при запусках «условно легких» КА с космодрома «Байконур».

Расчетные исходные данные по составу и параметрам технических средств СИТО при обеспечении запусков РКН «Протон-М» – «Бриз-М» представлены в таблицах 4.2 – 4.6.

Состав, основные тактико-технические характеристики (ТТХ) наземных средств СИТО приводятся в «Программе работы средств НИК РКН «Протон-М» – «Бриз-М» при запуске КА...».

Таблица 4.2 – Состав средств НИК РКН на АУТ РН и на первом сеансе связи с РБ

Средства БИТС				Средства НИК										
Место установки	Тип бортовых радиотелеметрических систем (БРТС) РКН	Индекс частоты, информативность	Интервал приема	Тип наземного приемно-регистрирующего средства	Космодром Байконур				В/ч 32103					
					ИП-1 (пл.18)	ИП-2 (пл.44)	ИП-3 (пл.97)	ИП-5 (пл.23)	ОИП-7	ОКИК-4	ОКИК-13	ОКИК-14	ОКИК-15	Об. 413
РБ	«Пирит-РБс»	Д2-114 25600 изм/с	-50 мин ÷ РГ	МПРС	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-
	«Пирит-РБс»	Д2-118 25600 изм/с		МПРС	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-
РН	3 ст.	«Скут-40»	-30 мин ÷ РГ	МПРС	2	2	1	-	1	1	-	-	-	-
	ДИ-094Б 320000 изм/с													
2 ст.	«Скут-40»	МПИ-080 320000 изм/с	-30 мин ÷ РГ	МПРС	2	2	1	-	1	-	-	-	-	-
1 ст.	«Скут-40»	МПИ-044, МПИ-090Б 320000 изм/с	-30 мин ÷ РГ	МПРС	2	3	1	-	-	-	-	-	-	-
		МПИ-044Б, МПИ-090Б 320000 изм/с												
Средства передачи информации, выделенный ресурс														
ЗССС 14Ц60(61)-01 (центр об. 413), 6 Мбит/с					-	-	-	1	1	-	-	-	-	1
ЗССС 14Ц60(61)-01 (центр ОКИК-14), 6 Мбит/с					-	-	-	-	-	1	1	1	1	-

Таблица 4.3 – Расчетные зоны радиовидимости НПРС НИК

Измерительный пункт	Составная часть РКН	Зона радиовидимости (сек от времени старта)	
		0°	3°(зона устойчивого приема)
ИП-1 (пл.18)	1 ст. РН	0 – 348	28 – 311
	2 ст. РН	0 – 472	28 – 412
	3ст. РН, РБ	0 – 490	28 – 433
ИП-2 (пл.44)	1 ст. РН	0 – 355	35 – 313
	2 ст. РН	0 – 476	35 – 416
	3ст. РН, РБ	0 – 494	35 – 438
ИП-3 (пл.97)	1 ст. РН	0 – 343	10 – 306
	2 ст. РН	0 – 469	10 – 411
	3ст. РН, РБ	0 – 487	10 – 429
ИП-5 (пл.23)	РБ	0 – 488	34 – 431
ОИП-7	2 ст. РН	285 – 684	336 – 624
	3ст. РН, РБ	285 – 733	336 – 689
ОКИК-4	3ст. РН, РБ	424 – 795	486 – 744
ОКИК-13	РБ	555 – 965	594 – 924
ОКИК-15	РБ	818 – 1231	856 – 1193

Таблица 4.4 – Основные ТТХ средств передачи информации, используемые при параметрическом синтезе адаптивной СИТО запусков РКН

Пункт эксплуатации	Тип средства передачи информации	Количество комплектов каналообразующей аппаратуры	Максимальная пропускная способность комплекта (Мбит/с)	Минимальный шаг деления ресурса (Кбит/с)
ИП-5 (пл.23)	ЗССС 14Ц61-01	2	8	128
ОИП-7	ЗССС 14Ц61-01	2	8	128
ОКИК-4	ЗССС 14Ц61-01	2	8	128
ОКИК-13	ЗССС 14Ц61-01	2	6	128
ОКИК-15	ЗССС 14Ц61-01	2	6	128
ОКИК-14	ЗССС 14Ц60-01	3	8	128
Об. 413	ЗССС 14Ц60-01	3	8	128

Сообщения телеметрических параметров РН от НПРС НИП в ЦКП РКН передаются по телеметрическим каналам в формате «УС0 в двоичных единицах» адресными структурами («цифровой индекс параметра», «значение параметра») длиной 4 байта (μ_s^{LC}).

Состав, основные тактико-технические характеристики и циклограмма работы БИТС РКН приводятся в эксплуатационной документации на РН «Протон-

М» и РБ «Бриз-М» (Ракета-носитель 8К82КМ. Техническое описание. 8К82КМ ТО ч.1, 2, 3, 5, Разгонный блок 14С43. Техническое описание. 14С43 ТО ч.1, 2, 3).

Таблица 4.5 – Данные о структуре и циклограмме функционирования БИТС РН

Место установки	Индекс основного коммутатора	Интервал работы ОКФ (с от старта)	Индекс локального коммутатора (устройства согласования)	Время задержки выдачи сообщений (с)
1 ступень	ОКФ-1/1/1	-2400 – 500	ЛКФ1-1	-
			ЛКФ2-1	-
			ЛКФ3-1	-
			«Микрон1-1»	-
			«Микрон2-1»	-
			«Микрон3-1»	-
			«Микрон4-1»	-
	ОКФ-1/2/1	-2400 – 500	ЛКФ1-1 СКЗУ	8
			ЛКФ2-1 СКЗУ	8
			ЛКФ3-1 СКЗУ	8
			«Микрон1-1» СКЗУ	8
			«Микрон2-1» СКЗУ	8
			«Микрон3-1» СКЗУ	8
			«Микрон4-1» СКЗУ	8
2 ступень	ОКФ-1/1/2	-2400 – 1000	ЛКФ1-2	-
			ЛКФ2-2	-
			«Микрон2-1»	-
			«Микрон2-2»	-
			ЛКФ1-2 СКЗУ	8
			ЛКФ2-2 СКЗУ	8
			«Микрон2-1» СКЗУ	8
			«Микрон2-2» СКЗУ	8
3 ступень	ОКФ-1/1/3	-2400 – 1200	ЛКФ1-3	-
			ЛКФ2-3	-
			ЛКФ3-3	-
			«Микрон1-3»	-
			«Микрон2-3»	-
			УЦК (БЦВМ)	-
	ОКФ-1/2/3	-2400 – 1200	ЛКФ1-3 СКЗУ	8
			ЛКФ2-3 СКЗУ	8
			ЛКФ3-3 СКЗУ	8
			«Микрон1-3» СКЗУ	8
			«Микрон2-3» СКЗУ	8
УЦК (БЦВМ) СКЗУ	8			

Таблица 4.6 – Характеристики точности датчиков и первичных преобразователей БИТС РН «Протон-М»

Индекс аппаратуры	Погрешность
АЛЕ048-20+40-64, АЛЕ048±11-32, АЛЕ048±22-32	±0,2 %
МДД-ТЕ1-250, МДД-ТЕ1-400, МДД-ТЕ1-780, МДД-ТЕ1-1000, МДД-ТЕ1-1500, ДРИ 093, ИКД6ТДа-50	±2,5 %
ДУС-Б-2Б вар. 21	±4,5 %
ДТ-100А с демпфером Д59-4, ДТ-40 с демпфером Д59-4	±1,5 %
2МД-10Т с демпфером Д59-3, 2МД-6Т с демпфером Д59-3, МД-25Т с демпфером Д59-3	±2,0 %
МД-6Т с демпфером Д59-4, МД-15Т с демпфером Д59-3, МД-250Т с демпфером Д59-3, МД-250Т с демпфером Д59-3, МД-10ТС, МД-15ТС, МД-200ТС, МД-400ТС	±2,5 %
ВТ206Б, ВТ212,	±0,5 %
ТП041-02, ТП062-12, ТТ142-04, ТТ142-07, ТЭП018-04, ТЭП018-05, ТМ293-02, ТЭМ000-04, ТМ006-04	±1,5 %
ТП018-01, ТП018-04, ТП018-05, ТП175-02, ТП175-04	±3,0 %
ТТ142-06	±2,5 %
15Е6-75-1-01, 15Е6-75-1-03, 15Е6-75-410-02, 15Е6-75-410-04, 15Е6-75-430-01, 15Е6-75-470-06, 14С76-7380-0, 813БК-7380-0-01	±0,8 %
М555, 15Л44, 8Л652, ИМ25, ИМ46, ПСП-073, ДУИ-9, ДУИ-10, ДУИ-12, ТСУ87, ПА54-1, УПМ, УУМ, ЛКФ, ОСПН, ЦЕ4113	±1,0 %
ЛХ-204, М305, М406, М413	±1,0 %

В таблицах 4.7 – 4.14 представлены расчетные исходные данные о процессах формирования сообщений телеметрических параметров РН «Протон-М» средствами БИТС.

Источниками необходимых исходных данных по телеметрическим параметрам РН являются «Программы телеметрических измерений» блоков 1-й (8С810КМ), 2-й (8С811КМ), 3-й (8С812КМ) ступеней РН, головного обтекателя (14С75.1539) и переходной системы (14С136).

Таблица 4.7 – Данные о количестве телеметрических параметров РН «Протон-М».

Место установки	Количество телеметрических параметров				Поправочный коэффициент на количество параметров
	Блок ступени РН		Этап полета		
	Полный состав	ДУ, ПГСП, тракт управления ДУ	Полный состав	ДУ, ПГСП, тракт управления ДУ	
1-я ступень	378	184	797	280	2,85
2-я ступень	168	60	419	96	4,36
3-я ступень	251	36	251	36	6,97

Таблица 4.8 – Данные о функциональных параметрах блока 8С810КМ РН «Протон-М» (локальные коммутаторы: ЛКФ1-1, ЛКФ2-1, ЛКФ3-1, «Микрон1-1», «Микрон2-1», «Микрон3-1», «Микрон4-1», «Микрон5-1»)

Имя параметра	Индекс	Тип датчика (согласующего устройства)	Количество уровней квантования	Частота опроса (Гц)
Параметры двигательной установки				
Давление окислителя на входе (до эжектора) двигателей	ОДЭ11 ÷ ОДЭ16	ВТ206Б	255	100
Давление горючего на входе (до мембраны) двигателей	ГДМ11 ÷ ГДМ16	ВТ206Б	255	100
Обороты турбонасосных агрегатов	ОТ11 ÷ ОТ16	ЛХ-204	255	100
Давление горючего до форсунок камеры сгорания	ГДФ11 ÷ ГДФ16	ВТ212	255	100
Давление газов наддува бака окислителя (после смесителя)	НОПС11 ÷ НОПС16	ВТ212	255	100
Давление окислителя перед форсунками газогенератора	ОДФГГ11 ÷ ОДФГГ16	ВТ212	255	100
Давление горючего после регулятора расхода	ГПР11 ÷ ГПР16	ВТ212	255	100
Давление горючего после 2-й ступени насоса	ГПНII-11 ÷ ГПНII-16	ВТ212	255	100
Температура воздуха около камеры сгорания	T3/1 ÷ T3/5	ТП175-02	511	12,5
	T3/6			0,3125
Температура воздуха внутри дополнительной теплозащиты	T4/1 ÷ T4/5	ТП175-02	511	12,5
	T4/6			0,3125
Температура корпуса 2-й ступени насоса горючего	T5/1 ÷ T5/5	ТП018-01	511	12,5
	T5/6			0,3125
Температура горючего перед форсунками камеры сгорания	T7/1 ÷ T7/5	ТП018-01	511	12,5
	T7/6			0,3125
Температура после смесителя бака окислителя	T8/1 ÷ T8/5	ТП041-02	511	12,5
	T8/6			0,3125
Температура после газогенератора наддува	T9A/1 ÷ T9A/5	ТП041-02	511	12,5
	T9A/6			0,3125
Параметры пневмогидравлической системы подачи				
Давление газовой подушки баков окислителя	БО11	2МД-10Т	255	100
Давление газовой подушки баков горючего	БГ11 ÷ БГ16	2МД-6Т	255	100
Давление в магистрали наддува на входе в бак окислителя	НБО11	МД-25Т	255	100
Давление газа наддува баков горючего после газогенератора	НГПГ11 ÷ НГПГ16	МД-25Т	255	100
Температура окислителя после бака в магистрали	T11/1 ÷ T11/3	ТП062-12	511	12,5
Температура горючего после баков	T12/1 ÷ T12/5	ТП062-12	511	12,5
	T12/6			0,3125

Температура газа на входе в бак окислителя после мембраны	T13/1	ТТ142-07	511	12,5
Температура газа после обратного клапана на входе в баки горючего	T14/1 ÷ T14/6	ТТ142-04	511	12,5
Температура газовой подушки бака окислителя	T15/1	15Е6-75-1-03	511	12,5
Температура газовой подушки баков горючего	T16/1 ÷ T16/6	15Е6-75-1-03	511	12,5
Параметры системы управления				
Угол поворота привода системы поддержания давления	УПР11 ÷ УПР16	15Л44	255	100
Угол поворота привода системы управления расходом топлива	ПДС11 ÷ ПДС16	ИМ25	255	100

Таблица 4.9 – Данные о сигнальных параметрах блока 8С810КМ РН «Протон-М» (локальные коммутаторы: ЛКФ1-1, ЛКФ2-1, ЛКФ3-1)

Имя параметра	Индекс	Частота опроса (Гц)
Параметры системы управления		
Управляющий сигнал дросселирования привода системы поддержания давления	СПД Д1-А ÷ СПД Д6-А	100
Управляющий сигнал форсирования привода системы поддержания давления	СПД Ф1-А ÷ СПД Ф6-А	100
Управляющий сигнал на входе привода системы управления расходом топлива	СУРТ О.1-А ÷ СУРТ О.6-А, СУРТ З.1-А ÷ СУРТ З.6-А	100
Сигнал срабатывания автоматики двигательной установки	РАБ.ПРЛ7-1к-А, РАБ.ПРЛ5-1к-А, РАБ.ПРЛЗЖ-1к-А, РАБ.ПРЛ7-2к-А, РАБ.ПРЛ5-2к-А, РАБ.ПРЛЗЖ-2к-А, РАБ.ПРЛ7-3к-А, РАБ.ПРЛ5-3к-А, РАБ.ПРЛЗЖ-3к-А	100
Аварийный сигнал падения давления в камере сгорания	СД1.1-А ÷ СД6.1-А; СД1.2-А ÷ СД6.2-А; СД1.3-А ÷ СД6.3-А	100

Таблица 4.10 – Данные о функциональных параметрах блока 8С811КМ РН «Протон-М» (локальные коммутаторы: ЛКФ1-2, ЛКФ2-2, «Микрон2-1», «Микрон2-2»)

Имя параметра	Индекс	Тип датчика (согласующего устройства)	Количество уровней квантования	Частота опроса (Гц)
Параметры двигательной установки				
Давление окислителя до эжектора на входе в двигатель	ОДЭ21 ÷ ОДЭ24	МД-15ТС	255	100
Давление горючего до эжектора на входе в двигатель	ГДЭ21 ÷ ГДЭ24	МД-10ТС	255	100
Давление окислителя после насоса	ОПН21 ÷ ОПН24	МД-400ТС	255	100
Давление мягого газа окислителя до форсунок камер сгорания	ОДФК21 ÷ ОДФК24	МД-200ТС	255	100
Давление в пневмостартере на двигателе 3	ПСТ23	МД-250ТС	255	100
Температура мягого газа окислителя до форсунок камер сгорания двигателя	Т-ОДФК21 ÷ Т-ОДФК24	ТТ142-02	511	12,5
Температура газа окислителя после смесителя	Т-ПСНО	ТТ142-04	511	12,5
Температура газа горючего после газогенератора	Т-ПГНГ	ТТ142-04	511	12,5
Параметры пневмогидравлической системы питания				
Давление газа наддува на входе в бак окислителя	НБО21	ДТ-40	255	100
Давление газа наддува на входе в бак горючего	НБГ21	МД-25Т	255	100
Давление газовой подушки баков окислителя и горючего	БО21, БГ21	2МД-6Т	255	100
Давление в газовой и жидкостной полостях демпфера	ДГД, ДЖД	МД-15Т	255	100
Температура окислителя после бака	Т100	ТП062-12	511	12,5
Температура горючего после бака	Т101/1, Т101/2	ТП062-12	511	12,5
Температура газа наддува на входе в баки окислителя и горючего	Т106, Т107	ТТ142-06	511	12,5
Температура газовой подушки баков окислителя и горючего	Т108, Т109	15Е6-75-1-03	511	12,5
Параметры системы управления				
Угол поворота привода системы поддержания давления	УПР21 ÷ УПР24	ПОС на 8Л652	255	100
Угол поворота привода системы управления расходом топлива	ПДСП-1 ÷ ПДСП-4	ПОС на ИМ46	255	100

Таблица 4.11 – Данные о сигнальных параметрах блока 8С811КМ РН «Протон-М» (локальные коммутаторы: ЛКФ1-2, ЛКФ2-2)

Имя параметра	Индекс	Частота опроса (Гц)
Параметры системы управления		
Управляющий сигнал форсирования на входе привода системы поддержания давления	СПД Ф1-Б, СПД Ф2-Б, СПД Ф3-Б, СПД Ф4-Б	100
Управляющий сигнал дросселирования на входе привода системы поддержания давления	СПД Д1-Б, СПД Д2-Б, СПД Д3-Б, СПД Д4-Б	100
Управляющий сигнал открытия на входе привода системы управления расходом топлива	СУРТ О.1-Б, СУРТ О.2-Б, СУРТ О.3-Б, СУРТ О.4-Б	100
Управляющий сигнал закрытия на входе привода системы управления расходом топлива	СУРТ З.1-Б, СУРТ З.2-Б, СУРТ З.3-Б, СУРТ З.4-Б	100

Таблица 4.12 – Данные о функциональных параметрах блока 8С812КМ РН «Протон-М» (локальные коммутаторы: ЛКФ1-3, ЛКФ2-3, «Микрон1-3», «Микрон2-3»)

Имя параметра	Индекс	Тип датчика (согласующего устройства)	Количество уровней квантования	Частота опроса (Гц)
Параметры маршевого двигателя				
Давление окислителя до эжектора	ОДЭ31	МД-15ТС (Д59-3)	255	100
Давление горючего до эжектора	ГДЭ31	МД-10ТС (Д59-3)	255	100
Давление окислителя после насоса	ОПН31	МД-400ТС (Д59-3)	255	100
Давление окислителя до форсунок КС	ОДФК31	МД-200ТС (Д59-4)	255	100
Температура окислителя до форсунок КС	Т-ОДФК31	ТТ142-02	255	50
Давление в пневмостартере	ПСТ31	МД-250ТС (Д59-4)	255	100
Параметры рулевого двигателя				
Давление окислителя до насоса рулевого блока	ОДНР31	МД-15ТС (Д59-3)	255	100
Давление горючего до насоса рулевого блока	ГДНР31	МД-10ТС (Д59-3)	255	100
Давление окислителя после насоса рулевого блока	ОПНР31	МД-100ТС (Д59-3)	255	100
Давление горючего после насоса рулевого блока	ГПНР31	МД-100ТС (Д59-1)	255	100
Давление мятого газа за турбиной окислителя рулевого блока	ДМГО31	МД-10ТС (Д59-3)	255	100

Продолжение таблицы 4.12

Температура мятого газа за турбиной окислителя рулевого блока	T-MFO31	ТТ142-04	255	50
Параметры системы питания и наддува				
Давление в баках	БО31, БГ31	2МД-6Т	255	100
Давление газа наддува на входе (после обратного клапана) в баки	НБО31, НБГ31, ГПШ31	МД-10Т	255	100
Температура газа наддува бака горючего после смесителя	T-ГПС31	ТТ142-06	255	50
Температура горючего на входе в двигатель	T-ГДД	ТП062-12	511	12,5
Температура окислителя на входе в двигатель	T-ОДД	ТП018-05	511	12,5
Температура газовой подушки баков	T201	15E6-75-1-03	511	12,5
	T202	15E6-75-1-01	511	12,5
Температура газа на входе в баки после обратного клапана	T203, T204	ТТ142-04	511	12,5
Температура компонентов перед мембраной рулевого двигателя	T205, T206	ТП018-05	511	12,5
Параметры системы управления				
Угол поворота привода системы поддержания давления	УПР31	ПОС на 8Л635	255	50
Угол поворота привода системы управления расходом топлива	ПДСШ	ПОС на ИМ46	255	50

Таблица 4.13 – Данные о сигнальных параметрах блока 8С812КМ РН «Протон-М» (локальные коммутаторы: ЛКФ1-3, ЛКФ2-3)

Имя параметра	Индекс	Частота опроса (Гц)
Параметры системы управления		
Управляющий сигнал на входе привода системы поддержания давления	СПД Ф1-В, СПД Д1-В	100
Управляющий сигнал на входе привода системы управления расходом топлива	СУРТО.1-В, СУРТЗ.1-В	100

Таблица 4.14 – Данные о сообщениях цифровых устройств блока 8С812КМ РН «Протон-М»

Имя параметра	Индекс	Частота опроса (Гц)
Выходы БЦВМ	УЦК1, УЦК2, УЦК3	1000
16-ти разрядное информационное слово кадра НАП	НАП1Р ÷ НАП16Р	100

В таблицах 4.15 – 4.23 представлены расчетные исходные данные о телеметрических параметрах при функционировании РКН и использовании ТМИ получателем. Источниками исходных данных являются «Техническое описание ракеты-носителя 8К82КМ», «Расчет баллистический. Изделие 8К82КМ при запуске КА 14Ф136» и «Инструкция по оценке работы бортовых систем в полете изделие 8К82КМ».

