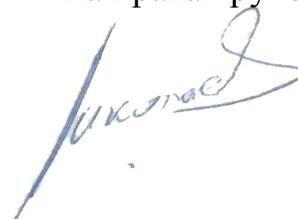


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

Николаев Дмитрий Андреевич



**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОПЕРАТИВНОЙ
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Специальность 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации
(в технике и технологиях)»

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент Каргин В. А.

Санкт-Петербург — 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1.....АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СБОРА И ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	11
1.1 Анализ существующих программных комплексов автоматизированной обработки телеметрической информации космических средств	11
1.1.1 Условия получения телеметрической информации.....	11
1.1.2 Существующие средства разработки комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации.....	20
1.2 Анализ условий приема и передачи телеметрической информации ракеты-носителя типа «Союз»	22
1.2.1 Классификация помех и погрешностей, встречающихся при обработке телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз».....	22
1.2.2 Классификация телеметрируемых параметров ракет-носителей типа «Союз»	27
1.3 Анализ основных этапов и видов обработки телеметрической информации ракеты-носителя типа «Союз».....	29
1.4 Исследование особенностей телеметрической информации ракеты-носителя «Союз-2».....	34
1.5 Формальная постановка задачи исследования	37
Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2»	41
2.1 Характеристики вероятностной структуры телеметрируемых процессов	41
2.2 Разработка и адаптация модели телеметрируемых процессов на уровне одномерных распределений	47
2.2.1 Исследование характеристик одномерных распределений телеметрируемых процессов.....	47

2.2.2	Исследование плотности вероятности телеметрируемого процесса.....	52
2.2.3	Исследование модели временной структуры телеметрируемых процессов.....	62
2.2.4	Адаптация модели временной структуры телеметрируемых процессов.....	67
2.3	Разработка и настройка модели телеметрируемых процессов на уровне двумерных распределений.....	73
2.3.1	Разработка модели телеметрируемых процессов в частотной области.....	73
2.3.2	Исследование взаимосвязи характеристик модели телеметрируемых процессов в частотной области с характеристиками «превышения уровня».....	76
2.3.3	Адаптация модели телеметрируемых процессов в частотной области.....	79
	Выводы по главе 2	84
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ НЕОДНОРОДНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ		
86		
3.1	Существующие алгоритмы обнаружения измерений, содержащих аномальные значения.....	86
3.2	Разработка структурно-параметрического алгоритма обнаружения измерений, содержащих аномальную погрешность.....	87
3.3	Разработка алгоритма совместного оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и степени загрязнения телеметрируемых процессов	94
3.3.1	Оценивание обобщенных спектрально-корреляционных характеристик....	94
3.3.2	Оценивание моментов одномерных распределений телеметрируемых процессов	99
3.3.3	Совместное оценивание обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины загрязнения телеметрируемого процесса.....	102
	Выводы по главе 3	105
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....		
106		

4.1 Описание специального программного обеспечения для оперативной обработки телеметрической информации.....	106
4.2 Настройка основных процедур специального программного обеспечения.....	110
4.2.1 Процедура динамического формирования выборки.....	110
4.2.2 Процедура оценивания характеристик превышения уровня.....	111
4.2.3 Процедура оценивания спектрально-корреляционных характеристик.....	115
4.2.4 Процедура оценивания характеристик распределений телеметрируемых процессов	118
4.3 Проверка функционирования макета специального программного обеспечения по телеметрической информации летных испытаний ракеты-носителя «Союз-2»	123
4.3.1 Достоверность результатов работы.....	123
4.3.2 Робастность результатов работы	126
4.3.3 Временная сложность разработанного математического обеспечения	127
Выводы по главе 4	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРА ОСЕВОЙ ПЕРЕГРУЗКИ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНТРОПИИ И КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ЗАПУСКУ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2» С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ «COROT»	147

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	150
--	------------

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	155
--	------------

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Совершенствование старых и разработка новых видов космических средств и электронно-вычислительных устройств, расширение круга решаемых задач и развитие современных информационных технологий приводит к увеличению объема телеметрической информации, требующейся для оценивания технического состояния космических средств и прогнозирования его изменения как в целом, так и отдельных систем и агрегатов.

К настоящему времени по вопросам исследования, обработки и анализа телеметрической информации космических средств получены многочисленные результаты, выполнено большое число научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (ОКР «Плесецк», «Русь-М», НИР «Телеприбор» и др.) в организациях промышленности (РНИИ КП, СКБ «Орион», ЦНИИ Машиностроения, РКЦ «Прогресс»), Российской академии наук (Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации) и высшей школы (Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского). В последнее время наиболее интересные результаты и решения научно-практических задач в области обработки и автоматизированного анализа тематической информации получены научными школами, возглавляемыми профессорами А.К. Дмитриевым, В.Б. Мальцевым, П.В. Новицким, Б.В. Соколовым, В.И. Тихоновым, В.И. Хименко, А.Ф. Фоминым, Р.М. Юсуповым.

Существующие системы оперативной обработки телеметрической информации в большинстве своем не автоматизированы, а для оценивания качества поступающей измерительной информации используется в основном допусковой контроль. Решение задачи оценивания технического состояния космических средств в реальном масштабе времени производится вручную экспертом-оператором, при этом решение принимается на основе анализа поведения только отдельных групп параметров.

Для проведения мониторинга состояния космических средств на основе анализа полного потока телеметрической информации в реальном масштабе времени возникает необходимость разработки аппаратно-программных комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации. Существующие информационные технологии обеспечивают получение обобщенных характеристик, идентификацию состояния, выдачу рекомендаций по управлению, учет особенностей эксплуатации космических средств в реальном масштабе времени и интеграцию разрозненных систем в единую систему мониторинга. В этих комплексах решение задачи оценивания технического состояния объекта космических средств проводится по формальным моделям и связано с дефицитом времени, сложностью и многопоточностью схем автоматизированного анализа.

В то же время существенная неопределенность исходной телеметрической информации, вызванная ее неоднородностью, избыточностью и разнообразием смыслового содержания, не позволяет классическими методами провести синтез алгоритмов оперативной подготовки. Большинство отечественных и зарубежных результатов исследования телеметрической информации представляются весьма разрозненными, они не базируются на едином подходе и их затруднительно использовать в задачах оперативного анализа при ограниченных вычислительных ресурсах. Поэтому необходимо провести исследование вероятностных характеристик информационных процессов, телеметрируемых с бортовых систем космических средств, в условиях неопределенности.

Цель диссертационной работы. Обеспечить функционирование комплексов автоматизированного анализа технического состояния бортовых систем космических средств в реальном масштабе времени.

Объектом исследования является телеметрическая информация космических средств, **предметом исследований** являются методы и алгоритмы оперативной обработки телеметрической информации космических средств.

Основные задачи. В рамках проводимых диссертационных исследований были поставлены задачи:

1. Провести системный анализ условий формирования, передачи и обработки телеметрической информации, поступающей от космических средств.
2. Провести исследование телеметрической информации космических средств, выбрать и обосновать модель телеметрируемых процессов, поступающих на вход комплексов автоматизированного анализа.
3. Разработать алгоритм оперативного оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик телеметрической информации.
4. Разработать алгоритм структурно-параметрической оперативной обработки неоднородной телеметрической информации.
5. Разработать специальное программное обеспечение для реализации алгоритмов структурно-параметрической оперативной обработки телеметрической информации в составе комплекса автоматизированного анализа основных параметров ракеты-носителя.

Методы исследования. При выполнении диссертационных исследований использовались общие методы системного анализа, теории вероятностей, математической статистики, общей теории случайных процессов, теории выбросов случайных процессов и методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

1. По результатам исследований телеметрируемых процессов и проведенного имитационного моделирования разработана модель телеметрируемых функциональных и функционально-диапазонных параметров ракеты-носителя.

2. Получены аналитические зависимости характеристик «превышения уровня» от моментных и спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов ракеты-носителя.

3. При оперативной обработке телеметрической информации посредством использования измерителей типа «счетчики нулей» для оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик учтено влияние формы плотности распределения и формы спектра телеметрируемого процесса.

4. Повышена устойчивость алгоритмов структурно-параметрической обработки телеметрической информации на фоне флуктуационных помех.

Практическая значимость. Результаты выполненных в диссертационной работе исследований позволили:

- повысить достоверность оперативных заключений о техническом состоянии космических средств, получаемых комплексами автоматизированного анализа в условиях помеховой обстановки;

- повысить робастность алгоритмов структурно-параметрической оперативной обработки телеметрической информации при смене каналов ее получения;

- реализовать элементы специализированного программного обеспечения структурно-параметрической оперативной обработки телеметрической информации в составе комплекса автоматизированного анализа ракеты-носителя.

В целом, все полученные в работе результаты направлены на формирование единого системного подхода к обработке и анализу информационных процессов и помех, характерных для телеметрических систем передачи, приема, преобразования и обработки информации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Модель информационного процесса на входе комплекса автоматизированного анализа ракеты-носителя.

2. Алгоритм совместного оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины загрязнения телеметрируемого процесса по характеристикам «превышения уровня», учитывающий влияние формы плотности вероятности и спектра.

3. Структурно-параметрический алгоритм оперативного обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность.

4. Результаты исследования телеметрической информации, полученной в ходе летных испытаний ракет-носителей типа «Союз-2».

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы реализованы на предприятии ЗАО «СКБ Орион» при разработке программно-аппаратных комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации для оперативного оценивания технического состояния ракеты-носителя «Союз-2» на активном участке полета.

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на постоянно действующем семинаре кафедры «Компьютерной математики и программирования», на ежегодных Научных сессиях Санкт-Петербургского Государственного университета аэрокосмического приборостроения (г. Санкт-Петербург 2009 - 2014 гг.), на Всероссийской научно-технической конференции ФГУП «РНТМИ КП» «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (г. Москва 2009 г.) на семинарах кафедры «Информационных систем» Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 13 печатных работах, из которых 6 в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (125 наименований) и шести приложений. Объем основной части работы составляет 135 страниц машинописного текста.

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость проводимых исследований, определены цели работы, основные задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы результаты, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются и систематизируются цели и задачи автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств в реальном масштабе времени; проводится системный анализ особенностей процессов формирования и передачи поступающей телеметрической информации космических средств; проводится формальная постановка задач исследования.

Во второй главе проводится формирование и уточнение элементов множества ограничений, обосновывается модель телеметрируемых процессов в системах обработки информации ракеты-носителя «Союз-2». Получены соотношения, позволяющие проводить оценивание моментных и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик с использованием статистики характеристик «превышения уровня» траектории телеметрируемого процесса. Предложена метрика разделения информационных процессов с различными формами спектра.

В третьей главе проводится разработка алгоритмов структурно-параметрической оперативной обработки телеметрируемых процессов, удовлетворяющих сформированному множеству ограничений и множеству показателей качества.

В четвертой главе разрабатывается специальное программное обеспечение для структурно-параметрической оперативной обработки телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз»; производится настройка специального программного обеспечения и обработка экспериментальных данных, полученных по результатам летных испытаний ракеты-носителя «Союз-2»; проводится оценивание показателей качества обработки телеметрируемых процессов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СБОРА И ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В главе проводится системный анализ целей и задач автоматизированного обработки телеметрической информации космических средств в реальном масштабе времени; анализируются и систематизируются особенности процессов формирования и передачи поступающей телеметрической информации космических средств; проводится формализация основных задач исследования.

1.1 Анализ существующих программных комплексов автоматизированной обработки телеметрической информации космических средств

1.1.1 Условия получения телеметрической информации

Анализ особенностей современных программных комплексов, предназначенных для автоматизации процесса анализа телеметрической информации, показал отсутствие средств по борьбе с неоднородностями поступающей телеметрической информации, что делает их мало приспособленными для решения задач оперативного автоматизированного анализа.

Современный этап развития космической отрасли характеризуется увеличением объема и сложности решаемых ею научных и народнохозяйственных задач, что приводит к росту объема телеметрической информации, необходимой для принятия решений, связанных с управлением и контролем технического состояния космических средств. Для повышения достоверности и оперативности принимаемых решений в настоящее время ведется разработка специализированных аппаратно-программных комплексов. Они предназначены для решения задач оценивания технического состояния космических средств, для оперативного получения заключений о контролируемых событиях, происходящих на борту, и визуализации полученных результатов на средствах отображения информации полигонного комплекса.

Автоматизированный анализ телеметрической информации космических средств представляет собой процесс получения оценки технического состояния контролируемого объекта с целью определения правильности отработки его временных программ, работы систем и агрегатов [23, 65, 82, 89].

Основными достоинствами разрабатываемых комплексов являются (Рисунок 1.1) [40, 79]:

- автоматизированная обработка информации и оперативное отображение обобщенных результатов ее оценивания в сформированном пользователем виде;
- автоматизированная идентификация состояния объекта и формирование рекомендаций в условиях жестких временных ограничений;
- максимальное взаимодействие и учет накопленных знаний по объекту;
- интеграция существующих специализированных программных комплексов в единую систему мониторинга.