Таблица 4.15 – Данные о циклограмме основных событий пуска и полета РН «Протон-М»

№ команды	Наименование команды (операции)	Индекс команды	Время от КП (с)	Время от ОТП (с)
	Переход на бортовое питание		-120	-
0	Окончание точного приведения	ОТП	-5,013	0
1	Запуск двигателей 1-й ступени	ПМГ1, ПМО1	-1,731	3,283
2	Перевод двигателей на настроечный уровень тяги	ГСТ1	-0,097	4,916
3	Контакт подъема	КП	0	5,013
3Ф-1	Перевод двигателей на режим Ф1		1,0	6,013
3К	Разрешение регулирования двигателей по тракту СУРТ		5,0	10,013
3Ф	Разрешение регулирования двигателей приводом СПД		6,0	11,013
F4К	Перевод двигателей 1-й ступени на режим Д2		107,643	112,656
4	1-я команда на запуск двигателей 2-й ступени	ПМГ21	115,377	120,390
4А	2-я команда на запуск двигателей 2-й ступени	ПМО21	118,277	123,290
5-2	Разделение трубопроводов 1-й и 2-й ступеней		118,577	123,590
5	Команда на выключение двигателей 1-й ступени	ВД11	119,627	124,640
8	Перестройка двигателей 2-й ступени на главную ступень тяги	ГСТ2	119,927	124,940
8Ф	Разрешение регулировки двигателей приводом СПД		120,927	125,940
8К	Разрешение регулирования двигателей по тракту СУРТ		124,627	129,640
10	Запуск рулевого двигателя 3-й ступени	ПМО32	323,781	328,794
		ПМГ32	323,814	328,827
11	Команды на выключение двигателей 2-й ступени	ВД21	326,448	331,461
12		ВД22	326,601	331,614
13	Разделение 2-й и 3-й ступеней		327,181	332,194
14	Команда на запуск маршевого двигателя 3-й ступени	ПМО31	329,581	334,594
14А		ПМГ31	332,581	337,594
15	Перестройка маршевого двигателя 3-й ступени на главную ступень тяги	ГСТ3	334,381	339,394
15ф	Разрешение регулировки двигателей по сигналам системы наведения		335,381	340,394

15К	Разрешение регулирования двигателя по тракту СУРТ		335,381	340,394
9	Команда на сброс головного обтекателя		344,000	349,013
17	Команда на выключение маршевого двигателя 3-й ступени	ПК	567,968	572,981
19	Команда на выключение рулевого двигателя 3-й ступени	ГК	579,929	584,942
19-1А	Отделение космической головной части	РКЗ	579,995	585,008
19-2	Запуск тормозных двигателей 3-й ступени		580,093	585,106
19-3	Сброс давления из баков горючего 3-й ступени		580,094	585,107

Таблица 4.16 – Данные о функционировании системы управления РН «Протон-М» (функциональные параметры)

Индекс параметра	Исходное состояние				Рабочий режим			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
Система поддержания давления								
УПР11 ÷ УПР16	-180 ÷ $t_{кп+6}$	$t_{отп} ÷ t_{кп+6}$	0	–	$t_{кп+6} ÷ t_5$	$t_{кп+6} ÷ t_5$	70	4
УПР21 ÷ УПР24	-180 ÷ $t_4+5,55$	$t_{отп} ÷ t_4+5,55$	0	–	$t_4+5,55 ÷ t_{12}$	$t_4+5,55 ÷ t_{12}$	23	0.9
УПР31	-120 ÷ $t_{10}+11,6$	$t_{отп} ÷ t_{10}+11,6$	0	–	$t_{10}+11,6 ÷ t_{17}$	$t_{10}+11,6 ÷ t_{17}$	14	4.3
Система управления расходом топлива								
ПДС11 ÷ ПДС16	-180 ÷ $t_{кп+5}$	$t_{отп} ÷ t_{кп+5}$	0	–	$t_{кп+5} ÷ t_5$	$t_{кп+5} ÷ t_5$	10	1
ПДСII-1 ÷ ПДСII-4	-180 ÷ $t_4+9,25$	$t_{отп} ÷ t_4+9,25$	0	–	$t_4+9,25 ÷ t_{12}$	$t_4+9,25 ÷ t_{12}$	16	1
ПДСIII	-180 ÷ $t_{15}+1$	$t_{отп} ÷ t_{15}+1$	0	–	$t_{15}+1 ÷ t_{17}$	$t_{15}+1 ÷ t_{17}$	18	1,5

Таблица 4.17 – Данные о функционировании системы управления РН «Протон-М» (сигнальные параметры)

Индекс параметра	Время функционирования (с)	Время контроля (с)	Частота срабатывания (Гц)	Количество срабатываний
Система поддержания давления				
СПД Д1-А ÷ СПД Д6-А СПД Ф1-А ÷ СПД Ф6-А	$t_{кп+6}$ ÷ t_5	$t_{отп}$ ÷ t_5	30,5	–
СПД Ф1-Б ÷ СПД Ф4-Б СПД Д1-Б ÷ СПД Д4-Б	$t_4+5,55$ ÷ t_{12}	$t_{отп}$ ÷ t_{12}	3,8	–
СПД Ф1-В, СПД Д1-В	$t_{10}+11,6$ ÷ t_{17}	$t_{отп}$ ÷ t_{17}	3,8	–
Автоматика				
СД1.1-А ÷ СД6.1-А; СД1.2-А ÷ СД6.2-А; СД1.3-А ÷ СД6.3-А	t_1 ÷ t_5	$t_{отп}$ ÷ t_5	–	2
РАБ.ПРЛ7-1к-А, РАБ.ПРЛ5-1к-А, РАБ.ПРЛ7-2к-А, РАБ.ПРЛ5-2к-А, РАБ.ПРЛ7-3к-А, РАБ.ПРЛ5-3к-А	t_{f4k} ÷ t_5	t_{f4k} ÷ t_5	–	2
РАБ.ПРЛЗЖ-1к-А, РАБ.ПРЛЗЖ-2к-А, РАБ.ПРЛЗЖ-3к-А	$t_{кп+101}$ ÷ t_{f4k}	$t_{кп+101}$ ÷ t_{f4k}	–	2
Система управления расходом топлива				
СУРТ О.1-А ÷ СУРТ О.6-А, СУРТ 3.1-А ÷ СУРТ 3.6-А	$t_{кп+5}$ ÷ t_5	$t_{кп+5}$ ÷ t_5	3,8	–
СУРТ О.1-Б, ÷ СУРТ О.4-Б СУРТ 3.1-Б, ÷ СУРТ 3.4-Б	$t_4+9,25$ ÷ t_{12}	$t_4+9,25$ ÷ t_{12}	3,8	–
СУРТО.1-В, СУРТ3.1-В	$t_{15}+1$ ÷ t_{17}	$t_{15}+1$ ÷ t_{17}	3,8	–

Таблица 4.18 – Данные о функционировании ДУ и ПГСП 1-й ступени РН «Протон-М» (исходное состояние и запуск)

Индекс параметра	Исходное состояние				Запуск ДУ			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
ОДЭ11÷16	-180 ÷	$t_{отп}$ ÷	2	0,8	t_1 ÷	t_1 ÷	83	0,13
ГДМ11÷16	t_1	t_1	2	0,8	$t_1+2,5$	$t_1+2,5$	102	0,06

T11/1÷3, T12/1÷6, T5/1÷6, T7/1÷6, T3/1÷6, T4/1÷6	-180 ÷ t ₁	t _{отп} ÷ t ₁	2	10	t ₁ ÷ t _{1+2,5}	t ₁ ÷ t _{1+2,5}	2	10
БО11			2	0,8			14	1,8
БГ11÷16			2	0,8			16	1,8
ГДФ11÷16			0	–			75	0,09
ОТ11÷16			0	–			53	0,07
ГПН211÷16			0	–			114	0,05
ГПР11÷16			0	–			76	0,09
ОДФГГ11÷16			0	–			85	0,09
НОПС11÷16			2	0,8			87	0,1
НППГ11÷16			2	0,8			22	0,18
НБО11			2	0,8			95	0,13
T8/1÷6			2	10			68	2,5
T9A/1÷6			2	10			47	2,5
T13/1			2	10			119	2,5
T14/1÷6			2	10			39	2,5
T15/1			2	10			12	1,2
T16/1÷6			2	10			11	1,52

Таблица 4.19 – Данные о функционировании ДУ и ПГСП 1-й степени РН «Протон-М» (главная ступень тяги и останов ДУ)

Индекс параметра	Главная ступень тяги				Останов ДУ			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
ОДЭ11÷16	t _{1+2,5} ÷ t ₅	t _{1+2,5} ÷ t ₅	32	10	t ₅ ÷ t _{кп} + 500	t ₅ ÷ t _{5+0,5}	27	0,4
ГДМ11÷16			17	34			15	0,28
БО11			40	12			22	2
БГ11÷16			34	36			8	1
ГДФ11÷16			8	1,5			124	0,16
ОТ11÷16			4	1,5			124	0,46
ГПН211÷16			9	1,5			129	0,12
ГПР11÷16			8	1,5			102	0,16
ОДФГГ11÷16			6	1,5			96	0,12
НОПС11÷16			5	1,8			52	0,42
НППГ11÷16			13	8			59	0,2
НБО11			14	7			54	0,48
T11/1÷3			52	5,2			50	6,6
T12/1÷6			2	10			64	8,2
T5/1÷6			2	10			5	76

T7/1÷6	$t_1+2,5 \div t_5$	$t_1+2,5 \div t_5$	32	22	$t_5 \div t_{кп} + 500$	-	34	30
T3/1÷6			2	10			2	10
T4/1÷6			12	42			20	22
T8/1÷6			32	14			35	12
T9A/1÷6			32	14			3	24
T13/1			168	22			54	15
T14/1÷6			122	24			6	1,2
T15/1			58	12			124	1,2
T16/1÷6			54	28			34	1,2

Таблица 4.20 – Данные о функционировании ДУ и ПГСП 2-й ступени РН «Протон-М» (исходное состояние и запуск)

Индекс параметра	Исходное состояние				Запуск ДУ			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
ОДЭ21÷24	$-180 \div t_4$	$t_4-5 \div t_4$	13	2,2	$t_4 \div t_4+5,25$	$t_4 \div t_4+5,25$	58	0,12
ГДЭ21÷24			3	2,2			41	0,08
T100, T101/1, 2			4	5,2			4	5,2
ПСТ23			2	0,12			87	0,74
БО21			9	40,5			10	1,2
БГ21			14	40,5			6	1,2
ОДФК21÷24			0	-			77	0,15
ОПН21÷24			0	-			79	0,2
Т-ПСНО			2	10			110	3
Т-ПГНГ			2	10			92	3
НБО21			13	20			51	1,2
НБГ21			5	20			38	0,13
ДГД			100	9			55	3
ДЖД			7	3,7			56	0,14
БЗД			9	19			3	5,2
Т-ОДФК21÷24			2	10			127	3,6
T106			2	8,4			112	5,2
T107			2	8,4			129	5,2
T108			2	8,4			30	5,2
T109			2	8,4			8	5,2

Таблица 4.21 – Данные о функционировании ДУ и ПГСП 2-й ступени РН «Протон-М» (главная ступень тяги и останов двигательных установок)

Индекс параметра	Главная ступень тяги				Останов ДУ			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
ОДЭ21÷24	$t_4+5,25 \div t_{11}$	$t_4+5,25 \div t_{11}$	8	6	$t_{11} \div t_{КП} + 1000$	$t_{11} \div t_{11+1}$	36	1,8
ГДЭ21÷24			8	7			6	1,8
ПСТ23			16	64			3	100
БО21			12	2,4			7	1,2
БГ21			6	1,42			5	1,2
ОДФК21÷24			6	0,5			116	0,25
ОПН21÷24			8	0,5			124	0,14
НБО21			24	6			72	0,7
НБГ21			8	6			34	0,28
ДГД			4	2,8			24	1,8
ДЖД			24	3,2		34	1,62	
БЗД			92	420		92	420	
Т-ПСНО			32	16		6	2,6	
Т-ПГНГ			44	16		2	2,6	
T100, T101/1, 2			3	12		40	28	
Т-ОДФК21÷24			85	5,2		92	1,4	
T106			86	24		18	2,4	
T107			58	18		16	1,4	
T108			38	8		96	0,7	
T109			8	6		22	0,32	

Таблица 4.22 – Данные о функционировании ДУ и ПГСП 3-й ступени РН «Протон-М» (исходное состояние и запуск)

Индекс параметра	Исходное состояние				Запуск ДУ			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
ОДНР31	$-180 \div t_{10}$	$t_{10}-3 \div t_{10}$	5	1,54	$t_{10} \div t_{14}+5,33$	$t_{10} \div t_{14}+5,33$	23	0,12
ГДНР31			2	1,54			8	0,14
ОПНР31			0	–			122	0,47
ГПНР31			0	–			147	0,47

Продолжение таблицы 4.22

ДМГОЗ1	-180 ÷ t ₁₀	t ₁₀₋₃ ÷ t ₁₀	13	55	t ₁₀ ÷ t _{14+5,33}	t ₁₀ ÷ t _{14+5,33}	114	0,33
ГПШЗ1			20	66			34	0,1
НБОЗ1			3	37			23	0,53
НБГЗ1			11	37			18	0,53
T206			8	12			8	12
T205			8	12			8	12
T-МГОЗ1			8	6			120	11,7
T-ОДФКЗ1			8	6			124	2,5
T-ГПСЗ1			3	0,8			124	1,2
БОЗ1			3	39,5			13	1,8
БГЗ1			19	39,5			5	1,8
T201			2	8			25	5,2
T202			2	8			4	5,2
T203			10	8			75	6
T204			10	8			94	6,8
ОДЭЗ1			-180 ÷ t ₁₄	t ₁₄₋₄ ÷ t ₁₄			6	2,5
ГДЭЗ1	3	2,5			8	0,2		
ОПНЗ1	0	–			77	0,12		
ОДФКЗ1	0	–			74	0,12		
ПСТЗ1	0	–			106	1,06		
T-ОДД	4	10			4	10		
T-ГДД	4	10			4	10		

Таблица 4.23 – Данные о функционировании ДУ и ПГСП 3-й степени РН «Протон-М» (главная степень тяги и останов двигательных установок)

Индекс параметра	Главная степень тяги				Останов ДУ			
	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)	Время режима (с)	Время оценивания (с)	Максимальный диапазон изменения (дв.ед.)	Длительность переходного процесса (с)
ОДНРЗ1	t _{14+5,33} ÷ t ₁₉	t _{14+5,33} ÷ t ₁₉	4	4,2	t ₁₉ ÷ t _{КП} +1200	t ₁₉ ÷ t ₁₉₊₂	10	0,6
ГДНРЗ1			3	7,2			10	0,7
ОПНРЗ1			8	5,8			110	0,6
ГПНРЗ1			7	5,8			140	0,6
ДМГОЗ1			6	1,3			58	0,1
ГПШЗ1			2	3,2			54	7,6
НБОЗ1			2	3,8			32	1
НБГЗ1			2	3,8			16	1
БОЗ1			6	18			15	1,8
БГЗ1			2	18			5	1,8
T206			2	12			6	12
T205			2	12			8	12
T-МГОЗ1			40	18			24	1,6

Продолжение таблицы 4.23

Т-ОДФКЗ1	$t_{14+5,33}$ $\div t_{19}$	$t_{14+5,33}$ $\div t_{19}$	24	2,6	$t_{19} \div t_{КП}$ $+1200$	-	96	1,2
Т-ГПСЗ1			34	2,2			2	4
Т201			14	2,2			94	0,8
Т202			6	3			20	0,8
Т203			46	24			20	260
Т204	46	24	20	260				
ОДЭЗ1			2	16	t_{17} $\div t_{КП}+12$ 00	$t_{17} \div$ t_{17+12}	6	1,6
ГДЭЗ1			5	16			3	1,6
ОПНЗ1			3	16			138	0,2
ОДФКЗ1			4	12		132	0,1	
ПСТЗ1			4	240		4	240	
Т-ОДД			14	80		-	6	8
Т-ГДД			14	80			6	8

Расчетные интервалы искажений сообщений телеметрических параметров при проведении динамических операций отделения составных частей РКН представлены в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Данные об искажениях ТМИ РН «Протон-М»

ТМИ БИТС РН	Интервал искажения ТМИ при проведении динамической операции (с от КП)		
	Разделение 1-й и 2-й ступеней	Разделение 2-й и 3-й ступеней	Сброс створок ГО
1-й ступени	$t_{5-2} \div t_{5-2}+3,5$	-	-
2-й ступени	$t_{5-2} \div t_{5-2}+2,4$	$t_{13} \div t_{13}+2,2$	-
3-й ступени	$t_{5-2} \div t_{5-2}+2,3$	$t_{13} \div t_{13}+1,8$	$t_9 \div t_9+1.6$

Таким образом, сформированные расчетные исходные данные в рамках проведения исследования по параметрическому синтезу адаптивной СИТО запуска РКН представляют собой область данных, отражающих состав и параметры технических средств СИТО, характеристики процесса формирования сообщений телеметрических параметров БИТС РКН, функционирование РКН при пуске и в полете, проведение получателем ТМИ анализа функционирования РКН, возмущающие воздействия на поток телеметрических сообщений. Сформированные данные позволяют провести расчеты по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН.

4.2 Определение рациональной программы сбора телеметрической информации при обеспечении запусков ракет космического назначения

В процессе исследований по параметрическому синтезу адаптивной СИТО запусков перспективных РКН проведено формирование расчетных данных, составляющих рациональную программу сбора ТМИ при проведении первого сеанса ИТО пуска и полета РКН в составе РН «Протон-М» – РБ «Бриз-М»:

\mathbf{t}^{KLS} – вектор времен коммутации НИП в телеметрические линии связи;

$\mathbf{M}^{\text{mLS}}(t)$ – матрица признаков коммутации НИП в телеметрических линиях связи;

T^{SLS} – время выдачи сообщений телеметрических параметров РКН в каналы передачи ТМИ;

$\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$ – вектор пропускной способности каналов передачи ТМИ;

$\mathbf{t}^{\text{prPPS}}$ – вектор времен действия программ формирования потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ;

$\mathbf{s}^{\text{LS}}(t)$ – вектор состава сообщений телеметрических параметров РКН, выдаваемых в каналы передачи ТМИ на интервалах действия программ формирования потока телеметрических сообщений;

$\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$ – вектор коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН в каналах передачи ТМИ;

$\nu_s^{\text{LS}}(t)$ – плотность информационного потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ;

$\mathbf{h}_{\text{aps}}(t)$ – вектор апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН;

$\mathbf{k}_{\text{H}}^{\text{LS}}(t)$ – вектор коэффициентов потери информации сообщений телеметрических параметров РКН;

$H_{\text{aps}}(t)$ – апостериорная энтропия потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО;

$K_H^{LS}(t)$ – коэффициент потери информации потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО.

На основе результатов поиска рациональных значений параметров плана задействования каналов передачи ТМИ, не имеющих четкого аналитического описания: времен (t^{kLS}) и признаков ($M^{mLS}(t)$) коммутации НИП в телеметрические линии связи, сформирован график коммутации НИП в каналы передачи ТМИ телеметрических линий связи (рисунок 4.1).

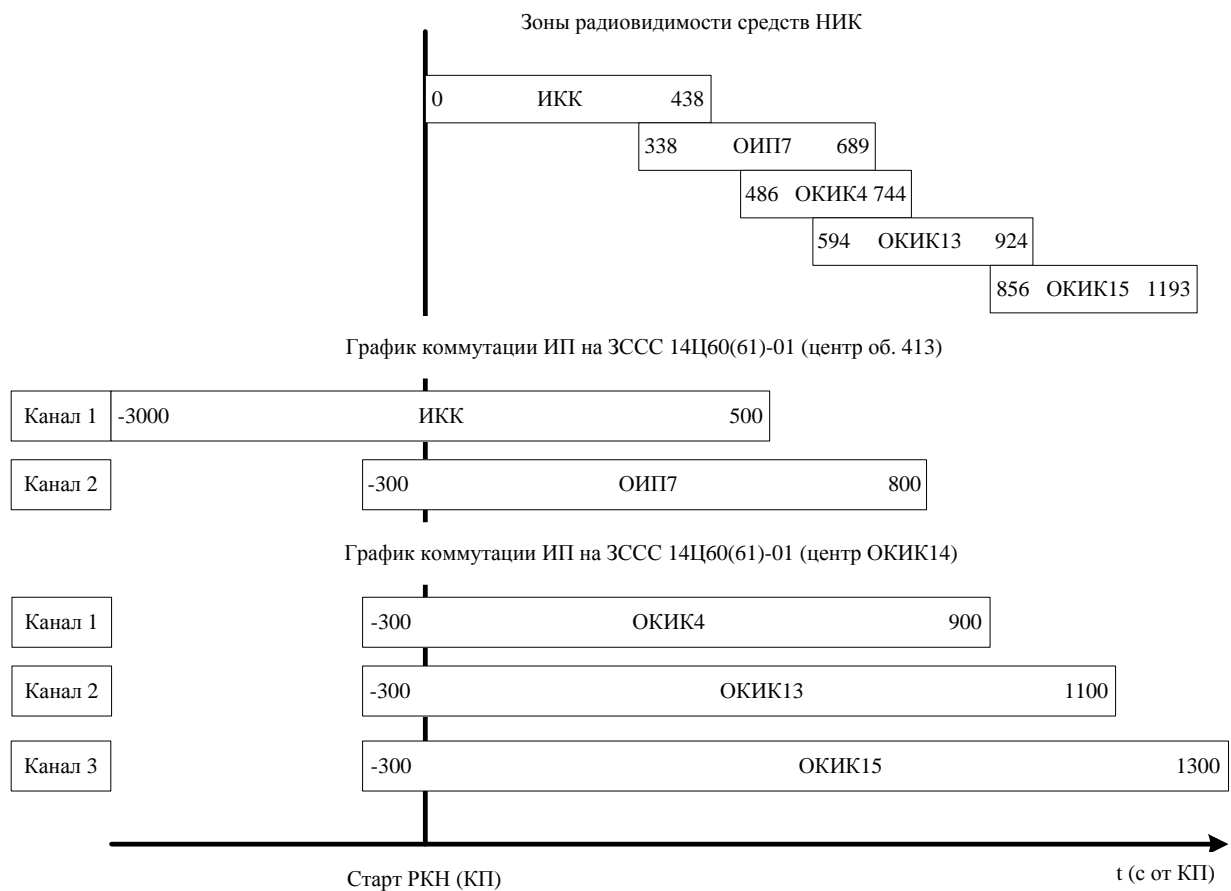


Рисунок 4.1 – График коммутации НИП в телеметрические линии связи

Выполнение критерия «непрерывности передачи ТМИ РКН в ЦКП РКН» ($T^{SLS} = T^{ZRV}$) обеспечено пересечением временных интервалов коммутации НИП в телеметрические линии связи на интервалах зон радиовидимости средств НИК РКН, обеспечивающих устойчивый прием ТМИ от БИТС РКН по радиоканалу. Значения варьируемых параметров графика коммутации НИП в телеметрические

линии на первом сеансе ИТО подготовки к пуску, пуска и полета РКН составляют:

$$\mathbf{t}^{\text{KLS}} = \{-3000 \div 500 \quad -300 \div 800 \quad -300 \div 900 \quad -300 \div 1100 \quad -300 \div 1300\} \text{ с от КП,}$$

$$\mathbf{M}^{\text{mLS}} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix}.$$

Что обеспечивает доставку сообщений телеметрических параметров в пределах зон устойчивого приема наземных средств:

- ТМИ первой ступени РН «Протон-М» с минус 1800 с по 313 с;
- ТМИ второй ступени РН «Протон-М» с минус 1800 с по 624 с;
- ТМИ третьей ступени РН «Протон-М» с минус 1800 с по 744 с;
- ТМИ РБ «Бриз-М» с минус 3000 с по 1193 с.