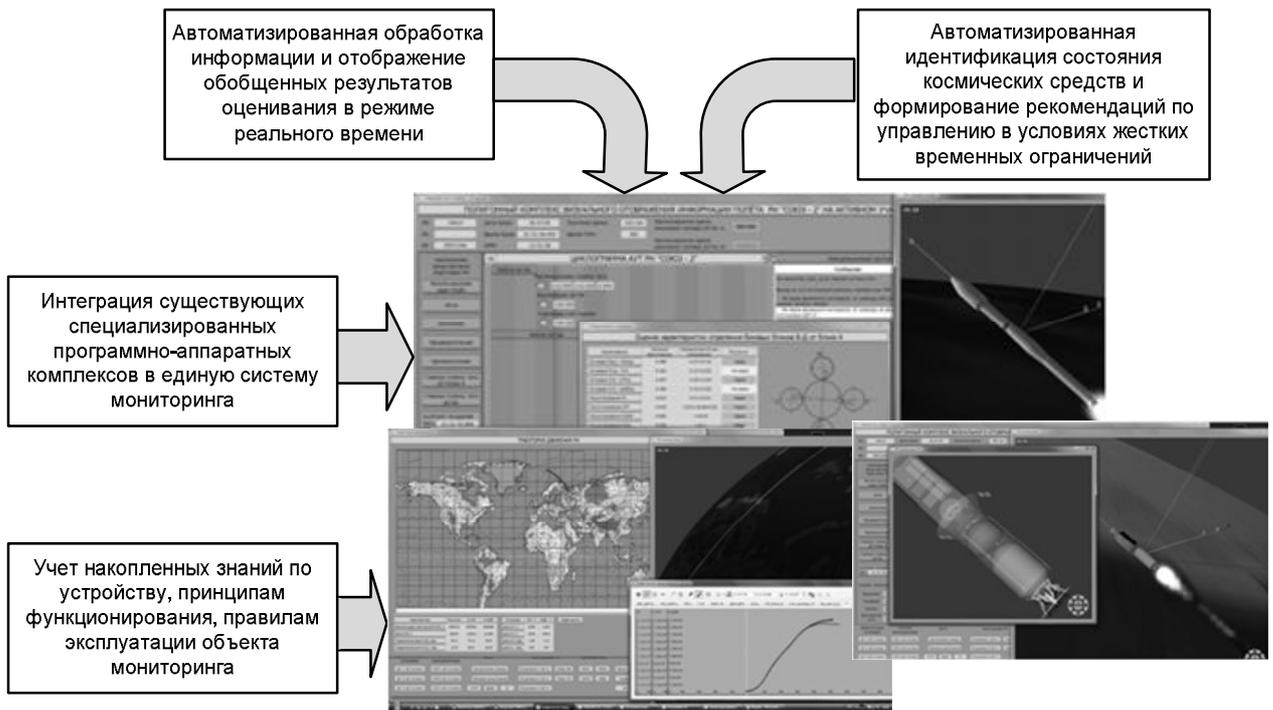


Рисунок 1.1 Достоинства комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств

Разрабатываемые автоматизированные комплексы предъявляют высокие требования к качеству и достоверности исходной телеметрической информации, что связано с дефицитом времени, отводимым на решение задач, и многопоточностью схем автоматизированного анализа [35, 76].

В тоже время, практика обработки телеметрической информации космических средств показывает, что она обладает существенной неопределенностью, вызванной ее неоднородностью, избыточностью и разнообразием смыслового содержания. Использование такой телеметрической информации в качестве исходной для проведения автоматизированного анализа в реальном масштабе времени приводит к недостоверности заключений о контролируемых событиях, что вынуждает проводить повторное оценивание технического состояния бортовых систем и ракеты-носителя в целом, снижая оперативность получаемых результатов. Проблема обеспечения требуемой оперативности особенно обостряется при возникновении нештатных ситуаций, приводящих к отклонениям от планового функционирования, вызванных различными как внешними, так и внутренними факторами. Поэтому исходную телеметрическую информацию для проведения автоматизированного анализа в реальном масштабе времени предварительно необходимо подготовить.

В рамках выполнения составной части ОКР «Проведение работ по созданию полигонного комплекса визуального отображения информации...» ЗАО «СКБ Орион» был разработан и апробирован комплекс автоматизированного анализа технического состояния ракеты-носителя «Союз-2» на активном участке полета.

Семейство ракет-носителей «Союз-2» создано на базе ракеты-носителя «Союз-У» в «ЦСКБ Прогресс», является наиболее современным и перспективным представителем космических средств (Таблица 1.1) и предназначено для выведения космических аппаратов на низкие, средние, высокие, солнечно-синхронные, геопереходные и геостационарные орбиты с существующих стартовых комплексов. Масса полезной нагрузки, выводимой на низкую орбиту — от 2 800 кг до 8 250 кг в зависимости от модификации.

Таблица 1.1. Модификации семейства ракета-носителей «Союз-2»

Дата первого запуска	Модификация	Примечания
2004.11.08	«Союз-2.1а»	замена двух аналоговых систем управления на единую цифровую
2006.12.27	«Союз-2.1б»	в качестве двигателя блока И используется РД-0124 с повышенной удельной тягой
2008.07.26	«Союз-2.1в»	в качестве двигателя блока А используется НК-33 с повышенной удельной тягой
Март 2011 (в разработке)	«Союз-СТА»	доработка систем управления и телеметрии
В разработке	Союз-СТБ	

В рамках проведенных летных испытаний семейства ракет-носителей «Союз-2», начавшихся в октябре 2004 года, было осуществлено одиннадцать успешных запусков (Таблица 1.2). В октябре 2011 года был осуществлен запуск модификации «Союз-СТА», предназначенной для обеспечения коммерческих запусков с космодрома Куру во Французской Гвиане.

Таблица 1.2 История запусков ракеты-носителя «Союз-2»

Дата	Космический аппарат	Место запуска
2004.11.08	Облик (макет ПН)	Плесецк 43/4
2006.10.19	Фрегат MetOp-A	Байконур 31
2006.12.24	Фрегат Меридиан	Плесецк 43/4
2006.12.27	Фрегат Corot	Байконур 31
2008.07.26	Персона	Плесецк 43/4
2009.05.22	Фрегат Меридиан-2	Плесецк 43/4
2009.09.17	Фрегат Метеор-М и др.	Байконур 31
2010.10.19	Фрегат GlobalStar	Байконур 31
2010.11.02	Фрегат Меридиан-3	Плесецк 43/4
2011.02.26	Фрегат Глонасс-К	Плесецк 43/4
2011.05.04	Фрегат Меридиан-4	Плесецк 43/4
2011.07.13	Фрегат GlobalStar	Байконур 31
2011.10.03	Фрегат Глонасс-М	Плесецк 43/4
2011.10.21	Фрегат МТ Galileo-IOV	ГКЦ (Куру)
2011.11.28	Фрегат МТ Р1	Плесецк 43/4
2011.12.17	Фрегат МТ Pleiades	ГКЦ (Куру)
2011.12.23	Фрегат Меридиан-5	Плесецк 43/4
2011.07.13	Фрегат GlobalStar	Байконур 31

Ракета-носитель «Союз-2» состоит из трех ступеней (Рисунок 1.2). Первая и вторая ступени соединены по схеме «пакет», в качестве первой ступени используются четыре боковых блока «Б», «В», «Г», «Д», а второй является центральный блок «А». Третья ступень (блок «И») соединена со второй ступенью по схеме «тандем». На третью ступень через переходный отсек под головным обтекателем устанавливается космический аппарат. В зависимости от типа аппарата обтекатель может иметь различные размеры и форму.

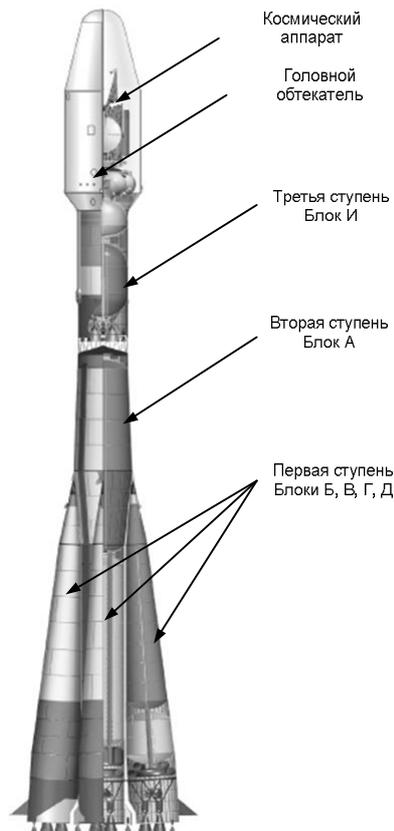


Рисунок 1.2 Упрощенная структурная схема ракеты-носителя «Союз-2»

Анализ основных этапов активного участка полета ракеты-носителя «Союз-2» был проведен для различных групп функциональных и функционально-диапазонных параметров, двигательных установок первой – третьей ступеней и системы стабилизации углового движения. Их поведение уникально для каждого запуска, но, в тоже время, можно выделить общие характерные особенности и закономерности, связанные с работой двигательных установок и разделением ступеней ракеты-носителя (см. Приложение 1).

Значения телеметрируемых параметров ракеты-носителя начинают поступать примерно за 200 сек. до команды «Контакт-подъем» (Рисунок 1.3). Специалисты по управлению отслеживают все эти процессы, следят за изменениями параметров и, согласно полученным данным, принимают решения о техническом состоянии ракеты-носителя [66, 67].

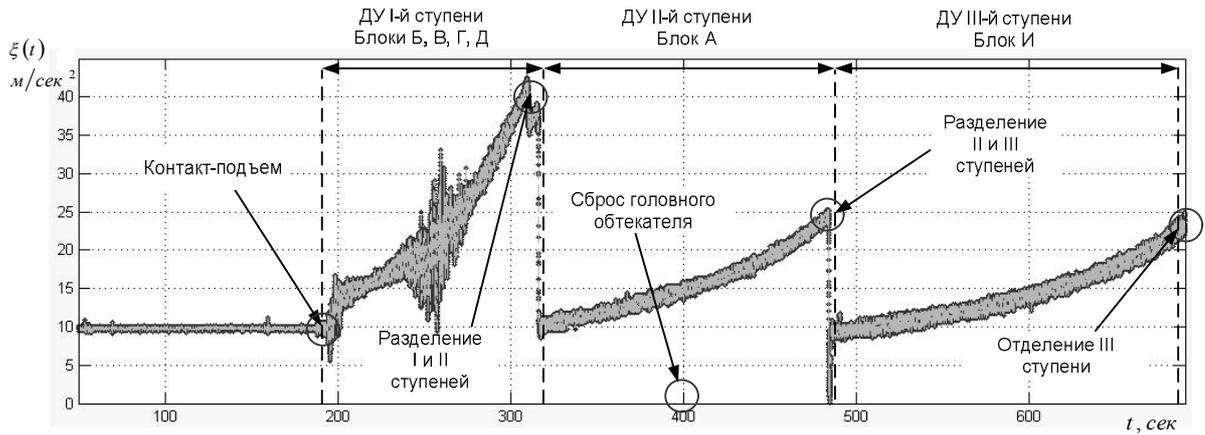


Рисунок 1.3 Графическое представление телеметрируемого параметра Осовой Перегрузки системы управления, полученного в ходе запуска ракеты-носителя «Союз-2» с космическим аппаратом «Corot» 27 декабря 2006 года

Четыре боковых блока, образующие первую ступень, по конструкции одинаковы. Длина каждого блока - 19,6 м, наибольший диаметр - 2,68 м. Сухая масса блока 3915 кг, а стартовая - 44,2 т. (Рисунок 1.2). Боковые блоки крепятся к центральному автономно с помощью верхних и нижних узлов связи. Верхние узлы связи предназначены для передачи осевых усилий (тяги двигателей), а нижние - для восприятия поперечных нагрузок.

Примерно на 118 сек. полета (Рисунок 1.3) подается команда «Разделение-1». По этой команде рулевые камеры двигателей боковых блоков «Б» - «Д» выводятся в нейтральное положение и фиксируются. Затем производится разрыв нижних силовых связей, и под действием создаваемого тягой двигателя момента каждый боковой блок поворачивается вокруг своей вершины. Через 0,2 сек. происходит отделение боковых блоков от центрального «А» (Рисунок 1.4).

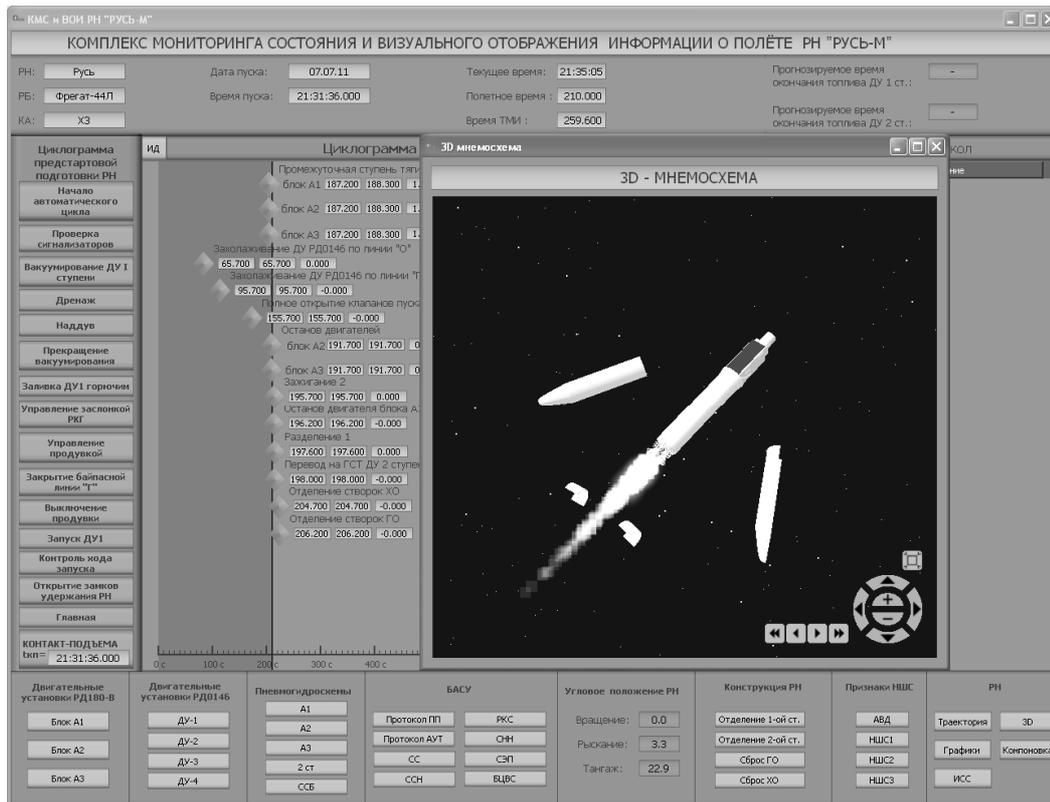


Рисунок 1.4 Отображение процесса отделения боковых блоков «Б» - «Д» от центрального блока «А» ракеты-носителя «Союз-2» в процессе мониторинга технического состояния в реальном масштабе времени

Для защиты космического аппарата на атмосферном участке полета ракеты-носителя используется головной обтекатель, изготавливаемый из композиционных материалов. Его сброс происходит после прохождения плотных слоев атмосферы на 150...170 сек. на участке полета второй ступени (Рисунок 1.3). При этом обтекатель делится путем раскрытия замков продольного и поперечного стыка на две полустворки, которые отбрасываются от ракеты-носителя пружинными толкателями (Рисунок 1.5).