Анализ рисунка 4.1 показывает, что сформированный график коммутации НИП в телеметрические линии связи обеспечивает непрерывность доставки телеметрических сообщений в ЦКП РКН на первом сеансе ИТО пуска и полета РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» в пределах зоны радиовидимости средств НИК, приведенных в таблице 4.2, без переключения НИП в каналах передачи ТМИ.

В результате расчетов по рациональному распределению ресурсов пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи ССС «Приморка» определен вектор пропускной способности каналов передачи ТМИ ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$) при проведении первого сеанса ИТО запуска РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М». Значения пропускной способности каналов передачи ТМИ составляют: $\mathbf{v}^{\text{LS}} = \{3,375 \quad 2,625 \quad 2,75 \quad 1,625 \quad 1,625\}$ Мбит/с.

Выполнение критерия «пропорциональности распределения ограниченной пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ относительно плотности потока телеметрических сообщений от НИП» обеспечено максимизацией коэффициента пропорциональности загрузки, значение которого составляет $k_{\text{загр}} = 0,97$ при максимальной плотности потока сообщений медленноменяющихся телеметрических параметров РН от НИП по результатам начального решения и координирующих расчетов $\mathbf{v}_{nr}^p = \{1,75 \quad 1,13 \quad 0,61 \quad 0 \quad 0\}$ Мбит/с

постоянных потоков сообщений цифровых массивов РН $v_{CM}^{LS} = 147,2$ Кбит/с и ТМИ РБ $v_{RB}^{LS} = 819,2$ Кбит/с.

На основе результатов проведенных расчетов по рациональному распределению пропускной способности телеметрических линий связи получены математические описания зависимости пропускной способности каналов передачи ТМИ от соотношения количества контролируемых параметров на характерных участках полета РКН и структуры информационного потока (рисунок 4.2).

На графике приведены зависимости распределения пропускной способности телеметрической линии (в % от располагаемой пропускной способности) от соотношения количества контролируемых параметров на характерных участках полета РН (в % от наиболее информационного этапа полета) для трех типов РН: «Союз-2.1а (б, в)» ($v_{CM}^{LS} \approx 13\%$ от v^{LSrasp} ССС «Приморка»), «Протон-М» ($v_{CM}^{LS} \approx 17\%$ от v^{LSrasp}) и «Ангара» ($v_{CM}^{LS} \approx 22\%$ от v^{LSrasp}).

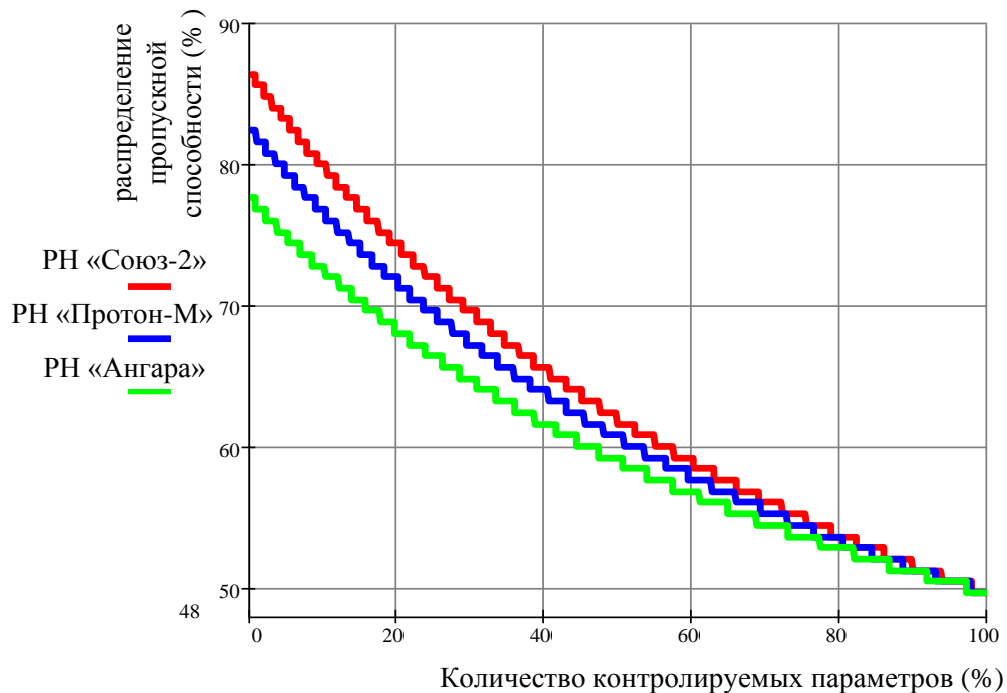


Рисунок 4.2 – График зависимости пропускной способности каналов передачи ТМИ от соотношения количества контролируемых параметров на характерных участках полета РКН

Для существующих телеметрических линий связи соотношение пропускной способности каналов передачи ТМИ (в % от v^{LSrasp}) пристартовых и трассовых НИП при запуске РН составляет:

- легкого класса «Союз-2.1в» $\approx 54\%$ и $\approx 46\%$;
- легкого класса «Ангара-1.2» $\approx 57\%$ и $\approx 43\%$;
- среднего класса «Союз-2.1а(б)» $\approx 59\%$ и $\approx 41\%$;
- тяжелого класса «Протон-М» $\approx 56\%$ и $\approx 44\%$;
- тяжелого класса «Ангара-А5» $\approx 62\%$ и $\approx 38\%$.

Анализ полученных математических описаний позволяет качественно оценить степень влияния факторов, связанных с используемой при запуске РН, ее компоновочной схемы, оснащением БРТС, БЦВМ и АСН, циклограммой основных событий и параметров реализуемой баллистической схемы выведения орбитального блока, на распределение пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП.

Анализ графиков, приведенных на рисунке 4.2, показывает, что:

- при проведении ИТО запусков РН, имеющих компоновочную схему «пакет-тандем» («Союз-2.1а(б)» и «Ангара-А5»), требуется выделять больше ресурса пропускной способности на каналы с пристартовыми НИП, чем при запусках РН с компоновочной схемой «пакет» («Союз-2.1в», «Ангара-1.2», «Протон-М»);
- при одинаковой компоновочной схеме РН наиболее равномерным распределением ресурса пропускной способности характеризуется ИТО запусков РН, оснащенных программируемыми БИТС («Союз-2.1а (б, в)»), чем оснащенных не программируемыми («Протон-М») или комбинированными («Ангара-1.2», «Ангара-А5»).

На основе результатов поиска рациональных значений параметров плана формирования потока телеметрических сообщений, не имеющих четкого аналитического описания: времена действия программ формирования потока сообщений (t^{prPPS}) и состава сообщений телеметрических параметров РКН ($s^{LS}(t)$),

сформирован график выдачи сообщений телеметрических параметров РН в каналы передачи ТМИ (рисунок 4.3) [48].

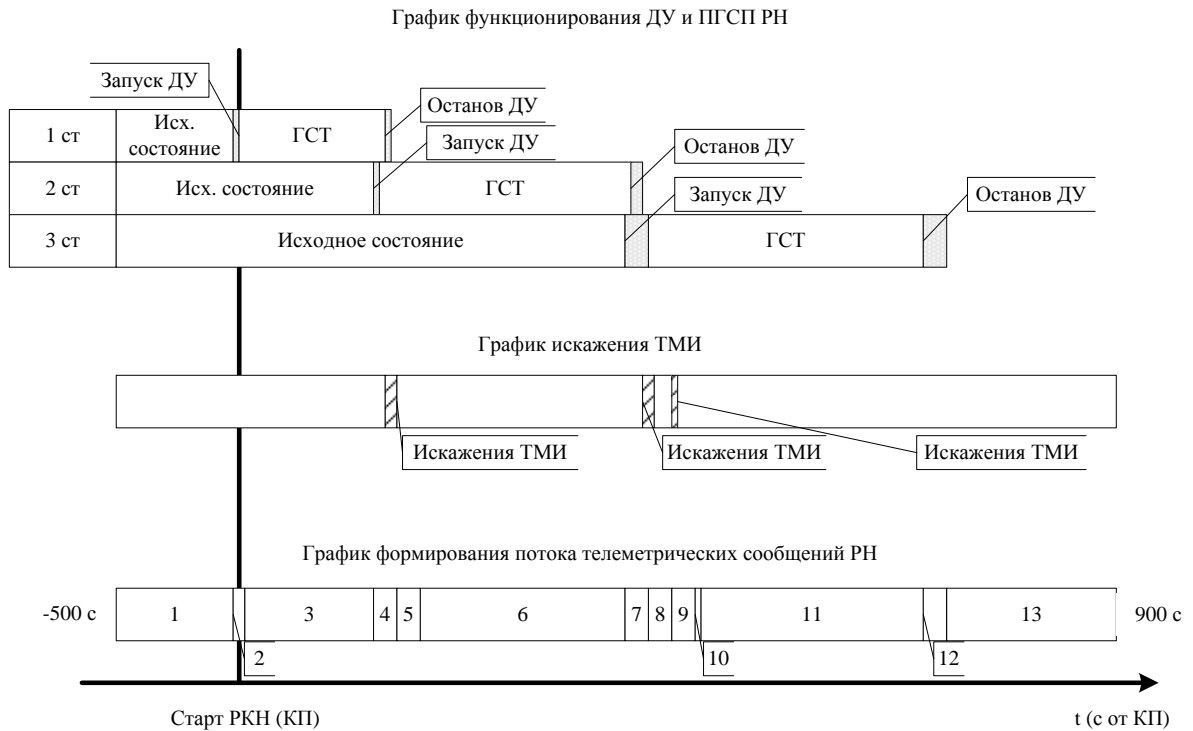


Рисунок 4.3 – График формирования потока телеметрических сообщений

Разработанный график включает тринадцать последовательно сменяющихся участков формирования потока телеметрических сообщений медленноменяющихся параметров РН (ПС), соответствующих характерным участкам функционирования РН, при постоянном составе сообщений цифровых массивов БЦВМ и НАП РН и ТМИ РБ:

ПС1 – участок функционирования РКН на этапе предстартовой подготовки;

ПС2 – участок запуска ДУ 1-й ступени РН и старт РКН;

ПС3 – участок функционирования РН на главной ступени тяги ДУ 1-й ступени;

ПС4 – участок запуска ДУ 2-й ступени РН, остановка ДУ 1-й ступени, разделения 1-й и 2-й ступеней РН;

ПС5 – участок совмещенной выдачи ТМИ непосредственной передачи и ТМИ участка ПС4 через ЛЗ СКЗУ;

ПС6 – участок функционирования РН на главной ступени тяги ДУ 2-й ступени;

ПС7 – участок запуска ДУ 3-й ступени, останова ДУ 2-й ступени, разделения 2-й и 3-й ступеней РН;

ПС8 – участок совмещенной выдачи ТМИ непосредственной передачи и ТМИ участка ПС7 через ЛЗ СКЗУ;

ПС9 – участок сброса створок головного обтекателя РКН;

ПС10 – участок совмещенной выдачи ТМИ непосредственной передачи и ТМИ участка ПС9 через ЛЗ СКЗУ;

ПС11 – участок функционирования РН на главной ступени тяги ДУ 3-й ступени;

ПС12 – участок останова ДУ 3-ступени РН и отделения орбитального блока;

ПС13 – участок пассивного полета 3-й ступени РН и автономного полета РБ.

Выполнение критерия «обеспечения максимальной полноты охвата контролем телеметрируемых параметров РКН» обеспечено:

- соответствием временных интервалов действия участков плана формирования потока телеметрических сообщений временным интервалам характерных участков функционирования систем и агрегатов РН, потребностям получателя информации на данных участках с учетом временных интервалов искажения ТМИ при проведении динамических операций РКН и выдачей ТМИ через ЛЗ СКЗУ;

- приоритетной выдачей сообщений телеметрических параметров, подлежащих обязательному контролю на характерных участках функционирования систем и агрегатов РН.

В результате расчетов по поиску рациональных значений параметров сжатия группового телеметрического потока определен вектор коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$).

Выполнение обобщенного (интегрального) критерия «обеспечение минимальной апостериорной энтропии телеметрических параметров РКН

на выходе СИТО» при ограничении на информационную производительность СИТО запусков РКН обеспечено:

– минимизацией коэффициентов потери информации $K_H^{LS} \rightarrow \min_{K^{prLS}}$

на участках высокой динамики (переходные процессы) и участках совмещенной выдачи ТМИ непосредственной передачи и передачи ТМИ через СКЗУ;

– не ухудшения апостериорной энтропии телеметрических сообщений ($h_{aps}^{sND} \leq h_{aps}^{sVD}$) на участках низкой динамики (установившиеся режимы) относительно участков высокой динамики.

На основе результатов поиска рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений РН сформированы математические зависимости значений коэффициентов прореживания от частоты опроса телеметрических параметров РН БИТС, динамики изменения их значений (дв. ед./с²) и точности первичных преобразователей для различных участков пуска и полета РКН [48].

Необходимо отметить, что математические описания строились исходя из значений частных и обобщенного показателей качества функционирования СИТО на наиболее нагруженном в информационном плане участке полета РКН – разделения первой и второй ступеней РН, сопровождающегося практически одновременным остановом ДУ 1 ступени и запуска ДУ 2 ступени. Апостериорная энтропия сообщений телеметрических параметров РН на выходе СИТО запусков в зависимости от точности первичных преобразований на данном этапе ИТО полета составила от 3,59 до 4,75 бит при коэффициенте потери информации потока телеметрических сообщений $K_H^{LS} = 1,18$.

На рисунках 4.4 – 4.7 приведены графики зависимостей коэффициентов прореживания от динамики изменения значений телеметрических параметров РН и параметров БИТС (относительной погрешности первичных преобразователей) на участках проведения динамических операций РН при частотах опроса телеметрируемых параметров 100, 50, 25 и 12,5 Гц.

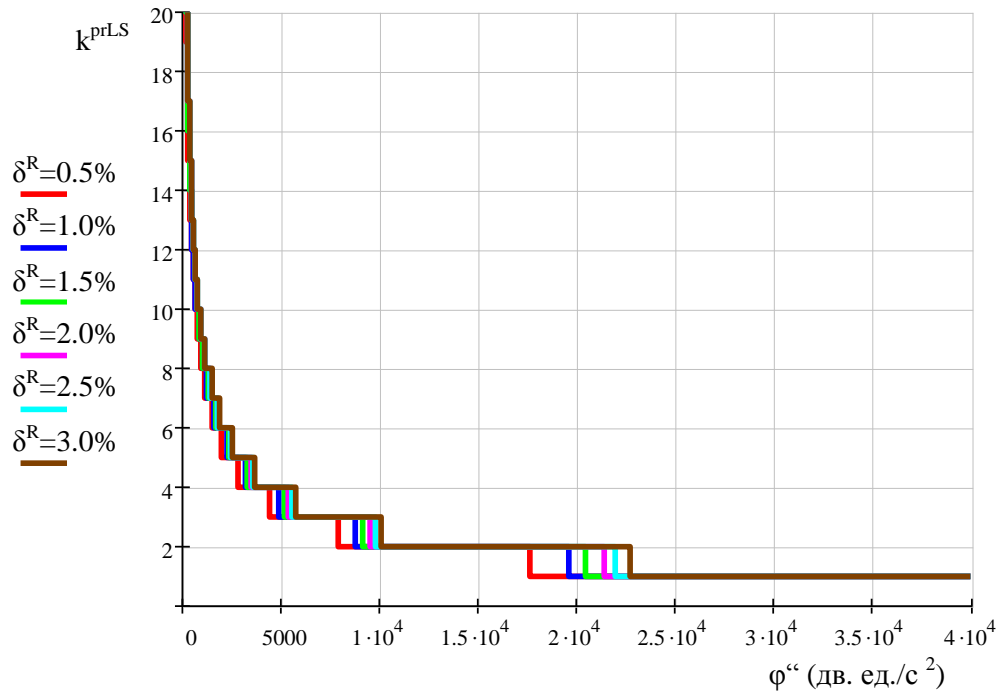


Рисунок 4.4 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{BITS} = 100$ Гц

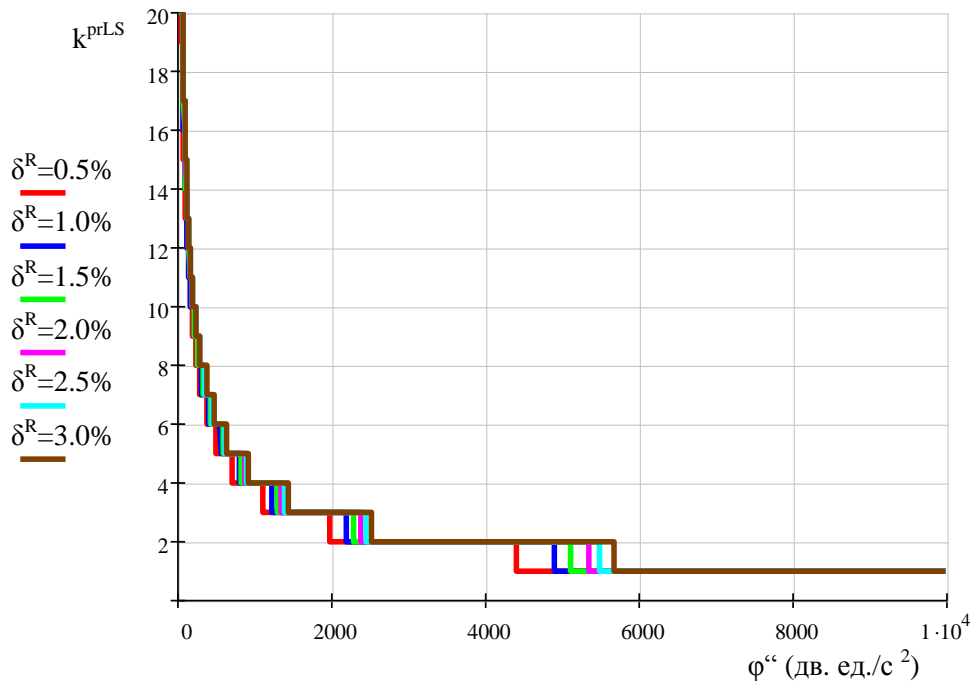


Рисунок 4.5 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{BITS} = 50$ Гц

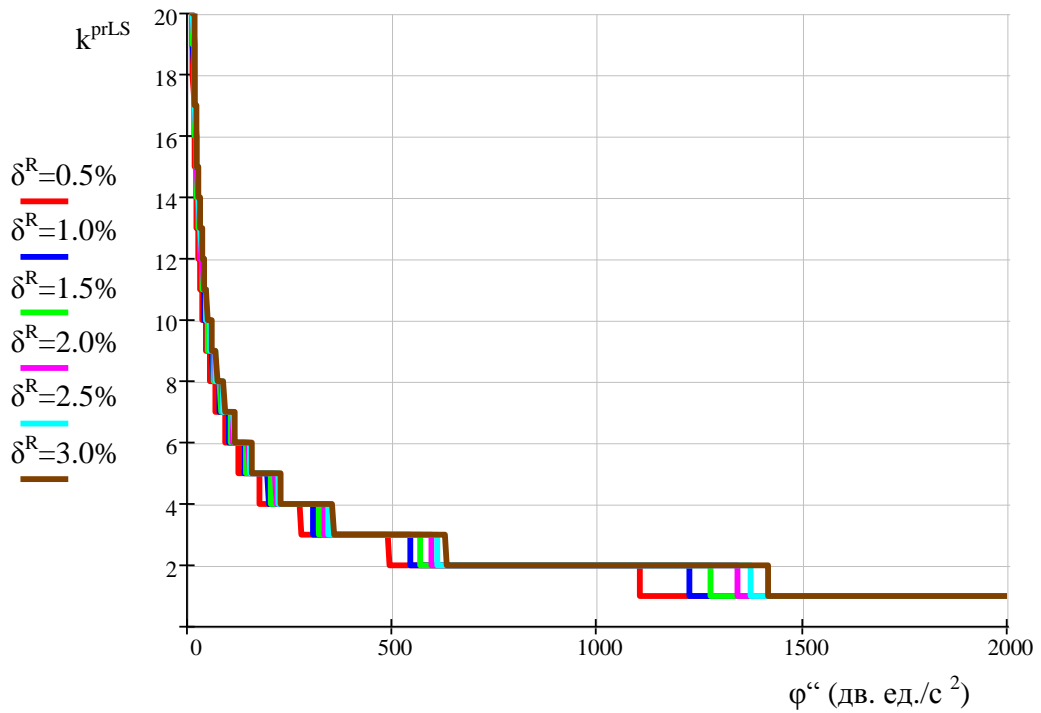


Рисунок 4.6 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{\text{BITS}} = 25$ Гц