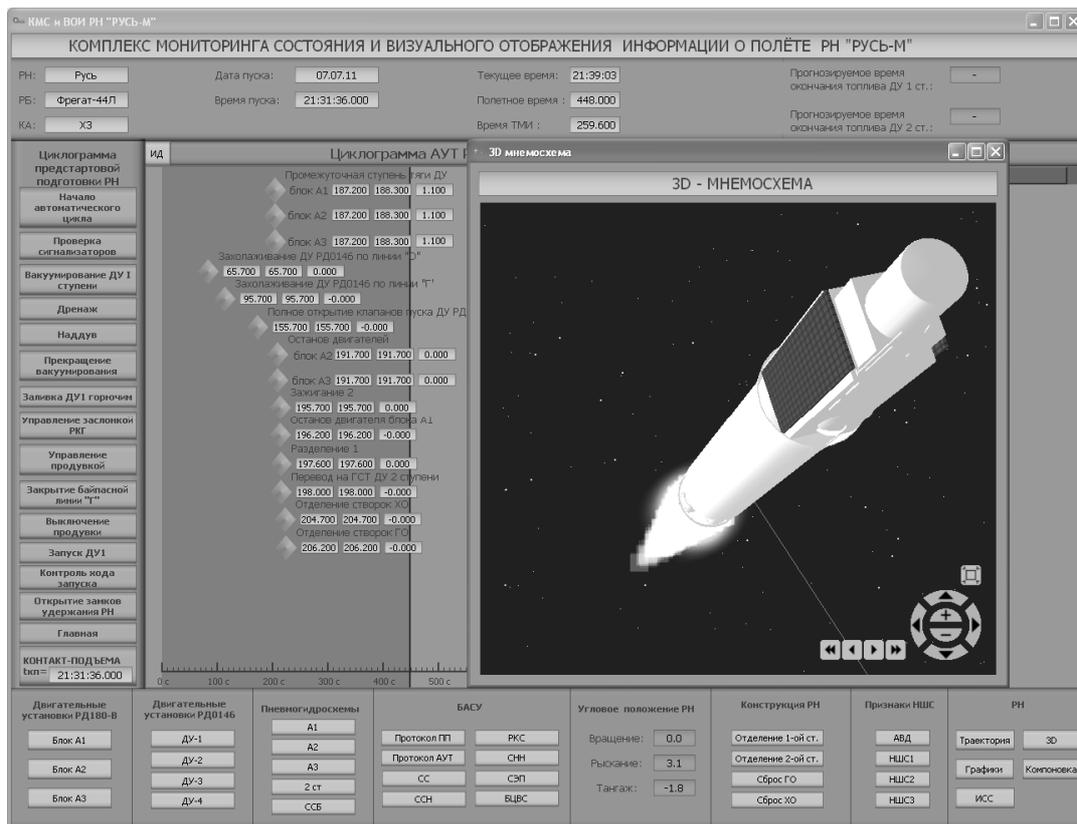


Рисунок 1.5 Отображение полета ракеты-носителя на участке работы двигательной установки второй ступени

Вторая ступень ракеты-носителя (центральный блок «А») имеет длину 31,8 м и наибольший диаметр 3,3 м и состоит из фермы, отражателя, приборного отсека, бака окислителя, бака горючего, силового кольца, торвых баков перекиси водорода и жидкого азота; в хвостовом отсеке размещен маршевый двигатель РД-118 (Рисунок 1.5).

В качестве третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2» служит блок «И». Существуют различные модификации этого блока, различающиеся конструкцией переходных отсеков и элементами пневмогидравлической системы. Третья ступень функционирует примерно с 520 по 540 сек. (Рисунок 1.6). Третья ступень (блок «И») (Рисунок 1.6) состоит из переходного отсека, бака горючего, бака окислителя и хвостового отсека. Ферма связывает центральный блок «А» с третьей ступенью ракеты - блоком «И» и обеспечивает свободный выход газов при запуске двигателя. В хвостовой части блока установлен ЖРД РД-0110, созданный в Конструкторском бюро химической автоматики под руководством С. А. Косберга.

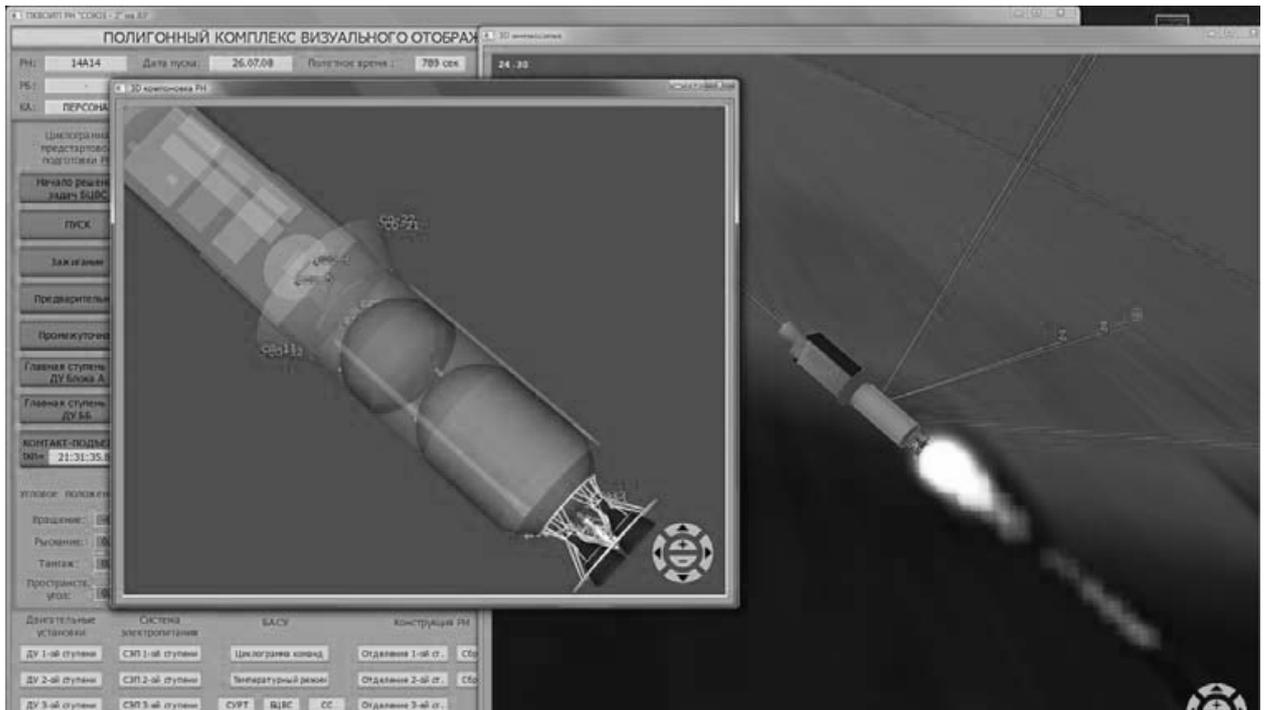


Рисунок 1.6 Визуализация состояния датчиков систем и агрегатов блока «И» ракеты носителя «Союз-2» в процессе мониторинга технического состояния в реальном масштабе времени

Отделение космического аппарата происходит при достижении блоком «И» ракеты-носителя заданной скорости. Система отделения использует пирозамки и пружинные толкатели. После отделения третья ступень тормозится и уводится с траектории за счет сброса газа наддува из бака горючего через специальное сопло.

Проведенный анализ основных этапов активного участка полета ракеты-носителя «Союз-2» позволяет говорить, что ракета-носитель представляет собой сложный динамический объект с изменяющейся структурой, состоящий из более 15 бортовых систем (двигательные установки, система стабилизации, система управления расходом топлива и др.), связанных между собой системой функциональных связей и информационного обмена, объем данных о функционировании которых составляет 30-40 миллионов значений, поступающих за 9-10 минут (Таблица 1.3).

Таблица 1.3 Объем поступающей телеметрической информации ракеты-носителя «Союз-2»

Космический аппарат	Количество телеметрируемых параметров	Количество значений (млн)
«Corot»	2170	40.24
«Персона» (непосредственная передача)	2170	35.09
«Персона» (задержанная передача)	2170	36.35

1.1.2 Существующие средства разработки комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации

Особенностью современных программных комплексов проектирования и эксплуатации автоматизированных процессов сбора, обработки и анализа информации является то, что они, как правило, ориентированы на создание узкоспециализированных программных средств, жестко связанных с конкретными предметными областями, со сформировавшимися взглядами на технологию разработки и эксплуатации автоматизированных систем анализа. Указанная тенденция проявляется в том, что в настоящее время существует огромное количество родственных по своим возможностям программных комплексов, сходных по своим функциональным возможностям, отличающихся друг от друга только по способу организации вычислительного процесса и виду операционной системы [82].

Вместе с тем наработанный к настоящему времени богатый аппарат информатики позволяет решать практически неограниченный по возможностям перечень задач анализа и обработки поступающей телеметрической информации. При этом для решения задач разработки автоматизированных систем, вплоть до последнего времени, на практике получил подход непосредственной разработки уникальных средств, ориентированных на однократное использование в конкретной предметной области. Однако сопровождение и доработка данного программного обеспечения в соответствии с указанной технологией является трудоемкой и сложной задачей. Необходимо также отметить, что в настоящее время доля затрат на разработку программного обеспечения при создании комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации неуклонно возрастает и достигает 90% всей стоимости программно-аппаратного комплекса. Поэтому технология непосредственного программирования должна применяться только для относительно простых задач. В противном случае при реализации больших программно-аппаратных комплексов возникнут сложные ресурсные и временные проблемы [57, 81, 83].

Современный рынок в области разработки программного обеспечения имеет тенденцию к все большей сегментации и специализации как общего, так и специализированного программ-

ного обеспечения, что приводит к все более различающимся тезаурусам разработчиков программных средств и конечных пользователей, специалистов в конкретной предметной области применения автоматизированных комплексов анализа телеметрической информации. Поэтому весьма актуальными становятся технологии создания специализированного программного обеспечения, позволяющие в процессе проектирования программ использовать знания и опыт конечных пользователей. Эта тенденция приводит к необходимости все более широкого применения технологий проектирования программных средств с использованием CASE-технологий [77].

Для решения задач, связанных с разработкой автоматизированных комплексов анализа телеметрической информации, на рынке имеется большое количество универсальных SCADA-систем с соответствующими визуальными средствами разработки и сопровождения, ориентированных на решение задач автоматизации анализа в самых различных предметных областях. Они обеспечивают решение следующих задач [56, 57, 58, 66, 80, 91]:

- разработки пользователями не знакомыми с каким-либо языком программирования (непрограммистами) алгоритмов анализа телеметрической информации;
- прием телеметрической информации от датчиков и контроллеров нижних уровней;
- хранение принятой и обработанной телеметрической информации в архивах, реализуемое посредством интерфейсов к имеющимся базам данных;
- графическое представление принятой и обработанной телеметрической информации в удобном для восприятия виде;
- прием команд оператора и передача их исполнительным механизмам;
- оповещение о наступлении аварийных ситуаций и регистрация действий по их устранению;
- формирование сводок и других отчетных документов на основе архивной информации;
- обмен информацией с автоматизированными системами управления верхнего уровня иерархии;
- решение общих функциональных задач по сбору, обработке телеметрической информации и представлению результатов измерений и их обработки.

Однако, при всех своих достоинствах, существующие SCADA-системы зачастую мало пригодны (если даже совсем не пригодны) для решения задач автоматизированной обработки телеметрической информации в реальном масштабе времени. Это объясняется влиянием следующих факторов:

- отсутствием средств по борьбе с неоднородностями и избыточностью телеметрической информации;

- реализацией на ограниченном наборе программно-аппаратных платформ (операционных систем) и средствах коллективного (сетевого) взаимодействия;

- избыточной универсальностью, обусловленной ориентацией на решение широкого спектра задач, не позволяющей учесть специфику конкретной предметной области.

Поэтому, с целью устранения указанных недостатков, возникает необходимость в разработке специального программного обеспечения предназначенного для решения задач первичной обработки телеметрической информации в реальном масштабе времени, с учетом специфики ее формирования и сбора.

1.2 Анализ условий приема и передачи телеметрической информации ракеты-носителя типа «Союз»

1.2.1 Классификация помех и погрешностей, встречающихся при обработке телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз»

На всем тракте формирования и передачи - от измерительного преобразователя, находящегося на борту ракеты-носителя, до входа в систему анализа – на телеметрическую информацию воздействуют различного рода помехи (Рисунок 1.7).

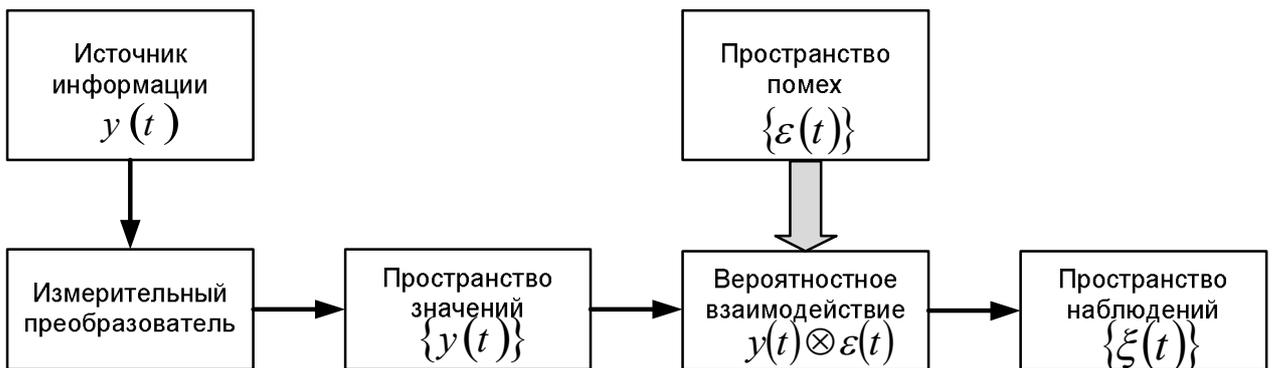


Рисунок 1.7 Обобщенная формализованная модель получения и передачи телеметрической информации

Влияние помехи на передаваемую телеметрическую информацию может быть представлено в виде «модели с вероятностным взаимодействием» некоторой информационной компоненты $\xi_u(t)$ и погрешности $\varepsilon(t)$:

$$\xi(t) = \xi_u(t) \otimes \varepsilon(t) \quad (1.1)$$

Результирующая помеха представляет собой смесь большого числа компонент: аномальных, флуктуационных, перекрестных (интерференционных) и синусоидальных [3, 65, 121].