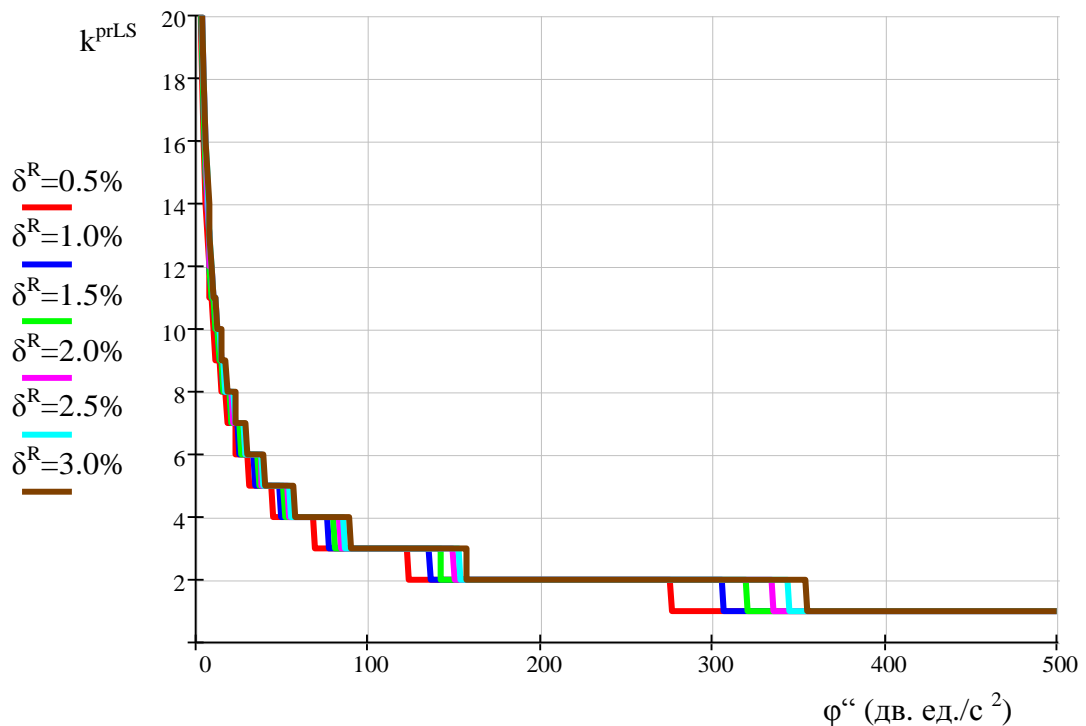


Рисунок 4.7 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{\text{BITS}} = 12,5$ Гц

Анализ графиков, приведенных на рисунках 4.4 – 4.7, показывает, что для обеспечения равенства коэффициентов потери информации телеметрических сообщений необходимо устанавливать меньшие значения коэффициентов прореживания сообщениям телеметрических параметров РН, измеряемых преобразователями высокой точности. С учетом приведения динамики телеметрических параметров к длительности периода опроса в зависимости от погрешности первичных измерителей-преобразователей телеметрических параметров практические диапазоны изменения значений коэффициентов прореживания составляют при:

$$- \delta^R = \pm 3,0 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,3 \text{ дв. ед. до } 4 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0,6 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 2,5 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,25 \text{ дв. ед. до } 4 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0,59 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 2,0 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,18 \text{ дв. ед. до } 4 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0,57 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 1,5 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,09 \text{ дв. ед. до } 4 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0,54 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 1,0 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,95 \text{ дв. ед. до } 4 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0,51 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 0,5 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,7 \text{ дв. ед. до } 4 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0,45 \text{ дв. ед.}$$

На рисунках 4.8 – 4.11 приведены графики зависимостей коэффициентов прореживания от динамики изменения значений телеметрических параметров РН и параметров БИТС (относительной погрешности первичных преобразователей) на участках установившихся режимов функционирования РН при частотах опроса телеметрических параметров 100, 50, 25 и 12,5 Гц.

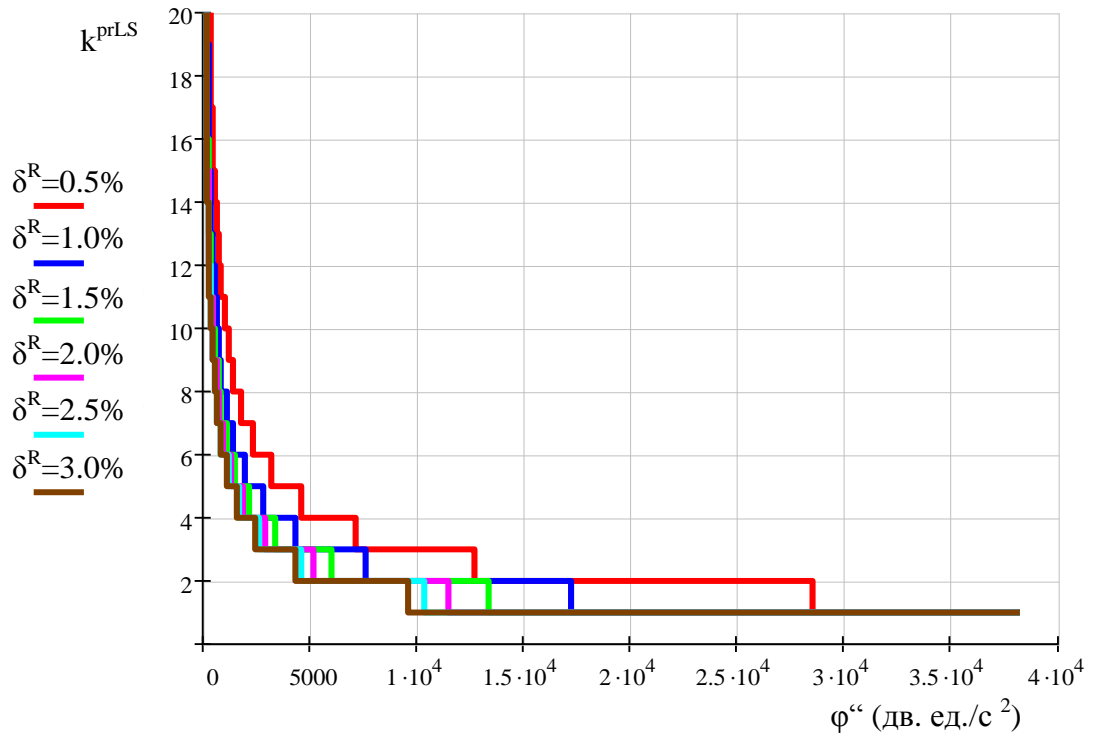


Рисунок 4.8 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{BITS} = 100$ Гц

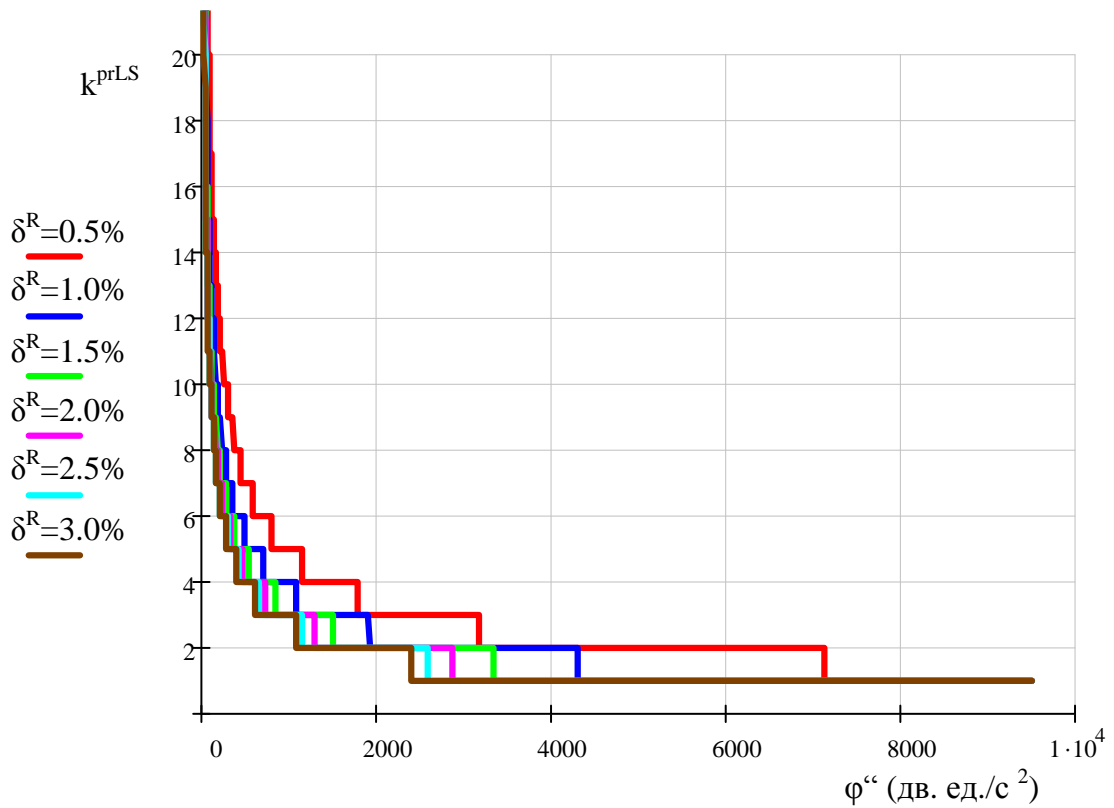


Рисунок 4.9 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{BITS} = 50$ Гц

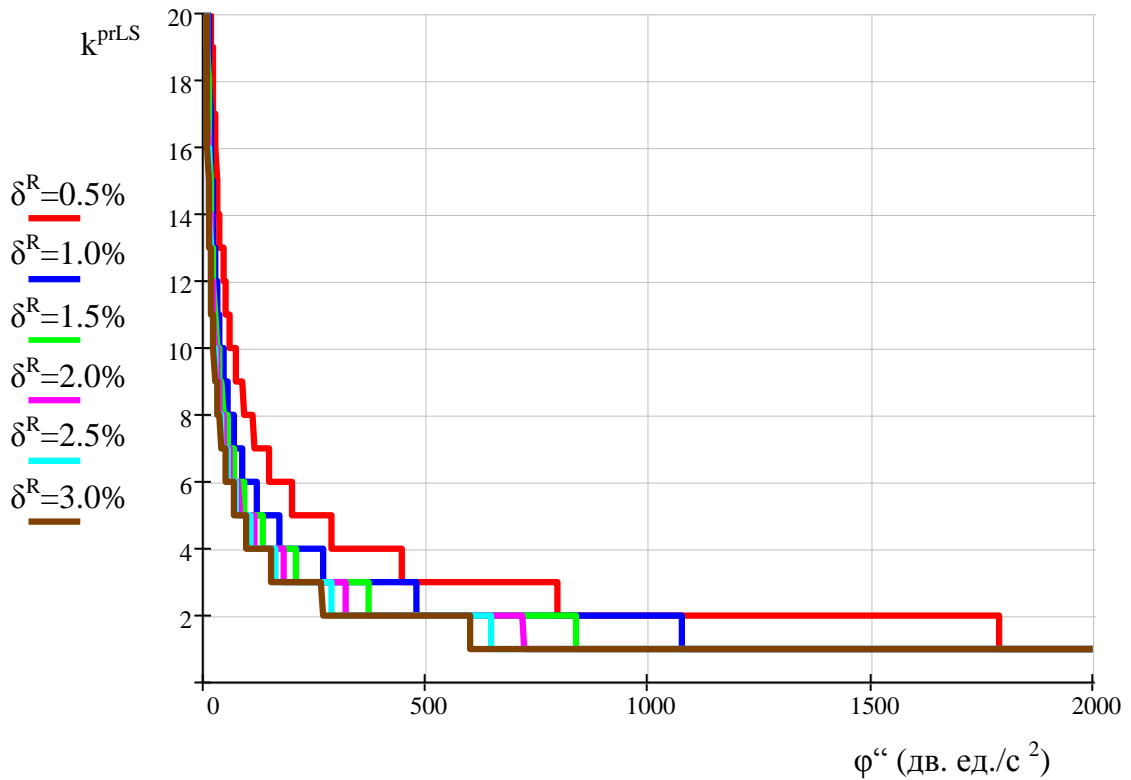


Рисунок 4.10 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{BITS} = 25$ Гц

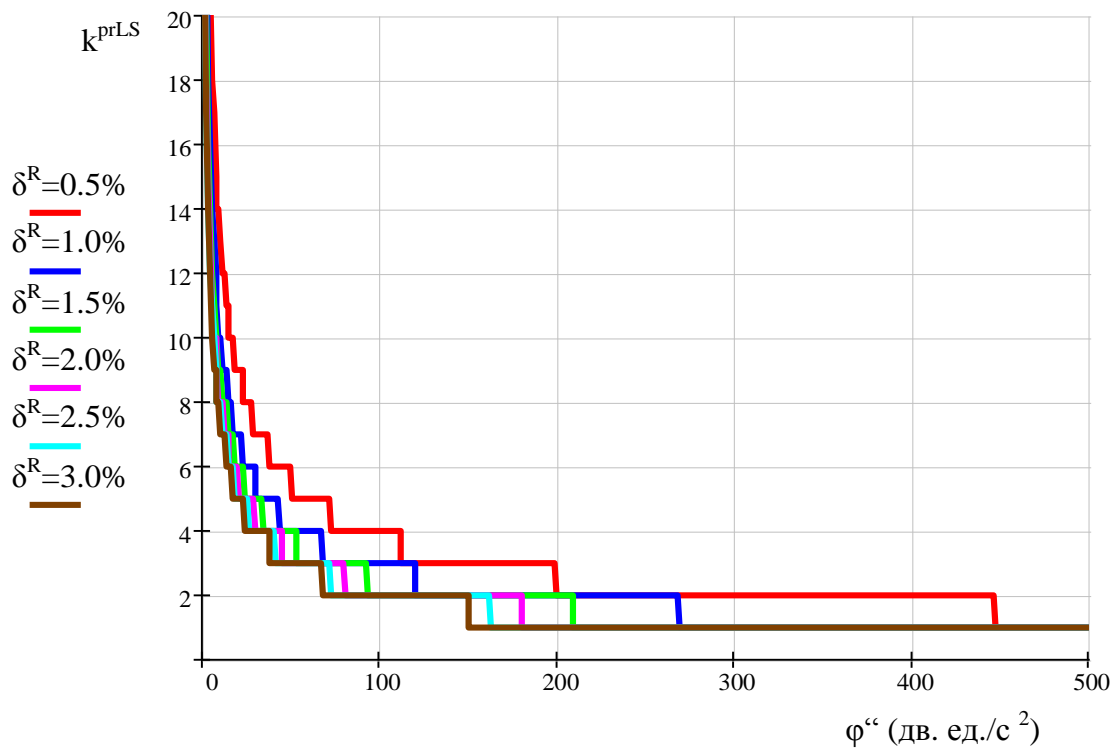


Рисунок 4.11 – График зависимости коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров при частоте опроса $f^{BITS} = 12,5$ Гц

Анализ графиков, приведенных на рисунках 4.8 – 4.11 показывает, что для обеспечения не ухудшения апостериорной энтропии потока телеметрических сообщений необходимо устанавливать меньшие значения коэффициентов прореживания сообщениям телеметрических параметров РН, измеряемых преобразователями меньшей точности. С учетом приведения динамики телеметрических параметров к длительности периода опроса в зависимости от погрешности первичных измерителей-преобразователей телеметрических параметров практические диапазоны изменения значений коэффициентов прореживания составляют при:

$$- \delta^R = \pm 3,0 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 0,9 \text{ дв. ед. до } 8 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0.04 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 2,5 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,05 \text{ дв. ед. до } 9 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0.04 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 2,0 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,15 \text{ дв. ед. до } 10 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0.04 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 1,5 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,3 \text{ дв. ед. до } 12 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0.04 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 1,0 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,75 \text{ дв. ед. до } 15 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0.04 \text{ дв. ед.};$$

$$- \delta^R = \pm 0,5 \% - \text{от } 1 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,85 \text{ дв. ед. до } 20 \text{ при } \varphi'' / f^{BITS^2} = 0.04 \text{ дв. ед.}$$

Анализ полученных математических описаний позволяет качественно оценить влияние параметров БИТС РН и параметров, характеризующих динамику изменения телеметрических параметров РН на значения варьируемых параметров сжатия потока телеметрических сообщений, обеспечивающих выполнение критериев поиска рациональных значений вектора $\mathbf{k}^{ptLS}(t)$.

Полученные в результате поиска значения варьируемых параметров СИТО запусков РКН использованы для определения рациональной программы сбора

T15/1	1	1	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T16/1÷6	1	1	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Значения коэффициентов прореживания телеметрируемых параметров второй ступени РН																
СПД Ф1-Б ÷ СПД Ф4-Б СПД Д1-Б ÷ СПД Д4-Б	2	-	-	1	1	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
СУРТ О.1-Б, ÷ СУРТ О.4-Б СУРТ 3.1-Б, ÷ СУРТ 3.4-Б	2	-	-	1	1	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
УПР21 ÷ УПР24	2	4	3	1	1	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
ПДСП-1 ÷ ПДСП-4	2	4	3	1	1	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
ОДЭ21÷24	2	3	3	2	4	3	2	1	3	2	-	-	-	-	-	-
ГДЭ21÷24	2	3	3	2	4	3	2	1	2	2	-	-	-	-	-	-
T100, T101/1, 2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
ПСТ23	2	3	3	1	3	2	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
БО21	2	3	3	1	3	2	2	1	3	2	1	1	1	1	-	-
БГ21	2	3	3	2	5	5	2	1	3	2	1	1	1	1	-	-
ОДФК21÷24	2	3	3	2	4	3	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
ОПН21÷24	2	3	3	1	4	2	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
Т-ПСНО	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
Т-ПГНГ	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
НБО21	2	3	3	1	2	2	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
НБГ21	2	3	3	2	5	4	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
ДГД	2	3	3	2	5	4	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
ДЖД	2	3	3	2	4	3	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
БЗД	2	3	3	2	4	3	1	1	-	2	-	-	-	-	-	-
Т-ОДФК21÷24	1	2	1	2	3	3	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
T106	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
T107	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
T108	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
T109	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	-	-
Значения коэффициентов прореживания телеметрируемых параметров третьей ступени РН																
СПД Ф1-В, СПД Д1-В	2	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-
СУРТО.1-В, СУРТ3.1-В	2	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-
УПР31	2	4	3	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	-
ПДСП	2	4	3	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	-
ОДНР31	2	3	2	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-

Продолжение таблицы 4.26

ГДНР31	2	3	2	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ОПНР31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ГПНР31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ДМГО31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ГПШ31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
НБО31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
НБГ31	2	4	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
T206	1	2	1	2	4	4	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
T205	1	2	1	2	4	4	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
T-МГО31	2	3	3	3	14	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T-ОДФК31	2	3	3	3	14	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T-ГПС31	2	3	3	4	27	27	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
БО31	2	3	3	5	22	22	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1
БГ31	2	3	3	5	22	22	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1
T201	1	2	1	3	18	18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T202	1	2	1	3	18	18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T203	1	2	1	3	19	19	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
T204	1	2	1	3	19	19	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
ОДЭ31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ГДЭ31	2	3	3	3	22	22	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ОПН31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ОДФК31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
ПСТ31	2	3	3	4	27	27	2	1	2	2	1	1	1	1	1	-
T-ОДД	1	2	1	2	9	9	1	1	2	2	1	1	1	1	1	-
T-ГДД	1	2	1	2	9	9	1	1	2	2	1	1	1	1	1	-

На основе анализа результатов поисковых процедур и расчетов рациональных значений варьируемых параметров адаптивной СИТО запусков при обеспечении пусков РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» могут быть выработаны рекомендации по определению рациональных программ сбора ТМИ при обеспечении запусков перспективных РКН «Ангара-1.1(2)», «Ангара-А5», «Союз-2» очередных этапов модернизации и «Союз-5».

Таким образом, полученные на основе проведенных поисковых процедур и расчетов значения варьируемых параметров СИТО запусков РКН позволили определить рациональную программу ТМИ при обеспечении запуска РКН. Программа сбора телеметрической информации включает в себя план

задействования каналов передачи ТМИ и план формирования потока телеметрических сообщений

Реализация разработанной рациональной программы сбора ТМИ позволяет:

- рационально распределить ограниченную пропускную способность телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП, в зависимости от компоновочной схемы используемой при запуске КА РКН и типом оснащаемых БРТС;

- дифференцированно установить коэффициенты прореживания сообщений телеметрических параметров РКН с учетом параметров БИТС РКН и динамики изменения телеметрических параметров на характерных участках функционирования РКН при пуске и в полете.

4.3 Оценка полученных результатов

Практическое использование разработанной комплексной методики параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН требует проведения оценки результатов поисковых процедур и расчетов по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН.

В процессе оценки точности и адекватности полученных результатов сформированы расчетно-экспериментальные данные, характеризующие качество СИТО запусков РКН [48, 55]:

$H_{aps}(\mathbf{t}^{prPPS})$ – апостериорная энтропия группового потока телеметрических сообщений;

$I(\mathbf{t}^{prPPS})$ – количество информации, содержащейся в групповом потоке телеметрических сообщений;

$J(\mathbf{t}^{prPPS})$ – коэффициент информативности группового потока телеметрических сообщений;

$K_H^{LS}(\mathbf{t}^{prPPS})$ – коэффициент потери информации группового потока телеметрических сообщений.

Накопление расчетно-экспериментальных данных проведено в ходе вычислительного эксперимента, имитирующего сбор ТМИ при проведении ИТО запуска РКН. Экспериментальные исследования проведены на комплексе программ сбора и обработки ТМИ, установленного на средствах Центра управления полетами АО «ЦНИИмаш». Реализации вычислительного эксперимента проведены с использованием в качестве входных данных файлов структуры «УС0 в двоичных единицах», содержащие материалы регистрации ТМИ, полученной при проведении ИТО реальных запусков РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» при выведении на орбиту «условно легких» КА с космодрома «Байконур» в период с 2006 по 2018 года (таблица 4.27) [48].

Таблица 4.27 – Выборка материалов регистрации ТМИ, использованных для проведения экспериментального исследования

РН	РБ	КА	Дата запуска
8K82KM	Бриз М	Араб-Сат 4А	28.02.2006
8K82KM	Бриз М	17Ф15М	09.12.2007
8K82KM	Бриз М	Экспресс	11.02.2009
8K82KM	Бриз М	17Ф15М	28.01.2010
8K82KM	Бриз М	КА-САТ	27.12.2010
8K82KM	Бриз М	Каз-Сат	16.07.2011
8K82KM	Бриз М	14Ф136	21.09.2011
8K82KM	Бриз М	Луч 5А	11.12.2011
8K82KM	Бриз М	Экспресс МД2	06.08.2012
8K82KM	Бриз М	Луч 5Б, Ямал 300К	03.11.2012
8K82KM	Бриз М	Ямал 402	08.12.2012
8K82KM	Бриз М	17Ф15М	12.11.2013
8K82KM	Бриз М	Экспресс АМ5	26.12.2013
8K82KM	Бриз М	ЭкспрессАТ1/АТ2	16.03.2014
8K82KM	Бриз М	Луч 5В, Каз-Сат 2	28.04.2014
8K82KM	Бриз М	С762В	27.09.2014
8K82KM	Бриз М	Экспресс АМ6	21.10.2014
8K82KM	Бриз М	Ямал 401	15.12.2014
8K82KM	Бриз М	Экспресс АМ7	19.03.2015
8K82KM	Бриз М	14Ф136	13.12.2015
8K82KM	Бриз М	Экспресс АМУ1	24.12.2015
8K82KM	Бриз М	14Ф149	17.08.2017
8K82KM	Бриз М	14Ф149	19.04.2018

Расчетно-экспериментальные данные, полученные в ходе проведения реализаций эксперимента, приведены в таблицах 4.28 – 4.30.

Таблица 4.28 – Расчетные и расчетно-экспериментальные показатели количества информации в потоке телеметрических сообщений, сформированные при реализации программного подхода

Номер участка плана	Показатели количества информации в потоке телеметрических сообщений РН							
	Расчетные данные				Расчетно-экспериментальные данные			
	H_{aps} (бит)	I (бит/с)	J (1/с)	K_H^{LS}	H_{aps} (бит)	I (бит/с)	J (1/с)	K_H^{LS}
1	1085,33	27586,9	0,0164	1,09	1042,16	26887,9	0,0161	1,06
2	1243,82	45072,6	0,0269	1,22	1174,48	43887,6	0,0262	1,17
3	1153,85	27740,3	0,0168	1,17	1107,35	27063,7	0,0164	1,13
4	1141,49	31996,5	0,0187	1,18	1074,64	30769,6	0,0183	1,12
5	327,46	15948,6	0,0119	1,03	313,99	15029,1	0,0113	1,07
6	325,63	16100,6	0,0158	1,07	312,21	15723,2	0,0154	1,04
7	338,32	22172,3	0,0213	1,09	319,78	21610,4	0,0208	1,05
8	410,38	14935,6	0,0138	1,07	388,62	14251,5	0,0126	1,03
9	167,75	10734,1	0,0186	1	161,14	10482,6	0,0182	1
10	167,75	10734,1	0,0186	1	161,14	10482,6	0,0182	1
11	167,75	10734,1	0,0186	1	161,14	10482,6	0,0182	1
12	203,47	16879,6	0,0273	1	198,27	16716,5	0,0269	1
13	100,84	6255,8	0,0157	1	96,87	6109,2	0,0153	1

Таблица 4.29 – Расчетно-экспериментальные показатели количества информации в потоке телеметрических сообщений, сформированные при реализациях существующего неадаптивного подхода и автоматического подхода

Номер участка плана	Показатели количества информации в потоке телеметрических сообщений РН							
	Неадаптивная выборка				Автоматическая выборка			
	H_{aps} (бит)	I (бит/с)	J (1/с)	K_H^{LS}	H_{aps} бит	I (бит/с)	J (1/с)	K_H^{LS}
1	1323,26	22965,2	0,0137	1,32	1047,62	27799,5	0,0286	1,068
2	1585,23	35695,1	0,0211	1,53	7173	0	0	7,04
3	1408,43	23281,9	0,0138	1,38	1113,02	26329,2	0,0298	1,068
4	1896,74	20539,9	0,0124	2,09	7173	0	0	7,41
5	382,53	13020,2	0,0097	1,28	7173	0	0	7,18
6	382,53	13020,2	0,0129	1,29	317,26	15500,37	0,0307	1,068
7	565,19	16052,4	0,0158	1,86	320,12	21511,4	0,0208	1,068
8	184,65	14282,6	0,0127	1,02	162,47	13788,2	0,0206	1,068
9	272,36	7324,5	0,0128	1,66	162,47	10388,2	0,0264	1,068

10	161,14	10482,6	0,0182	1	162,47	10388,2	0,0251	1,068
11	161,14	10482,6	0,0182	1	162,47	10388,2	0,0363	1,068
12	198,27	16716,5	0,0269	1	199,89	16574,5	0,0272	1,068
13	96,87	6109,2	0,0153	1	97,89	6073,8	0,0248	1,068

Таблица 4.30 – Расчетно-экспериментальные показатели количества информации в потоке телеметрических сообщений, сформированного при моделировании аварийных ситуаций

Этап полета РКН (номер программы сбора)	Показатели количества информации в потоке телеметрических сообщений РН			
	H_{aps} (бит)	I (бит/с)	J (1/с)	K_H^{LS}
ГСТ ДУ 1-й ступени РН (ПС3)	1318,94	27138,8	0,0161	1,26
ГСТ ДУ 2-й ступени РН (ПС6)	341,53	20335,4	0,0196	1,12
ГСТ ДУ 3-й ступени РН (ПС11)	198,27	16716,5	0,0269	1

Оценка результатов решения задачи по определению рациональной программы сбора ТМИ при проведении первого ИТО запуска РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» проведена по трем направлениям:

- оценка точности решения;
- оценка влияния адаптивных процедур сбора ТМИ на качество функционирования СИТО запусков РКН;
- оценка устойчивости функционирования СИТО к нерасчетным изменениям значений телеметрических параметров РН, вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН.

Оценка результатов решения проведена через анализ обобщенного (апостериорная энтропия телеметрических параметров) и частных (коэффициент информативности потока телеметрических сообщений и коэффициент потери информации) показателей качества СИТО. Непосредственно оценивание проведено по следующим производным показателям:

ε_H – относительная разность значений апостериорной энтропии телеметрических параметров потока телеметрических сообщений;

ε_J – относительная разность значений коэффициента информативности потока телеметрических сообщений;

ε_{K_H} – относительная разность значений коэффициента потери информации в потоке телеметрических сообщений.

Оценка точности результатов решения проведена сравнением относительной разницы значений показателей, рассчитанных на основе расчетных данных и выборочных средних значений расчетно-экспериментальных данных, полученных при реализациях вычислительного эксперимента с использованием программного подхода к адаптивному формированию потока телеметрических сообщений, а также среднеквадратичных отклонений расчетно-экспериментальных данных ($\sigma_H, \sigma_J, \sigma_{K_H}$).

На рисунках 4.12 – 4.22 представлены гистограммы распределения опытных значений показателей количества информации и графики их аппроксимирующих значений плотности вероятности распределения (апостериорная энтропия группового потока сообщений телеметрических параметров (а), коэффициент информативности потока телеметрических сообщений (б), коэффициент потери информации в потоке телеметрических сообщений (в)).

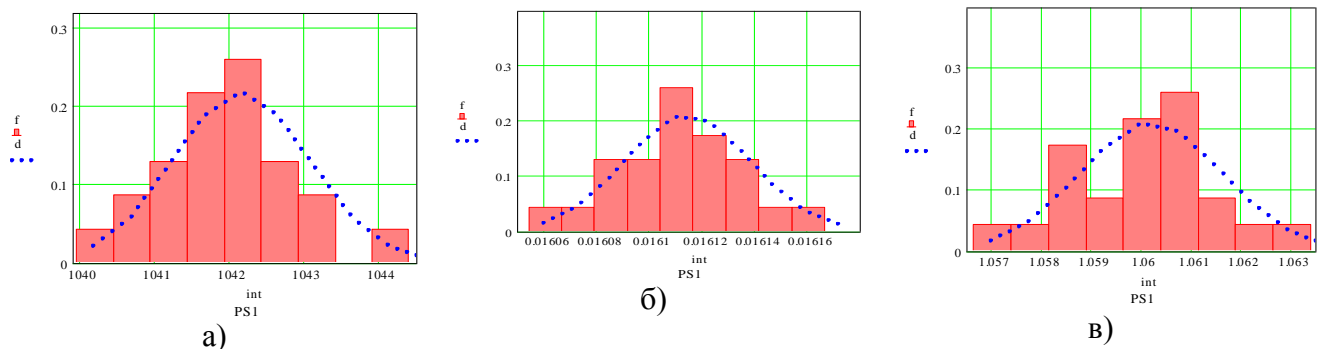


Рисунок 4.12 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке предстартовой подготовки РКН

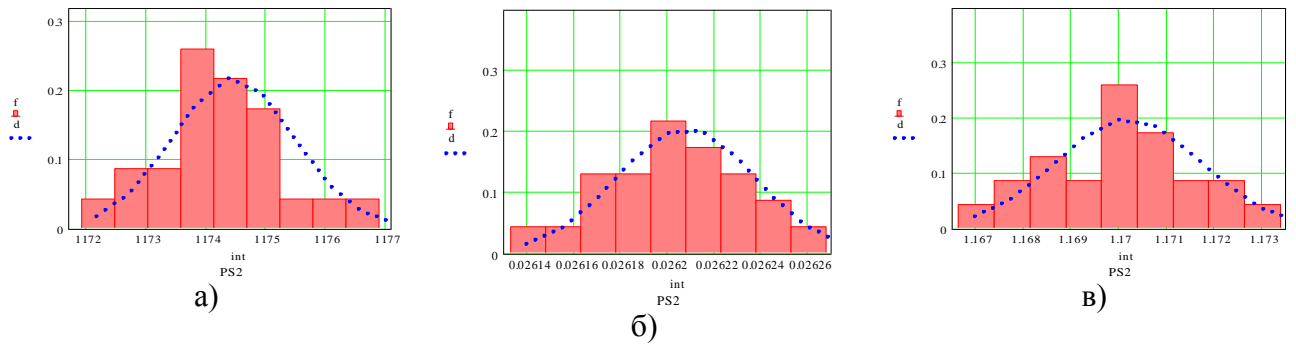


Рисунок 4.13 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке запуска ДУ 1-й ступени РН и старта РКН

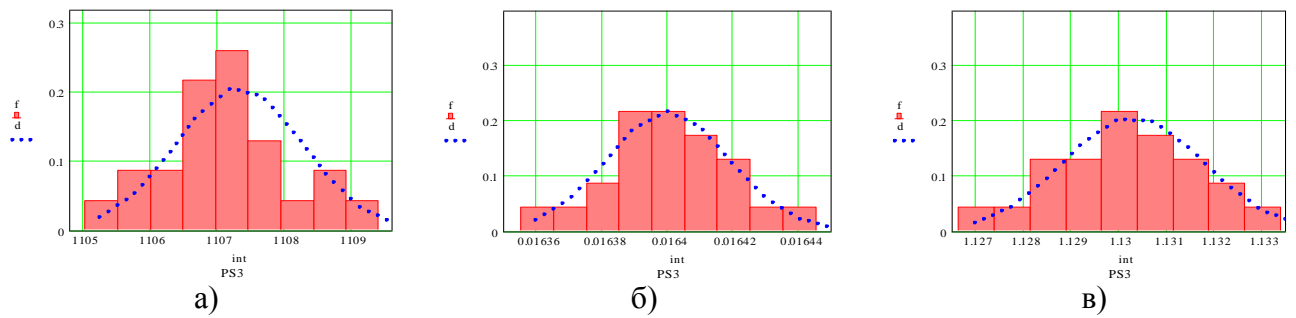


Рисунок 4.14 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке главной ступени тяги ДУ 1-й ступени

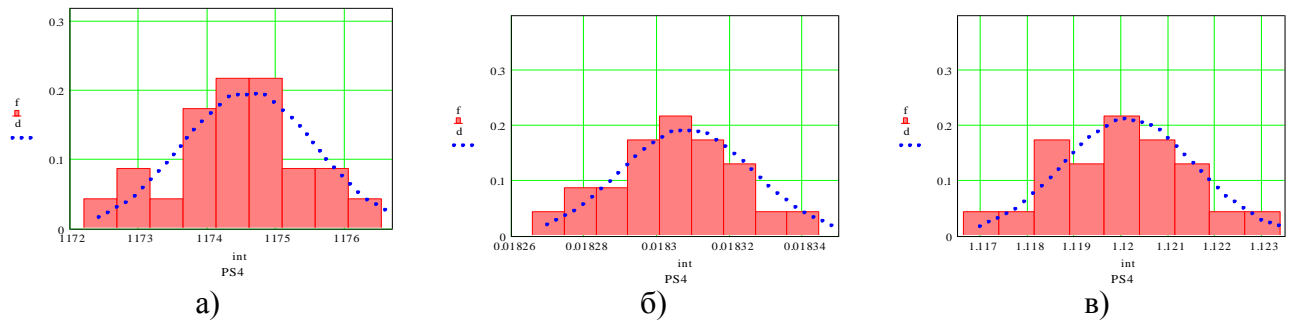


Рисунок 4.15 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке запуска ДУ 2-й ступени РН, останова ДУ 1-й ступени, разделения 1-й и 2-й ступеней РН

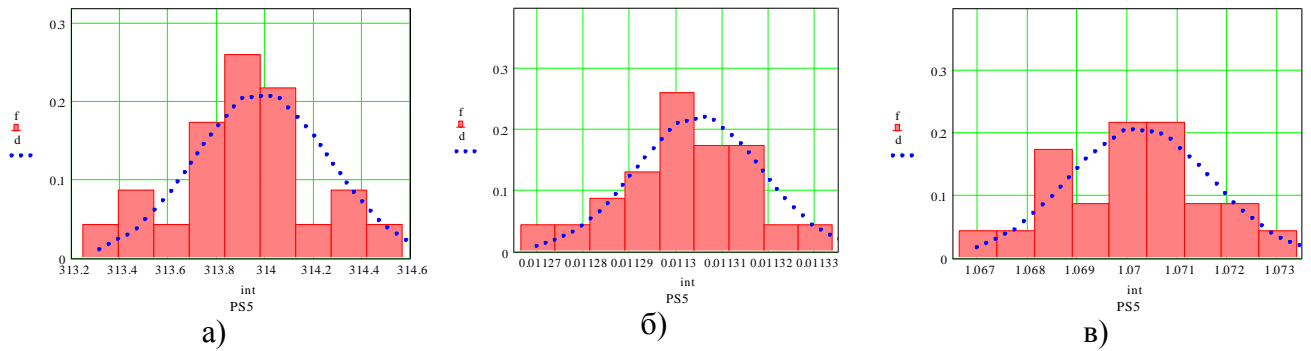


Рисунок 4.16 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке совмещенная выдача ТМИ непосредственной передачи и ТМИ участка ПС4 через ЛЗ СКЗУ

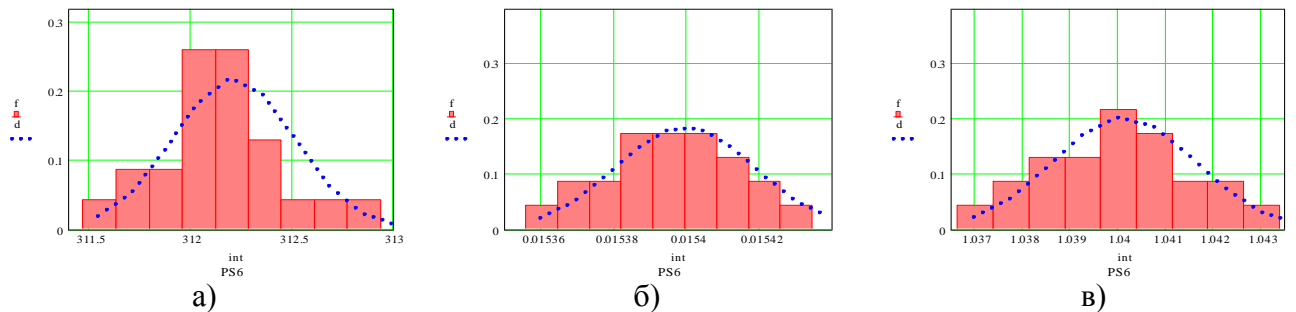


Рисунок 4.17 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке главной ступени тяги ДУ 2-й ступени

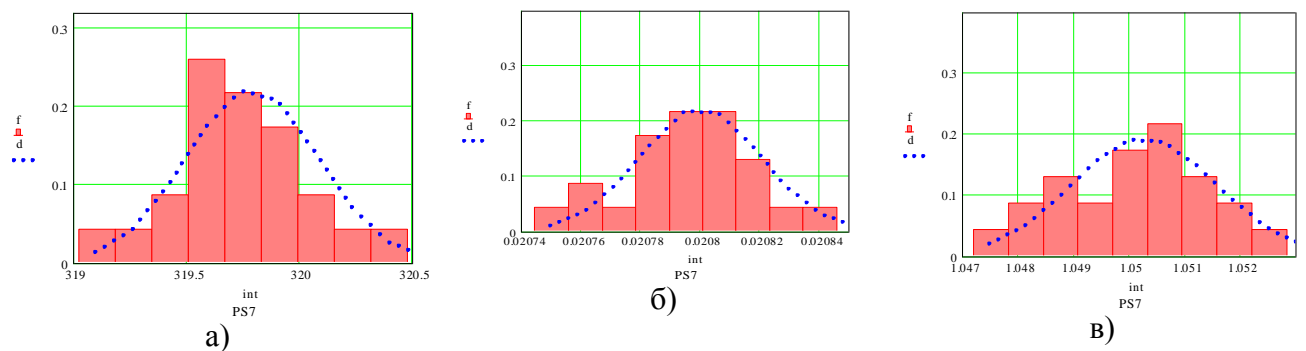


Рисунок 4.18 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке запуска ДУ 3-й ступени, останова ДУ 2-й ступени, разделения 2-й и 3-й ступеней РН

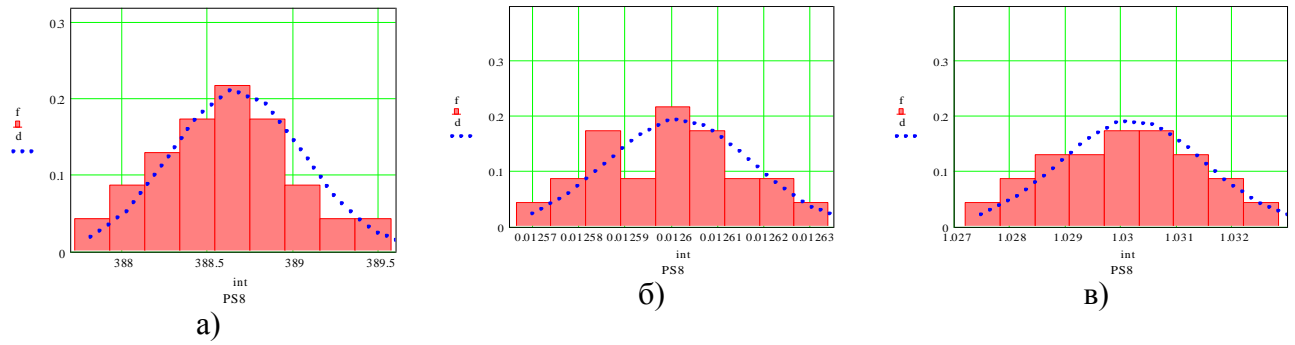


Рисунок 4.19 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке совмещенной выдачи ТМИ непосредственной передачи и ТМИ участка ПС7 через ЛЗ СКЗУ

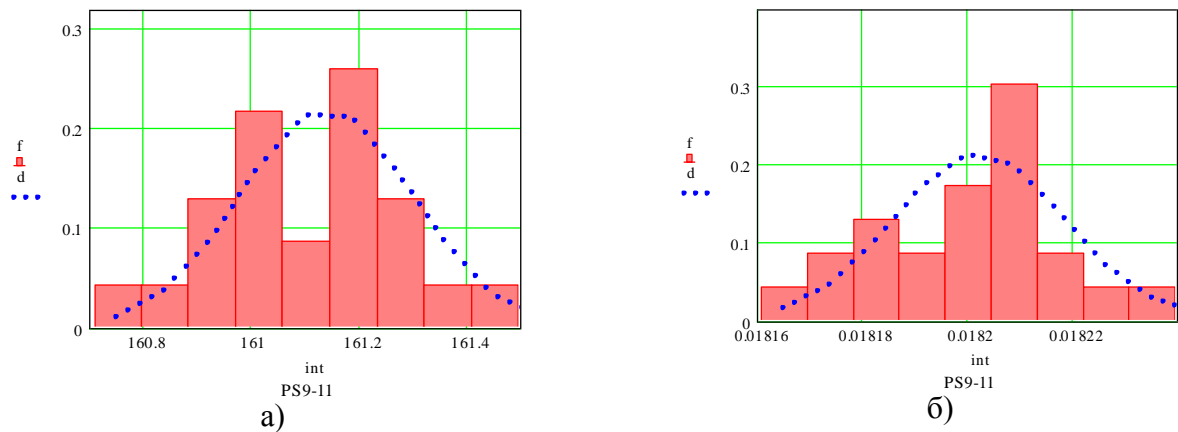


Рисунок 4.20 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участках главной ступени тяги ДУ 3-й ступени

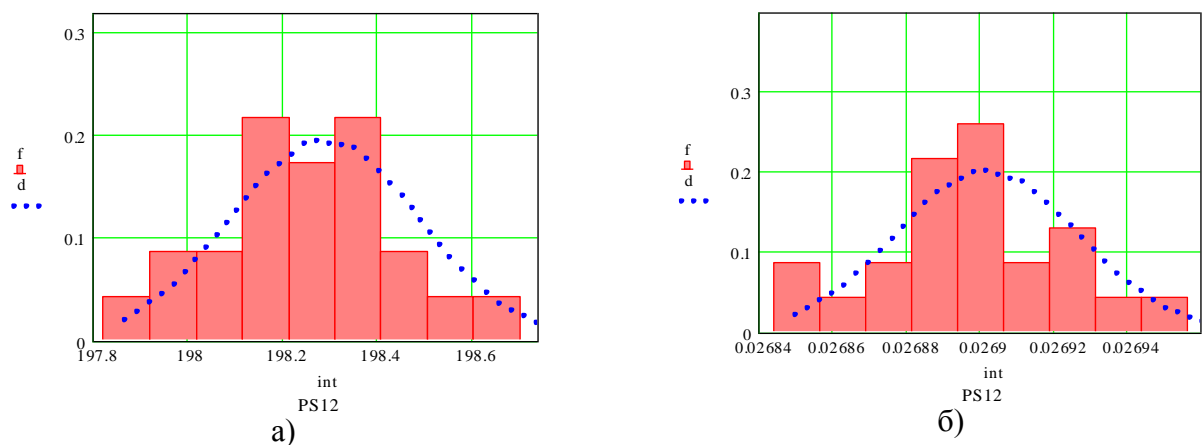


Рисунок 4.21 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке останова ДУ 3-ступени РН и отделения орбитального блока

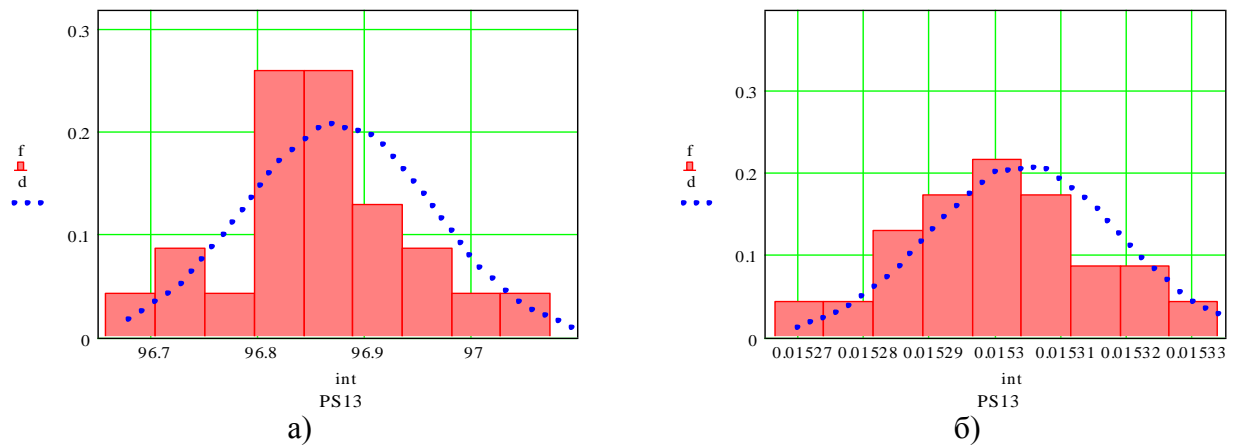


Рисунок 4.22 – Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке пассивного полета 3-й ступени РН и автономного полета РБ

Диапазоны значений относительной разности расчетных и выборочных средних расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений составили:

ε_H – от 4,1 % на участках с низкой динамикой телеметрических параметров до 6,09 % на участках с высокой динамикой;

ε_J – от 2,4 % на участках непосредственной передачи ТМИ до 5,1 % на участках совмещенной выдачи информации непосредственной выдачи и СКЗУ;

ε_{K_H} – от 3,2 % на участках с низкой динамикой телеметрических параметров до 4,8 % на участках с высокой динамикой и 0% на этапе полета 3-й ступени РН (выдача сообщений осуществляется без прореживания).

Диапазоны доверительных интервалов ($\pm 3\sigma$) расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений (в процентах от их выборочных средних значений) составили:

$\pm 3\sigma_H$ – от 0,49 % на участках полета первой ступени РН (реализовано следящее регулятивное управление ДУ) до 0,59 % на участках полета третьей ступени РН (реализовано терминальное управление ДУ);

$\pm 3\sigma_J$ – от 0,54 % на участках непосредственной передачи ТМИ до 0,73 % на участках совмещенной выдачи информации непосредственной выдачи и СКЗУ;

$\pm 3\sigma_{K_H}$ – от 0,74 % на участках непосредственной передачи ТМИ до 0,86 % на участках совмещенной выдачи информации непосредственной выдачи и СКЗУ.

Значения показателей, полученных на основе расчетно-экспериментальных данных, подтверждают точность решения задачи по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН.

Оценка степени влияния адаптивных процедур сбора ТМИ на качество СИТО запусков перспективных РКН проведена сравнением вышеуказанных показателей, полученных на основе расчетно-экспериментальных данных реализаций эксперимента с использованием трех подходов к формированию потока телеметрических сообщений в СИТО запусков РКН.

На рисунках 4.23, 4.24 представлены значения показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений при программном (красные гистограммы) и, применяемом в настоящее время, неадаптивном (синие гистограммы) формировании группового потока телеметрических сообщений на этапах пуска и полета РКН [48].

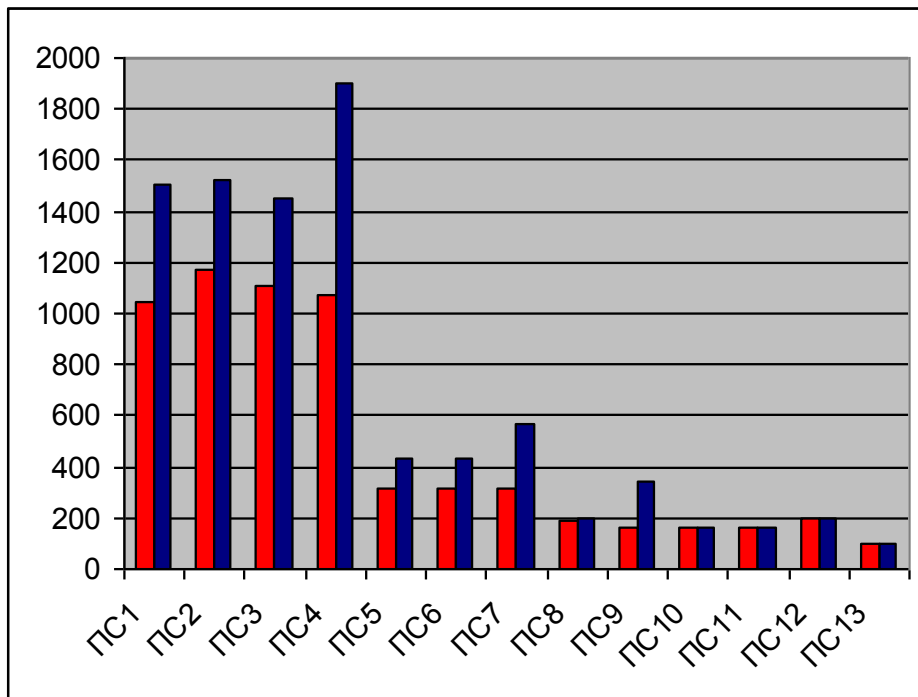


Рисунок 4.23 – Значения показателя «апостериорная энтропия потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО» при программном и неадаптивном формировании потока телеметрических сообщений

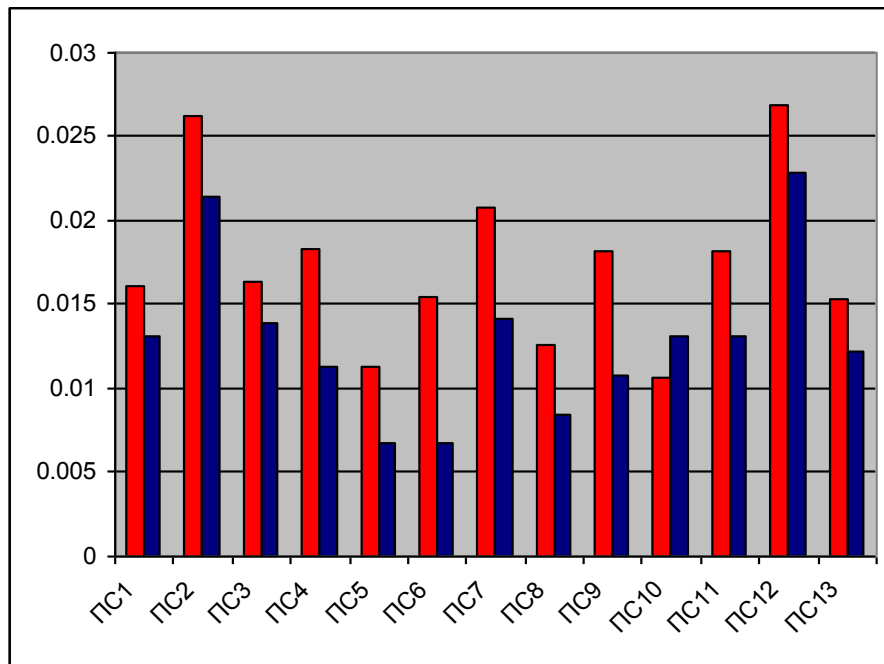


Рисунок 4.24 – Значения показателя «информативность потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО» при программном и неадаптивном формировании потока телеметрических сообщений

Диапазоны изменения значений показателей при сравнении исследуемого адаптивного сбора ТМИ на основе программного подхода относительно используемого в настоящее время неадаптивного сбора составили:

ε_H – от минус 17,9 % до минус 25,9 % с кратковременными достижениями значений до минус 43,3 % на участках искажений ТМИ;

ε_J – от 16,5 % до 24,2 % с кратковременными достижениями значений до 47,6% на участках искажений ТМИ;

ε_{K_H} – от минус 16,4 % до минус 23,5 % с кратковременными достижениями значений до минус 46,4% на участках искажений ТМИ.

На рисунках 4.25, 4.26 представлены значения показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений при программном (красные гистограммы) и автоматическом (фиолетовые гистограммы) формировании потока телеметрических сообщений на этапах пуска и полета РКН [48].

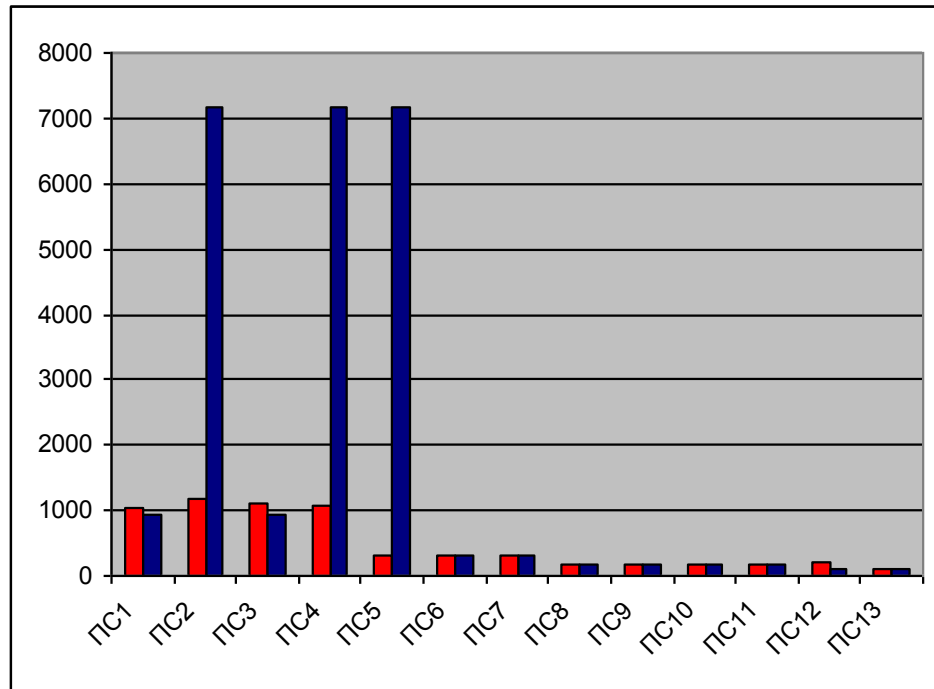


Рисунок 4.25 – Значения показателя «апостериорная энтропия потока сообщений телеметрируемых параметров РКН на выходе СИТО» при программном и автоматическом формировании потока телеметрических сообщений

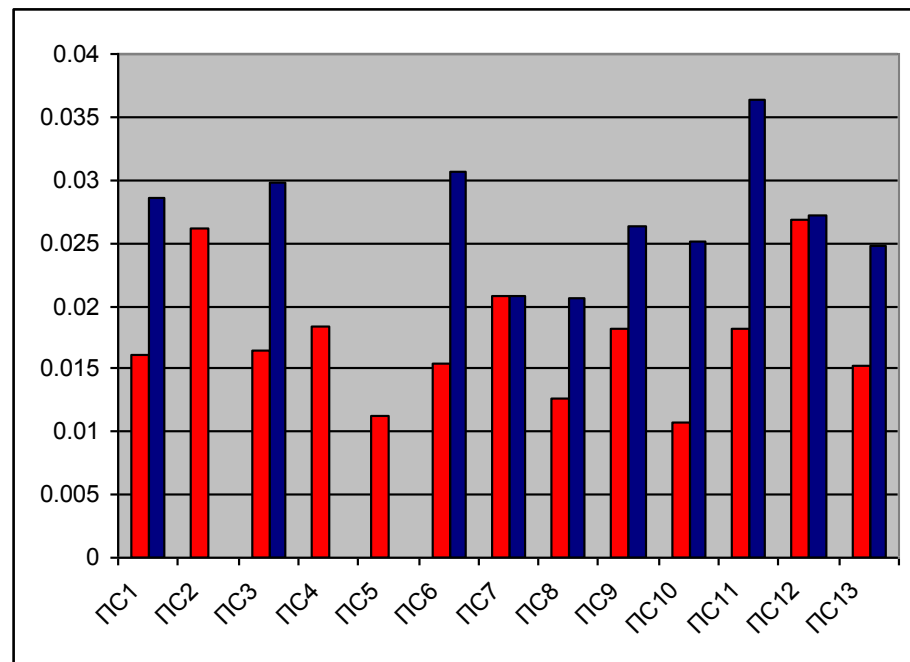


Рисунок 4.26 – Значения показателя «информативность потока сообщений телеметрируемых параметров РКН на выходе СИТО» при программном и автоматическом формировании потока телеметрических сообщений

Диапазоны изменения значений показателей при сравнении альтернативного адаптивного сбора ТМИ на основе автоматического подхода относительно исследуемого адаптивного сбора ТМИ на основе программного подхода составили:

ε_H – от минус 13,8 % до 1,6 % с достижениями значений 2184 % на участках высокой динамики телеметрических параметров РН непосредственной передачи и выдачи СКЗУ (полная потеря информации при реализациях автоматического подхода, обусловленная переполнением каналов передачи ТМИ потоком телеметрических сообщений);

ε_J – от 37,9 % до 99,4 % с достижениями значений минус 100 % на участках высокой динамики телеметрических параметров РН непосредственной передачи и выдачи СКЗУ;

ε_{K_H} – от минус 5,5 % до 6,8 % с достижениями значений 571 % на участках высокой динамики телеметрических параметров РН непосредственной передачи и выдачи СКЗУ.

Анализ полученных результатов оценки показывает преимущества адаптивного сбора ТМИ РН на основе программного подхода по сравнению с используемым в настоящее время неадаптивным сбором телеметрической информации. Повышение качества СИТО запусков РКН в зависимости от динамики изменения телеметрических параметров РН на характерных участках функционирования по обобщенным показателям составляет: по показателю «апостериорная энтропия потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО» от минус 17,9 % до минус 25,9 %, по показателю «информативность потока сообщений телеметрируемых параметров РКН на выходе СИТО» от 16,5 % до 24,2 %.

Автоматический подход к формированию адаптивных процедур сбора ТМИ, несмотря на существенное преимущество по показателю «коэффициент информативности потока телеметрических сообщений» на участках с низкой динамикой изменения телеметрических параметров не обеспечивает сбор ТМИ РН на участках высокой динамики телеметрических параметров (динамические процессы запуска и останова двигательных установок, разделения ступеней РН) вследствие полной потери информации, обусловленной переполнением каналов

передачи ТМИ потоком телеметрических сообщений. Данный подход может быть успешно использован для адаптивного сбора ТМИ при управлении КА, эксплуатации нефте- газотранспортных и других систем, характеризующихся относительно низкой и однородной динамикой телеметрических параметров.

Оценка устойчивости функционирования СИТО к нерасчетным изменениям динамики телеметрических параметров РН, вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН проведена сравнением относительных разностей значений апостериорной энтропии, коэффициентов потери информации и информативности группового потока телеметрических сообщений, рассчитанных на основе расчетно-экспериментальных данных реализаций эксперимента с моделированием аварийного останова ДУ на этапах полета РКН ГСТ ДУ 1-й, 2-й и 3-й ступеней относительно штатного останова ДУ. Значения вышеуказанных показателей при сравнении реализаций моделирования аварийных ситуаций и штатного полета РКН составили:

$\varepsilon_H, \varepsilon_{K_H}$ – 12,3 % на участке ГСТ ДУ 1-й ступени РН, 6,8 % на участке ГСТ ДУ 2-й ступени РН, и 0 % на участке ГСТ ДУ 3-й ступени РН;

ε_J – минус 11,8 % на участке ГСТ ДУ 1-й ступени РН, минус 5,9 % на участке ГСТ ДУ 2-й ступени РН, и 0 % на участке ГСТ ДУ 3-й ступени РН.

Анализ значений показателей, полученных на основе расчетно-экспериментальных данных, показывает высокий уровень устойчивости функционирования СИТО к нерасчетным изменениям значений телеметрических параметров РН, связанным с возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН. При этом, улучшение значения показателя «апостериорная энтропия потока сообщений телеметрируемых параметров РКН на выходе СИТО» относительно используемого в настоящее время неадаптивного сбора составило от 4,6 % на участке ГСТ ДУ 1-й ступени РН до 11,5 % на участке ГСТ ДУ 2-й ступени РН.

На рисунках 4.27 – 4.31 представлены графики зависимости приращения апостериорной энтропии от нештатного изменения динамики телеметрических

параметров РКН при значениях программного коэффициента прореживания телеметрических сообщений 2, 3, 4, 6 и 8.

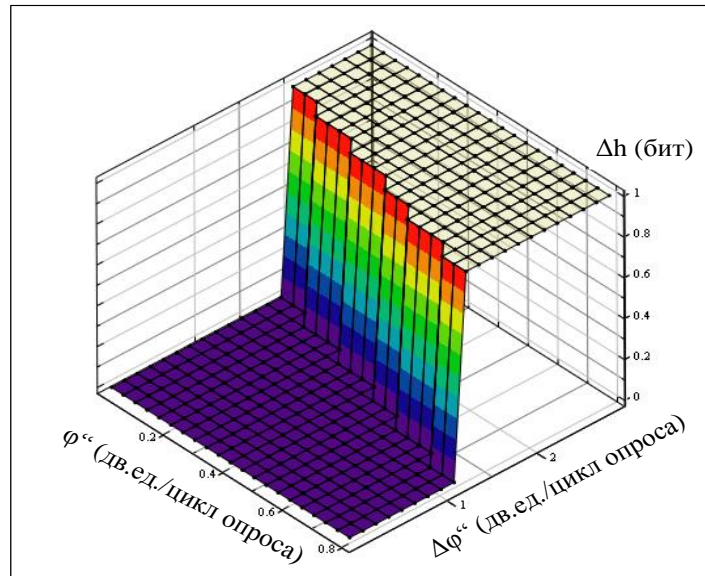


Рисунок 4.27 – График зависимости приращения апостериорной энтропии от нештатного изменения динамики телеметрических параметров РКН при коэффициенте прореживания «2»

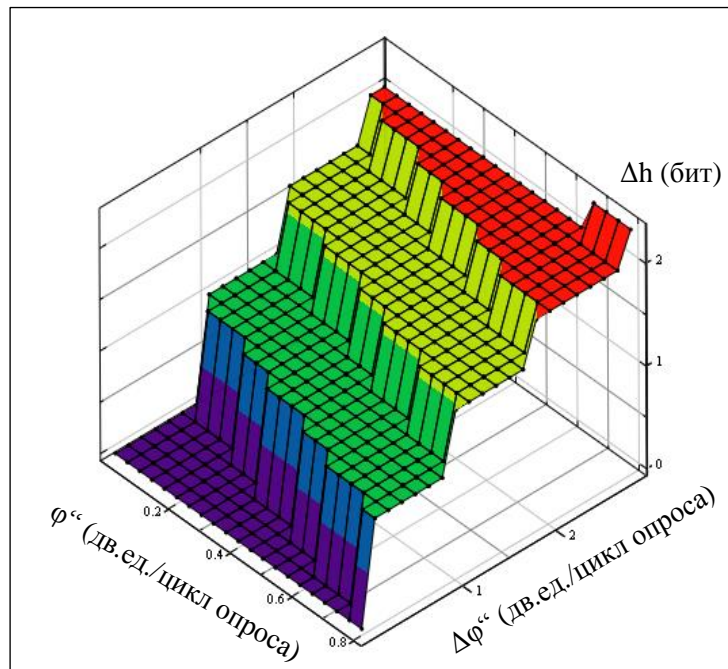


Рисунок 4.28 – График зависимости приращения апостериорной энтропии от нештатного изменения динамики телеметрических параметров РКН при коэффициенте прореживания «3»

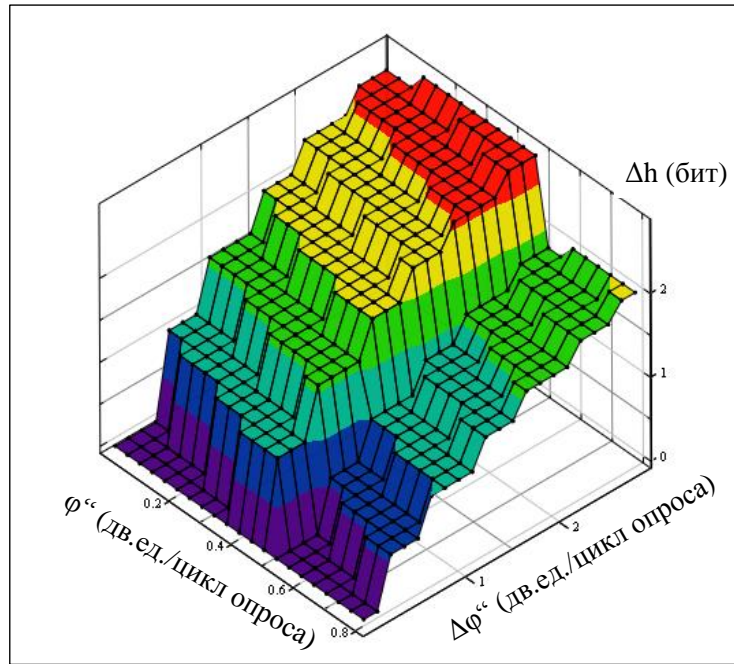


Рисунок 4.29 – График зависимости приращения апостериорной энтропии от нештатного изменения динамики телеметрических параметров РКН при коэффициенте прореживания «4»

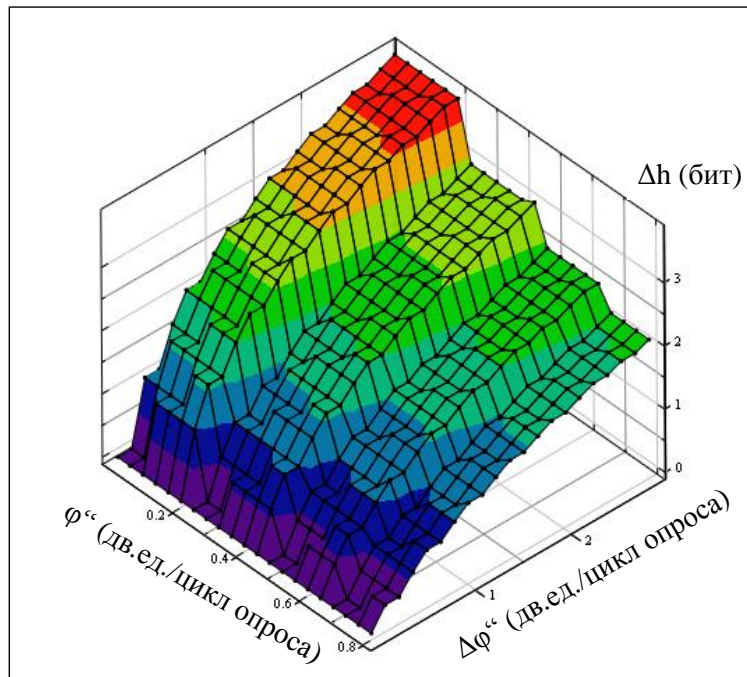


Рисунок 4.30 – График зависимости приращения апостериорной энтропии от нештатного изменения динамики телеметрических параметров РКН при коэффициенте прореживания «6»

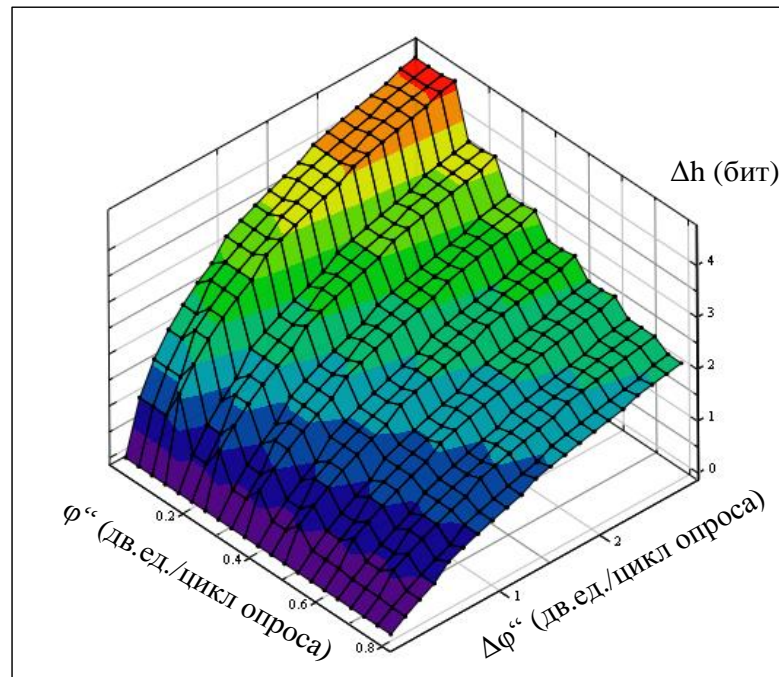


Рисунок 4.31 – График зависимости приращения апостериорной энтропии от нештатного изменения динамики телеметрических параметров РКН при коэффициенте прореживания «8»

Анализ графиков зависимостей, приведенных на рисунках 4.27 – 4.31, показывает, что наиболее чувствительны к нерасчетным изменениям динамики, связанным с возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН, сообщения высоко стабилизированных телеметрических параметров ($\varphi'' / f^{BITS^2} \leq 0,2$ дв.ед.) с высоким коэффициентом прореживания, что требует учета при определении программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН. При нештатном достижении предельных значений динамики значений телеметрических параметров приращения апостериорной энтропии составили:

- для высоко стабилизированных телеметрических параметров от 1 (при $k^{prLS} = 2$) до 5 бит (при $k^{prLS} = 8$);
- для низко стабилизированных телеметрических параметров от 1 (при $k^{prLS} = 2$) до 2 бит (при $k^{prLS} = 8$).

Таким образом, проведенная оценка полученных результатов решения задачи показывает работоспособность разработанного методического аппарата параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Разработанный методический аппарат обеспечивает необходимую точность решения задачи определения рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН. При этом, обеспечивается устойчивость функционирования адаптивной СИТО запусков РКН к нерасчетным изменениям динамики телеметрических параметров РН, вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН.

Оценка результатов вычислительного эксперимента подтвердила преимущества программного подхода для реализации адаптивных процедур сбора ТМИ. При этом повышение качества функционирования СИТО запусков РКН в зависимости от этапа пуска и полета РКН составляет: по обобщенному (интегральному) показателю «апостериорная энтропия потока телеметрических сообщений РКН на выходе СИТО» от минус 17,9 % до минус 25,9 % и от 16,5 % до 24,2 % по показателю «информативность потока телеметрических сообщений».

4.4 Обоснование рекомендаций по созданию адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения

На основе проведенного в рамках данного исследования анализа функционирования СИТО при обеспечении запусков РКН, факторов, влияющих на качество выполнения задач ИТО, результатов решения задачи по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН и их оценки разработаны следующие рекомендации по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН:

1) Распределение ограниченного ресурса пропускной способности телеметрических линий связи проводить с учетом компоновочной схемы РН, ее оснащении БИТС, БЦВМ и АСН, применяемых режимов информационного обслуживания измерительной аппаратуры телеметрических параметров,

циклограммы основных событий РН и параметров реализуемой баллистической схемы выведения орбитального блока:

- при проведении ИТО запусков РН, имеющих компоновочную схему «пакет-тандем», выделять большую относительную часть ресурса пропускной способности телеметрических линий связи на каналы с пристартовыми НИП ($\approx 62\%$ и $\approx 38\%$), чем при запусках РН с компоновочной схемой «пакет» ($\approx 56\%$ и $\approx 44\%$);

- при одинаковой компоновочной схеме РН необходимо более равномерное распределение ресурса пропускной способности между каналами передачи ТМИ при проведении обеспечения запусков РН, оснащенных программируемыми БИТС ($\approx 54\%$ и 46%), чем оснащенных не программируемыми или комбинированными ($\approx 57\%$ и 43%).

2) При определении состава участков плана формирования потока телеметрических сообщений, временных интервалов их действия, состава сообщений телеметрических параметров учитывать циклограмму основных событий функционирования РН, временные интервалы режимов функционирования РН на характерных участках пуска и полета, интервалы искажения ТМИ при проведении динамических операций РН:

- необходимо обеспечивать соответствие временных интервалов участков плана формирования потока телеметрических сообщений временным интервалам характерных участков функционирования систем и агрегатов РН, потребностям получателя информации на данных участках с учетом временных интервалов искажения ТМИ при проведении динамических операций РН и выдачей ТМИ через ЛЗ СКЗУ;

- отдавать приоритет включению в состав сообщений телеметрических параметров на участках плана формирования потока телеметрических сообщений, телеметрических параметрам, подлежащим обязательному контролю на соответствующем характерном участке функционирования систем и агрегатов РН.

3) Значения коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров на участках плана формирования потока телеметрических сообщений определять с учетом динамики изменения значений телеметрических параметров РН, частоты опроса телеметрических параметров БИТС и точности первичных преобразователей:

– при наличии достаточного ресурса пропускной способности на переходных режимах с высокой динамикой изменения значений телеметрических параметров назначать меньшие значения коэффициентов прореживания сообщениям телеметрических параметров РН, измеряемых преобразователями высокой точности – для обеспечения равенства коэффициентов потери информации значения коэффициентов прореживания должны составлять для сообщений телеметрических параметров с $\delta^R = \pm 0,5\%$ от 1 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} \geq 1,7$ дв. ед.) до 4 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} = 0,45$ дв. ед.), с $\delta^R = \pm 3,0\%$ – от 1 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,3$ дв. ед.) до 4 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} = 0,6$ дв. ед.);

– на этапах полета РКН с установившимися режимами функционирования необходимо устанавливать меньшие значения коэффициентов прореживания сообщениям телеметрических параметров РН, измеряемых преобразователями меньшей точности – для обеспечения не ухудшения апостериорной энтропии телеметрических сообщений значения коэффициентов прореживания должны составлять для сообщений телеметрических параметров с $\delta^R = \pm 3,0\%$ – от 1 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} \geq 0,9$ дв. ед.) до 8 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} = 0,04$ дв. ед.), с $\delta^R = \pm 0,5\%$ – от 1 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} \geq 2,85$ дв. ед.) до 20 (при $\varphi'' / f^{BITS^2} = 0,04$ дв. ед.);

– для обеспечения устойчивости к нерасчетным изменениям динамики значений, вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН, на установившихся режимах функционирования узлов и агрегатов РН назначать меньшие значения коэффициентов прореживания сообщениям высоко стабилизированных телеметрических параметров РКН – диапазоны приращения апостериорной энтропии сообщения телеметрических

параметров составляют для высоко стабилизированных телеметрических параметров от 1 (при $k^{prLS} = 2$) до 5 бит (при $k^{prLS} = 8$) и от 1 (при $k^{prLS} = 2$) до 2 бит (при $k^{prLS} = 8$) для низко стабилизированных телеметрических параметров.

Таким образом, сформированные на основе проведенного в данных исследованиях анализа, рекомендации позволяют провести параметрический синтез адаптивной СИТО запусков как современных, так и перспективных РКН. При этом учитываются все факторы, оказывающие существенное влияние на качество проведения ИТО пуска и полета РКН.

Выводы по четвертой главе

1. Сформированные расчетные исходные данные в рамках проведения исследований по параметрическому синтезу адаптивной СИТО запусков перспективных РКН представляют собой область данных, отражающих состав и параметры технических средств СИТО, характеристики процесса формирования сообщений телеметрических параметров БИТС РКН, функционирование РКН при подготовке к пуску, пуске и в полете, проведение получателем ТМИ анализа функционирования РКН, возмущающие воздействия на поток телеметрических сообщений.

2. Полученные на основе проведенных поисковых процедур и расчетов, результаты оценки влияния параметров технических средств СИТО, характеристик телеметрических параметров РКН, получателя информации и прогнозируемых возмущающих воздействий на варьируемые параметры СИТО позволяют определять рациональные программы сбора ТМИ при обеспечении запусков перспективных РКН. При определении рациональной программы сбора ТМИ специалисты в области ИТО запусков имеют возможность рационально распределить ограниченные ресурсы пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП в зависимости от компоновочной схемы РКН, применяемой для выведения КА на орбиту, и типом установленных на РН и РБ БРТС, дифференцированно устанавливая значения коэффициентов прореживания сообщений телеметрических параметров РКН с учетом параметров БИТС РКН и динамики изменения телеметрических параметров на различных участках пуска и полета РКН.

3. Проведенная оценка полученных результатов показывает работоспособность разработанного методического аппарата синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН. Разработанный методический аппарат обеспечивает необходимую точность решения задачи по определению рациональной программы сбора ТМИ при проведении обеспечения запусков РКН. При этом обеспечивается устойчивость функционирования СИТО запусков РКН к нерасчетным изменениям динамики значений телеметрических параметров РН,

вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН. Экспериментальные исследования подтвердили преимущества программного подхода для формирования адаптивных процедур сбора ТМИ.

4. Сформированные на основе проведенных исследований рекомендации позволяют провести параметрический синтез адаптивной СИТО запусков как современных, так и перспективных РКН. При этом учитываются все факторы, оказывающие существенное влияние на качество проведения ИТО пуска и полета РКН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации поставлена и решена важная научная задача по разработке методического аппарата параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, имеющей значение для развития технической науки в части применения методов системного анализа для создания и совершенствования систем информационного обеспечения запусков РКН, включая вопросы анализа, моделирования и оптимизации средств телеметрического контроля технического состояния РКН, совершенствования методов информационного сопровождения испытаний, сбора, обработки и анализа измерительной информации, оптимального планирования и управления функционированием СИТО запусков РКН, ориентированных на повышение эффективности информационного обеспечения запусков современных и перспективных РКН.

В ходе ее решения получены следующие основные наиболее важные и новые научные результаты:

1. На основе системного анализа функционирования СИТО запусков РКН в современных условиях и анализа методических подходов к формированию адаптивных процедур обоснована необходимость использования при проведении сбора ТМИ адаптивных к изменению состояния РКН процедур на основе метода «программно-кусочной дискретизации». Установлено, что адаптивная СИТО запусков РКН характеризуется всеми атрибутами сложной динамической системы, для которой определены: параметры, характеризующие степень достижения цели системы, параметры состояния и варьируемые параметры системы, допустимые пределы их изменения, функциональные зависимости параметров.

2. Методически обосновано использование при параметрическом синтезе СИТО запусков РКН показателей и критериев количества информации, в качестве обобщенного принят критерий «обеспечения минимальной апостериорной энтропии сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО при ограничении на информационную производительность по пропускной способности каналов передачи ТМИ». Сформулирована математическая постановка задачи параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков

перспективных РКН, решение которой заключается в: анализе исходных данных о составных элементах СИТО и потока телеметрических сообщений, определении количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений, распределении ресурса каналов передачи ТМИ между НИП, формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, оценке полученных результатов.

3. Разработана комплексная методика параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, которая отличается от существующих комплексным учетом всех факторов, оказывающих существенное влияние на информационные процессы, реализуемые составными элементами СИТО, что позволяет определять рациональные значения варьируемых параметров СИТО, составляющих рациональные программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН, и тем самым обеспечивать специалистов по анализу функционирования бортовых систем РН и РБ необходимой ТМИ в условиях ограниченного ресурса пропускной способности телеметрических линий связи и изменяющихся на различных этапах запуска РКН задач. Структурно комплексная методика представляет собой совокупность трех взаимосвязанных методик.

4. Разработана методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений. В основу методики положены математические описания процессов формирования и использования ТМИ, математический аппарат дискретной энтропии случайных событий и процессов и концепция «интервальных гипотез средств измерений и контроля». Методика предназначена для определения значений параметров СИТО, характеризующих степень достижения цели функционирования системы и используется как при поиске рациональных значений варьируемых параметров СИТО, так и при оценивании результатов параметрического синтеза. В методике введен новый показатель количества информации «коэффициент потери информации», использование которого позволяет сформировать единую относительную шкалу нормированного метрического пространства оценки сообщений разнородных телеметрических параметров РКН.

5. Разработана методика рационального распределения ресурса каналов передачи ТМИ между НИП, предназначенная для поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО, составляющих план задействования каналов передачи ТМИ. Методика базируется на совокупности математических описаний процесса передачи ТМИ. В отличие от существующих подходов в методике используется двухэтапный поиск параметров плана задействования каналов передачи ТМИ, что позволяет осуществить адаптированное к потоку телеметрических сообщений распределение ограниченного ресурса пропускной способности многоканальных телеметрических линий связи.

6. Разработана методика формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ, предназначенная для поиска рациональных значений варьируемых параметров СИТО, составляющих план формирования потока телеметрических сообщений. В основу методики положены математические описания процессов снижения информационной избыточности в элементах СИТО запусков РКН. От существующих подходов методика отличается применением при проведении поисковых процедур комплекса существующих и нового показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений, что позволяет свести многомерную частную задачу поиска значений коэффициентов прореживания сообщений разнородных телеметрических параметров РКН к одномерной в относительной шкале нормированного метрического пространства. Использование двухэтапного поиска позволяет адаптировать состав потока телеметрических сообщений к потребностям получателя ТМИ, наличию незадействованного ресурса пропускной способности каналов передачи ТМИ и парировать искажения ТМИ на участках динамических операций РКН.

7. На базе разработанной комплексной методики параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков перспективных РКН в рамках диссертации были проведены практические исследования, имеющие своей целью определить рациональную программу сбора ТМИ для конкретно заданных условий

и исходных данных проведения информационного обеспечения запуска РКН и оценку их результатов.

Реализация полученного варианта программы сбора ТМИ позволяет повысить качество СИТО запусков РКН по показателям:

- апостериорная энтропия потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО снижена от 17,9 % до 25,9 %;
- информативность потока сообщений телеметрических параметров РКН на выходе СИТО повышена от 16,5 % до 24,2 %;
- коэффициент потери информации снижен от 16,4 % до 23,5 %.

При этом, обеспечивается устойчивость функционирования адаптивной СИТО запусков РКН к нерасчетным изменениям динамики значений телеметрических параметров РН, вызванных возникновением и развитием нештатных (аварийных) процессов на борту РКН – потери информации не превысили 12,3 %.

Результаты исследования могут быть использованы специалистами в области телеметрии при разработке адаптивных алгоритмов формирования группового телеметрического сигнала современных и перспективных БРТС, разработке программ и методик ИТО испытаний перспективных образцов РКТ, анализа их летно-технических характеристик. Дальнейшие исследования планируется проводить в направлениях разработки адаптивных процедур формирования, обработки и анализа ТМИ в СИТО запусков РКН и управления КА.

Список сокращений и условных обозначений

АВД	– адаптивный временной дискретизатор
АК	– адаптивный коммутатор
АПК ПП	– аппаратно-программный комплекс полных потоков
АСН	– аппаратура спутниковой навигации
АУТ	– активный участок траектории
БЗУ	– бортовое запоминающее устройство
БИТС	– бортовая информационно-телеметрическая система
БМП	– быстроменяющийся параметр
БП	– буферная память
БРТС	– бортовое радиотелеметрическое средство
БЦВМ	– бортовая цифровая вычислительная машина
ВОЛС	– волоконно-оптическая линия связи
ГИКЦ	– Главный испытательный космический центр
ГСТ	– главная ступень тяги
ДУ	– двигательная установка
ИКК	– измерительный комплекс космодрома
ИТО	– информационно-телеметрическое обеспечение
КА	– космический аппарат
КСИСО	– комплекс средств измерений, сбора и обработки
КСр	– космическое средство
КРК	– космический ракетный комплекс
ЛЗ	– линия задержки
ЛИ	– летные испытания
ЛЭ	– летная эксплуатация
ММП	– медленноменяющийся параметр
НАКУ	– наземный автоматизированный комплекс управления
НАП	– навигационная аппаратура потребителя
НИК	– наземный измерительный комплекс

НИП	– наземный измерительный пункт
НИР	– научно-исследовательская работа
НПРС	– наземная приемно-регистрирующая станция
ОГ	– орбитальная группировка
ОИП	– отдельный измерительный пункт
ОКИК	– отдельный командно-измерительный комплекс
ОКР	– опытно-конструкторская работа
ПГСП	– пневмо- гидросистема питания
ППА	– преобразователь погрешности аппроксимации
РБ	– разгонный блок
РКН	– ракета космического назначения
РМВ	– реальный масштаб времени
РН	– ракета-носитель
СИТО	– система информационно-телеметрического обеспечения
СКЗУ	– статическое кольцевое запоминающее устройство
ССС	– система спутниковой связи
ТМИ	– телеметрическая информация
ТТХ	– тактико-технические характеристики
УСЛ	– устройство сопряжения с линией связи
ЦКП	– центр контроля полета
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина

Список литературы

1. Авдеев Б.Я. Адаптивная коммутация в информационно-измерительных системах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.16/ Авдеев Борис Яковлевич. - СПб., 2002. – 314 с.
2. Автоматизированная обработка телеметрической информации: учеб./ В.А. Чикуров, В.В. Шмелев, В.Г. Зиновьев [и др.] – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 473 с.
3. Агаджанов П.А., Горшков Б.М., Смирнов Г.Д. Основы радиотелеметрии. – М.: Воениздат, 1971. – 248 с.
4. Адаптивные телеизмерительные системы/ под ред. А.В. Фремке. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 246 с.
5. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управления. – М.: Наука, 1979. – 430 с.
6. Архипов В.К. Основы телеметрии быстропротекающих процессов. – М.: МИФИ, 1989. – 36 с.
7. Атетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации: учеб.для вузов/ под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотипное. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
8. Барсуков Ф.И., Максимов М.В. Радиотелеметрия. – М.: Воениздат, 1962. – 184 с.
9. Бахвалов Ю.О. Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность. – М.: ООО «АИР», 2015. – 228 с.
10. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
11. Богнер Р. Введение в цифровую фильтрацию. – М.: Мир, 1977. – 216 с.
12. Богомолов А.М., Твердохлебов В.А. Диагностика сложных систем. – Киев: Наукова думка, 1974 – 128 с.
13. Болнокин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез автоматических систем управления на ЭВМ. Алгоритмы и программы: справочник. – М.: Радио и связь. 1991. – 256 с.

14. Большаков Д.А. Распределенная система приема телеметрической информации при испытаниях и эксплуатации летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.07/ Большаков Дмитрий Андреевич. – Красноярск, 2011. – 118 с.

15. Бондарева М.К., Куимов А.В. Методический аппарат параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения// Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: Сборник материалов III Всеросс. науч.-практ. конф. г. Москва, 29 декабря 2017 г. – М.: ФГБНУ «Аналитический центр» Минобрнауки России, 2018. – 200 с. С 113 – 116.

16. Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов/ С.М. Переверткин, А.В. Кантор, Н.Ф. Бородин, Т.С. Щербакова. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

17. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А., Справочник по математике для инженеров и вузов. – М.: Наука, 1981. – 706 с.

18. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

19. Воздушно-космическая телеметрия: сборник материалов/ под ред. К.В. Трофимова. – М.: Воениздат, 1968. – 276 с.

20. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 510 с.

21. Воронцов В.Л. Система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения. Стратегии совершенствования и применения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 236 с.

22. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб. пособие для вузов/ И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.

23. Галеев Э.М., Тихомиров В.М. Оптимизация: теория, примеры, задачи. – М.: Элиториал УРСС, 2000. – 320 с.

24. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
25. Говорухина Т.Н. Модели, методы и алгоритмы управления и обработки информации адаптивными реконфигурируемыми модулями в телеметрических системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01/ Говорухина Татьяна Николаевна. – Курск, 2013. – 23 с.
26. Голубев И.Ю. Модели и методы поддержки оптимального проектирования резервированных систем сбора и обработки информации кластерной архитектуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12/ Голубев Иван Юрьевич. – СПб., 2013. – 19 с.
27. Гончаров В.А. Методы оптимизации: учеб. пособие. – М.: Высшее образование, 2009. – 191 с.
28. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
29. Деев В.В., Чикуров В.А. Формирование и передача телеметрической информации в современных системах: учеб. пособие – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 89 с.
30. Дмитриев А.К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 172 с.
31. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика. – Л.: МО СССР, 1987. – 522с.
32. Достижения в области телеметрии/ под ред. А.П. Мановцева. – М.: Мир, 1970. – 360 с.
33. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования выбора вариантов систем. – М.: Наука, 1982. – 328 с.
34. Дятлов В.А., Кабанов А.Н., Милов Л.Т. Контроль динамических систем. – Л.: Энергия, 1978. – 88 с.
35. Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. – М.: Наука, 1982. – 432 с.

36. Ильин В.А. Телеуправление и телеизмерения: уч. пособие для вузов. 3-е изд., переаб. и доп. – М.: Энегроиздат, 1982. – 560 с.
37. Ильин Л.К., Рыковский С.И. Принципы построения и особенности реализации систем экспресс-обработки научной ТМИ. Задачи и методы обработки космической информации/ под ред. П.Э. Эльясберга. М.: Наука, 1987. – 183 с.
38. Информационные процессы в автоматизированных системах сбора и обработки информации/ под общ. ред. Ю.Г. Ростовцева – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1981. – 223 с.
39. Киселев А.И., Медведев А.А., Меньшиков В.А. Космонавтика на рубеже тысячелетия. Итоги и перспективы. – М.: Машиностроение – Полет, 2001. – 672 с.
40. Ковалев Б.К. Развитие ракетно-космических систем выведения: уч. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 398 с.
41. Коврига Ю.Ю. Автоматизация проектирования программы телеметрических измерений изделий ракетно-космической техники: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12/ Коврига Юрий Юрьевич. – Самара, 2007. – 180с.
42. Космонавтика XXI века/ под ред. акад. РАН К.Е. Чертока. – М.: Изд-во «РТСофт», 2010. – 864 с.
43. Космос: оружие, дипломатия, безопасность/ под ред. А.Г. Арбатова, В.З. Дворкина. – М.: Российская политическая энциклопедия, 2009. – 175 с.
44. Кошевой А.А. Телеметрические комплексы летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
45. Коэн Пол Дж. Теория множеств и континуум-гипотеза. – М.: Мир, 1969. – 345 с.
46. Куимов А.В., Кононенко А.В. Методические основы модели функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения// Физика волновых процессов и радиотехнические системы, том 21. – Самара.: Изд-во ПГУТиИ. – 2018. – № 1. – С. 48-53.
47. Куимов А.В., Буторин В.В., Евенко А.В. Обоснование структурно-логической схемы методики синтеза адаптивной системы информационно-

телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения// Межотраслевой научно-технический журнал «Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России» – М.: ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас» – 2019. – № 2. – С. 45 – 49.

48. Куимов А.В., Кононенко А.В. Практические исследования по созданию адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения// Физика волновых процессов и радиотехнические системы, том 22. – Самара: Изд-во ПГУТИ. – 2019. – № 2. – С. 41 – 47.

49. Куимов А.В., Краевая С.Ю. Планирование работы средств наземного измерительного комплекса при обеспечении пусков ракет космического назначения// Научно-технические технологии, том 20. – М.: Радиотехника. – 2019. – № 7. – С. 60 – 70.

50. Куимов А.В. Методический аппарат обоснования рационального варианта комплекса средств измерений, сбора и обработки измерительной информации в соответствии с потребностями обеспечения летных испытаний изделий ракетно-космической техники и ракетного вооружения// Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли, том 10. – Санкт Петербург: ООО Издательский дом Медиа Паблицер – 2018. – №5. – С. 15 – 25.

51. Куимов А.В., Краевая С.Ю. Комплексная методика параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения// Материалы XXI межведомственной научно-практической конференции «Научно-практические аспекты совершенствования управления космическими аппаратами и информационного обеспечения запусков космических аппаратов», 26 – 27 октября 2017 г. г. Краснознаменск, ГИКЦ МО РФ им. Г.С. Титова. – 2017. – С. 224 – 236.

52. Куимов А.В., Краевая С.Ю., Лазутин О.Г. Методические основы синтеза программы гибкого функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения// Научно-методический сборник трудов 9 научных чтений по военной

космонавтике памяти М.К. Тихонравова «Космос и обеспечение безопасности России» №3(553). – Тверь.: ЦНИИ ВВКО Минобороны России, – 2018. – С. 265 – 276.

53. Куимов А.В., Краевая С.Ю., Скопин М.Ю. Использование Марковских случайных процессов в математической модели системы дистанционного управления радиотехническими средствами для оптимизации работы системы// Материалы XXI межведомственной научно-практической конференции «Научно-практические аспекты совершенствования управления космическими аппаратами и информационного обеспечения запусков космических аппаратов», 26 – 27 октября 2017 г. г. Краснознаменск, ГИКЦ МО РФ им. Г.С. Титова. – 2017. – С. 195 – 199.

54. Куимов А.В. Результаты прикладных исследований по определению рациональной программы сбора телеметрической информации при обеспечении запусков ракет космического назначения// Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: Сборник материалов III Всеросс. науч.-практ. конф. г. Москва, 29 декабря 2017 г. – М.: ФГБНУ «Аналитический центр» Минобрнауки России, 2018. – 200 с. С. 160 – 164.

55. Куимов А.В. Методика определения количества информации о состоянии ракеты космического назначения в потоке телеметрических сообщений// Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, том 6 (по материалам IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационные технологии», г. Москва, 5 – 7 июня 2018 г.). – М.: АО «Российские космические системы». – 2019. – № 4. – С. 51 – 58.

56. Куимов А.В., Буторин В.В. Обоснование структуры показателей и критериев качества адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения// Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: Сборник материалов VI Всеросс.

науч.-практ. конф. г. Москва, 28 декабря 2020 г. – М.: ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр», 2021. – 566 с. С. 485 – 490.

57. Куимов А.В., Буторин В.В. Формализация основных процессов функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения// Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления: Сборник материалов VI Всеросс. науч.-практ. конф. г. Москва, 28 декабря 2020 г. – М.: ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр», 2021. – 566 с. С. 491 – 495.

58. Куликовский Л.Ф., Мотов В.В. Теоретические основы информационных процессов: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. – 248.

59. Куратовский К., Мостовский А. Теория множеств. – М.: Мир, 1970. – 413 с.

60. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний: задачи и алгоритмы. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 222 с.

61. Летные испытания ракет и космических аппаратов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, А.В. Шаронов, А.С. Голубков; под ред. Е.И. Кринецкого. – М.: Машиностроение, 1979. – 464 с.

62. Майданович О.В., Жигулевцев Ю.Н., Дорошевич П.В., Краевая С.Ю., Куимов А.В. Обоснование интеллектуализации управления средствами наземного измерительного комплекса ракет космического назначения// Сборник трудов XXII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов г. Самара, 13 – 14 июля 2019 г. Самара.: изд-во ФГБУН Самарский федеральный исследовательский центр Российской Федерации, 2020. – С. 93 – 97.

63. Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 440 с.

64. Мановцев А.П. Основы теории радиотелеметрии. – М.: Энергия, 1973. – 592 с.

65. Математическое моделирование в технике: учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2003. – 496 с.

66. Матюшин М.М. Системный анализ, онтологический синтез и технологические средства обработки информации в процессах принятия решений при оперативном управлении полетом объектов космической техники с Земли: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Матюшин Максим Михайлович. – М., 2013. – 40 с.

67. Матюшин М.М., Куимов А.В. Формирование рационального потока телеметрических сообщений изделий ракетно-космической техники при ограничениях на ресурсы каналов передачи информации// Пилотируемые полеты в космос. – Звездный городок: Изд-во ФГБУ НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина – 2021. – № 3 (40). – С. 66 – 81.

68. Мессарович М., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

69. Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем: учеб. пособие/ А.М. Загребаев, Н.А. Криныца, Ю.П. Кулябичев, Ю.Ю. Шумилов. – М.: МИФИ, 2007. – 332 с.

70. Методы отработки научных и народнохозяйственных ракетно-космических комплексов/ под общ. ред. В.Ф. Грибанова. – М.: Машиностроение, 1995. – 352 с.

71. Метрология и радиоизмерения: учеб. для вузов/ В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков [и др.]; под ред. В.И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2006. – 526 с.

72. Минаев А.А. Медиаторная сеть сбора и обработки данных в системах распределенной диагностики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01, 05.11.17/ Минаев Антон Андреевич. – Пенза, 2017. – 20 с.

73. Мирошкин И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.

74. Михалевич В.С., Кукса А.И. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

75. Неймарк Ю.И., Коган Н.Я., Савельев В.П. Динамические модели теории управления. – М.: Наука, 1985. – 400 с.

76. Некрасов М.В. Автоматизированная система многопоточного приёма, обработки и анализа телеметрической информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06/ Некрасов Михаил Викторович. – Красноярск, 2014. – 20 с.

77. Николаев Д.А. Модель и алгоритмы оперативной структурно-параметрической обработки телеметрической информации космических средств: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01/ Николаев Дмитрий Андреевич. – СПб., 2017. – 17 с.

78. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

79. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде. – М.: Физматлит, 2002. – 176 с.

80. Об утверждении федеральной целевой программы «Развитие космодомов на период 2017–2025 годов в обеспечение космической деятельности Российской Федерации [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 19 сентября 2017 года. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

81. Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу [Электронный ресурс]: утв. Президентом РФ от 19.04.2013 N Пр-906. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

82. Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. Президентом РФ 14 января 2014 г. N Пр-51. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

83. Основы теории испытаний. Экспериментальная обработка ракетно-космической техники/ В.А. Лисейкин, Н.Ф. Моисеев, Г.Г. Сайдов, О.П. Фролов; под ред. д-ра техн. наук В.К. Чванова. – М.: Машиностроение – Полет / Виарт Плюс, 2015. – 260 с.

84. Отбраковка аномальных результатов измерений/ А.Ф. Фомин, О.Н. Новоселов, А.В. Плющев [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 200с.

85. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989. – 360 с.

86. Португалов В.М., Семенов А.И. Теория расписаний. – М.: Знания, 1972. – 64 с.

87. Приборно-модульные универсальные автоматизированные системы: справочник/ В.А. Кузнецов, В.Н. Строителей, Е.Ю. Тимофеев [и др.]; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Радио и связь, 1993. – 304 с.

88. Прикладные исследования и проектирование ключевых элементов и технологий управления КА, бортовых комплексов управления по теме: «Обоснование путей повышения надежности управления группировками КА различного назначения. Исследование методологии планирования каналов связи спутников-ретрансляторов. Разработка математической модели задачи планирования.» (Шифр СЧ НИР «Астролябия» (КА-2)): отчет о составной части НИР (промежуточный, этап 2)// Д.А. Орлов, А.В. Манойло, В.С. Паненко, А.В. Куимов и др. – Королев: АО «ЦНИИМаш», 2021. – 251 с.

89. Прикладные исследования и проектирование ключевых элементов и технологий управления КА, бортовых комплексов управления по теме: «Разработка моделей технологий управления космическими аппаратами и их группировками с учетом возможных вариантов развития аппаратуры КА, группировок КА, средств и систем управления ими, в том числе технологий навигационного обеспечения с использованием аппаратуры спутниковой навигации применительно к типовым участкам полета перспективных КА.» (Шифр СЧ НИР «Астролябия» (КА-2)): отчет о составной части НИР (промежуточный,

этап 2)// Б.А. Кучеров, А.М. Титов, В.С. Паненко, А.В. Куимов и др. – Королев: АО «ЦНИИМаш», 2021. – 255 с.

90. Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. Изд. 2-е, перераб. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.

91. Рабинович В.И., Цапенко М.П. Информационные характеристики средств измерения и контроля. – М.: Энергия, 1968. – 96 с.

92. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории управления. – М.: Сов. радио, 1976. – 344с.

93. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 1, пер с англ. – М.:Мир, 1986. – 350 с.

94. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 2, пер с англ. – М.: Мир, 1986. – 320 с.

95. Ростовцев Ю.Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации. – СПб.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1992. – 717 с.

96. Рубичев Н.А. Измерительные информационные системы: учеб. пособие. – М.: Дрофа, 2010. – 334 с.

97. Румянцев Е.Л., Слюсарь В.В. Информационные технологии: учеб. пособие/ под ред. проф. Л.Г. Гагариной, – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2007. – 256 с.

98. Саврасов Ю.С. Оптимальные решения. – М.: Радио и связь, 2000. – 152 с.

99. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2005. – 320 с.

100. Сейдж Э. П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами: пер. с англ./ под ред. Б.Р. Левина. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.

101. Сильвестров С.Д., Васильев В.В. Структура космических измерительных систем. – М.: Сов. радио, 1979. – 224 с.

102. Советов, Б. Я. Информационные технологии. – М.: Высш. шк., 2004. – 263 с.

103. Современная телеметрия в теории и на практике: Учеб. курс/ А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов [и др.] – СПб.: Наука и техника, 2007. – 672 с.

104. Соколов И.С. Методы и модели восстановления структуры группового телеметрического сигнала: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18/ Соколов Игорь Сергеевич. – СПб., 2012. – 17 с.

105. Сукманов А.В. Разработка метода синтеза системы сбора телеметрических данных: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01/ Сукманов Александр Владимирович. – Пятигорск, 2016. – 18 с.

106. Сухарев А.Г., Тихомиров А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 368 с.

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

108. Таха Хэдли А. Введение в исследование операций. 6-е изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом Вильямс, 2001. – 910 с.

109. Телеметрия/ В.И. Белицкий, Р.И. Зверев, В.М. Морозов [и др.] – Л.: МО СССР, 1984. – 465 с.

110. Тепляков И.М. Радиотелеметрия. М.: Сов. радио, 1966. – 311 с.

111. Теоретические основы информационно-измерительных систем/ В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Еременко [и др.]; под ред. чл.-кор. НАН Украины В.П. Бабака. – Киев: Наукова думка, 2014. – 832 с.

112. Тихомиров С.А. Алгоритмы анализа телеметрической информации и поддержки принятия решений в системах автоматизации испытаний космических ракет-носителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18/ Тихомиров Сергей Александрович. – Рязань, 2014. – 18 с.

113. Уманский С.П. Ракеты-носители. Космодромы. – М.: Изд-во Рестарт, 2001. – 216 с.

114. Федяев А.Ю. Алгоритмы предварительной обработки для задач сжатия данных в информационно-измерительных системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16/ Федяев Александр Юрьевич. – Хабаровск, 2013. – 17 с.

115. Феоктистов К.П. Космическая техника. Перспективы развития: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 172 с.
116. Фремке А.В. Телеизмерения. – М.: Высшая школа, 1968. – 262 с.
117. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структура и алгоритмы, системотехническое проектирование.: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
118. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
119. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2004. – 256 с.
120. Шумилин А.А. Авиационно-космические системы США. История, современность, перспективы. – М.: Вече, 2005. – 528 с.
121. Эльшафей М.А. Исследование методов формирования единого носителя данных телеизмерений в многоканальной системе регистрации телеметрической информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01/ Эльшафеи Мохамед Абдельмонейм Таха. – М., 2015. – 17 с.
122. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование. – М.: Сов.радио, 1980. – 144 с.

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»

Соловьев В. А.

2022 г.



Акт №114-б/318 от 10.03.2022

об использовании (внедрении) результатов диссертационной работы**Куимова Андрея Владимировича****на тему «Комплексная методика параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения»**

Комиссия ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» в составе председателя комиссии Калашникова Д.А. и членов комиссии: Моисеева В.В., Прохорова А.В., рассмотрев материалы диссертационной работы Куимова А.В., начальника сектора ЦУП АО «ЦНИИмаш», аспиранта кафедры 604 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», пришла к заключению, что результаты работы Куимова А.В. были использованы при выполнении СЧ ОКР «Управление полетом российского сегмента МКС и космических кораблей. Проведение космических экспериментов. Создание модернизированного скафандра для внекорабельной деятельности. Медицинское и медико-биологическое обеспечение полетов, проведение работ по медицинскому отбору кандидатов в космонавты. Проведение работ по расширению ассортимента продуктов питания для экипажей». (Шифр СЧ ОКР: «МКС (Эксплуатация) - Эксплуатация-4») по государственному контракту от 23.10.2019 № 1922730301751217000241351/351-8647/19/175 между Госкорпорацией «Роскосмос» и ПАО «РКК «Энергия».

В указанной СЧ ОКР были использованы следующие результаты работы Куимова А.В.:

- методика рационального распределения ресурса каналов передачи телеметрической информации между наземными измерительными пунктами.

Использование при планировании сеансов управления орбитальными модулями российского сегмента (РС) МКС, пилотируемыми и грузовыми кораблями разработанного автором методического аппарата позволило:

- равномерно распределять нагрузку на каналы системы информационного обмена широкополосной информации в наземном комплексе управления (НКУ) РС МКС

на базе магистральной цифровой сети связи с использованием волоконно-оптических линий связи и спутниковой системой связи «Приморка»;

– осуществлять адаптивное к объемам данных всех видов информации (командно-программной, телеметрической, телевизионной ...) распределение ресурсов каналов системы информационного обмена широкополосной информации между техническими средствами НКУ РС МКС на разных наземных командно-измерительных пунктах.

Председатель комиссии:

Калашников Д.А., руководитель центра 11Ц

Члены комиссии:

Моисеев В.В., начальник отдела 111

Прохоров А.В, заместитель начальника
отдела – начальник сектора



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»



Акционерное общество
«Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»)

ул. Пионерская, д. 4, корп. 22
г.о. Королев,
Московская область, 141070

Тел.: +7 (495) 513 5951
Факс: +7 (495) 512 2100

e-mail: corp@tsniimash.ru
http://www.tsniimash.ru

ОГРН 1195081054310
ИНН/КПП 5018200994/501801001

исх. № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора АО «ЦНИИмаш» –
начальник ЦУП

М.М. Матюшин

2022 г.

АКТ № 08/АК-01 от 15.03.2022

о внедрении результатов диссертационной работы

Куимова Андрея Владимировича

В соответствии с распоряжением первого заместителя генерального директора АО «ЦНИИмаш» – начальника ЦУП № 08-82рп от 14.03.2022 г. комиссия в составе: председатель к.т.н. Кутоманов А.Ю., члены комиссии: Манойло А.В., Махалов Д.А., к.т.н. Жигастова О.К., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Комплексная методика параметрического синтеза адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения» на соискание ученой степени кандидата технических наук специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)» в диссертационном совете Д 24.2.327.03 на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», использованы при разработке:

1. Предложений по совершенствованию алгоритмов телеметрического обеспечения, их применения для современных и планируемых группировок КА.
2. Предложений по совершенствованию методологии планирования каналов связи спутников-ретрансляторов.

Использование указанных результатов позволяет повысить эффективность проведения работ по телеметрическому обеспечению запусков и управления КА.

Результаты внедрены при выполнении СЧ НИР по теме:

1. СЧ НИР «Астролябия» (КА-2) НТО № 851-0226А/19/238-2-08201-612-2021.

Председатель комиссии:

А.Ю. Кутоманов

Члены комиссии:

А.В. Манойло

Д.А. Махалов

О.К. Жигастова