Аномальные помехи представляют собой последовательность импульсов со случайными моментами появления, длительности и амплитуды.

Флуктуационные помехи представляют собой непрерывный во времени случайный процесс, представляющий собой результат наложения большого числа хаотичных импульсов, случайный характер которых, как правило, близок к гауссову распределению.

Перекрестные помехи являются результатом наложения переходных напряжений из-за несовершенства аппаратуры. При многократном наложении интерференционные помехи приобретают характер флуктуационных.

Синусоидальные помехи являются, как правило, результатом различного рода паразитных наводок от напряжения основной частоты, либо от напряжений с более высокой гармонической составляющей. При низкой частоте характер воздействия синусоидальных помех может быть близок к воздействию аномальных помех.

Проведенный анализ природы возникновения помех позволяет рассматривать результирующую помеху телеметрической информации ракет-носителей семейства «Союз» в виде смеси аномальной и флуктуационной компонент (Рисунок 1.8) [121].

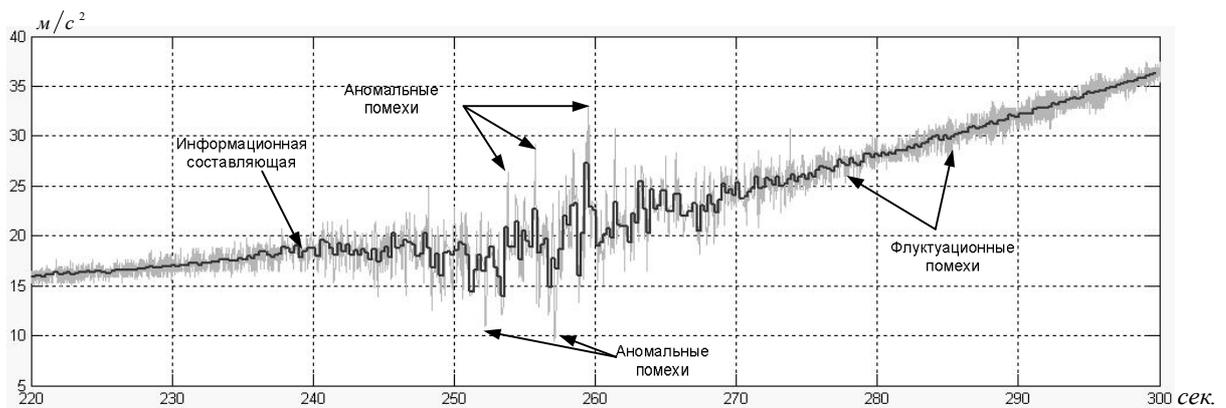


Рисунок 1.8 Графическое представление различных видов помех, воздействующих на телеметрическую информацию ракет-носителей типа «Союз».

В результате воздействия помех на вход системы обработки телеметрической информации поступает смесь информационной компоненты и помехи, поэтому результаты измерения той или иной физической величины дают лишь приближенное значение. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называют погрешностью измерения. В свою очередь истинным значением физической величины называют значение, которое идеальным образом отражает в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта [93, 124].

При разработке и синтезе систем анализа телеметрической информации погрешности измерений принято классифицировать по признакам, отвлекаясь от их физической природы и характерным самым различным погрешностям (Рисунок 1.9) [24, 26, 65, 93, 108, 124].

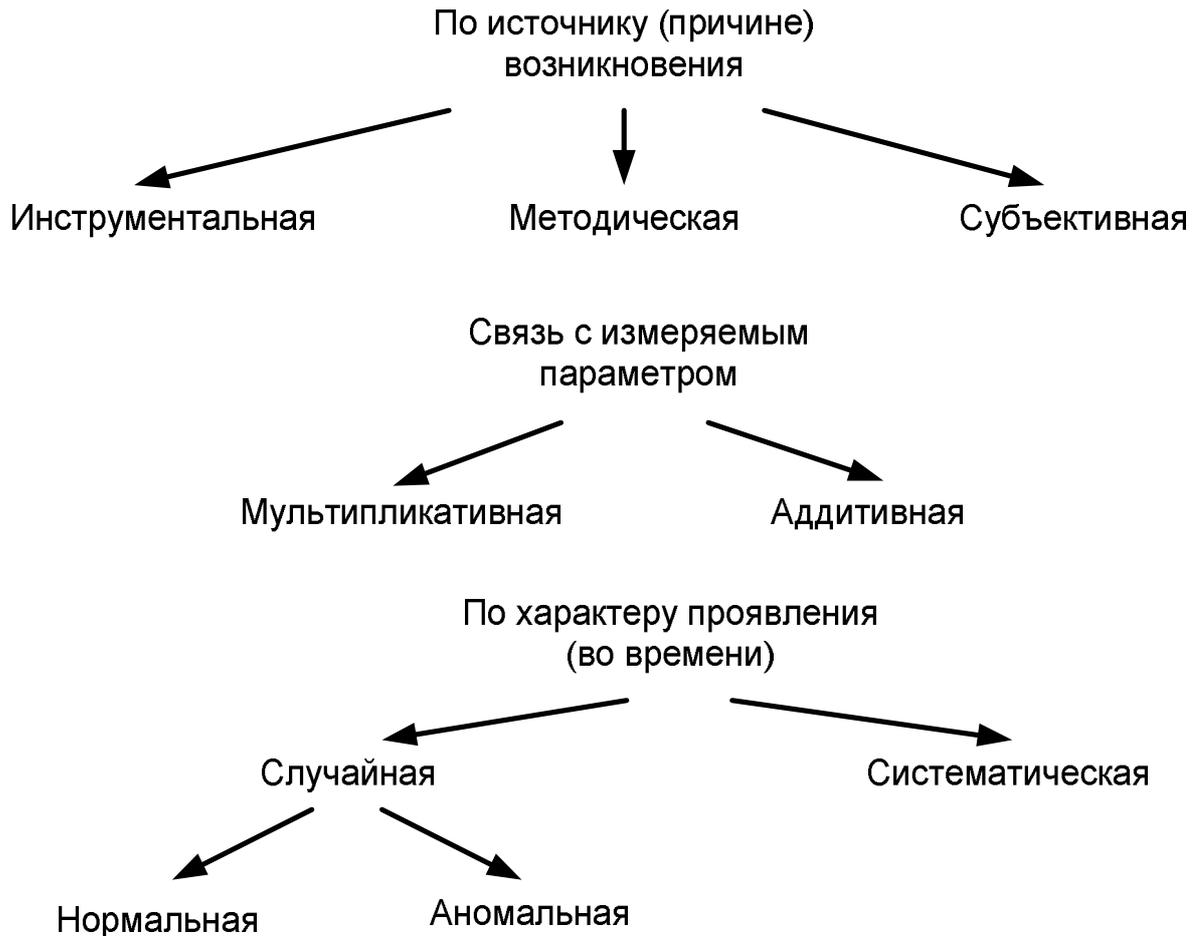


Рисунок 1.9 Классификация погрешностей телеметрической информации

В зависимости от источника возникновения погрешности могут быть классифицированы по следующим признакам:

- инструментальные, обусловленные погрешностями применяемых средств измерений;
- методические, обусловленные несовершенством метода измерений;
- субъективные, обусловленные индивидуальными особенностями человека-оператора (при автоматизированном анализе влияние данного вида погрешности может быть в значительной степени уменьшено, хотя полностью исключено быть не может).

В зависимости от характера взаимодействия информационной составляющей и помехи, различают помехи аддитивные и мультипликативные.

Влияние мультипликативной составляющей погрешности телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз» устраняется с помощью калибровочных уровней, передаваемых в кадре УС0 (см. Рисунок 1.10). Поэтому телеметрическую информацию на входе систем обработки можно рассматривать в виде аддитивной смеси информационной компоненты и помехи [36, 39 65, 93].

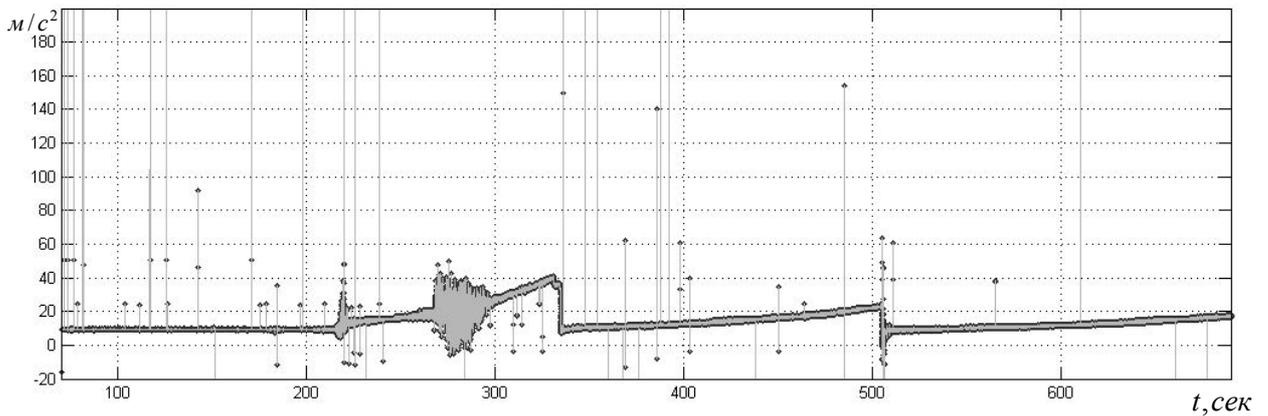


Рисунок 1.10 Графическое представление телеметрической информации, полученной с датчика АЛЕ048 блока «И» ракеты-носителя «Союз-2» с космическим аппаратом «Corgot»

По характеру проявления погрешности телеметрической информации принято разделять на систематические и случайные (Рисунок 1.9).

Систематической погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Причиной появления систематических погрешностей могут быть как неисправности измерительной аппаратуры, так и несовершенство метода измерений, неправильная установка измерительных приборов и отступление от нормальных условий их работы, особенности самого оператора. Все систематические погрешности, в принципе, могут быть выявлены и устранены.

Случайной погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности возникают из-за одновременного действия многих независимых причин, каждая из которых в отдельности незначительно влияет на конечный результат измерения. По структуре случайные погрешности можно разделить на аномальные и флуктуационные (Рисунок 1.11).

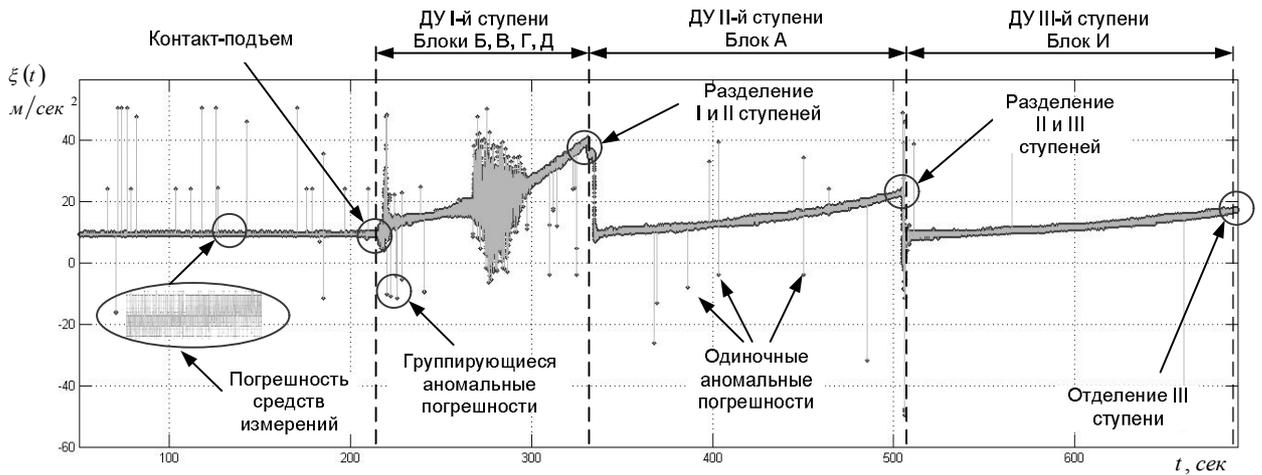


Рисунок 1.11 Виды погрешностей телеметрической информации, встречающихся при обработке телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз»

За аномальную погрешность принимают такое значение измеряемой величины, которое превышает некоторое заданное пороговое значение. Поэтому вероятность появления аномальных значений связана не только с характером помех, но и величиной порога ее обнаружения. Результаты измерений, содержащие аномальные погрешности, должны быть исключены из обработки и анализа, так как они полностью искажают результаты измерений [68, 93, 121].

Необходимо отметить, что система сбора телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз» имеет достаточно высокую частоту опроса телеметрируемых параметров, поэтому встречаются не только одиночные результаты измерений, содержащие аномальную погрешность, но несколько следующих подряд. Причем наибольшее число аномалий характерно для смены режимов работы двигательных установок и разделения ступеней ракеты-носителя (Рисунок 1.11).

Измерения, содержащие флуктуационные и аномальные погрешности, являются результатами двух существенно различающихся по своим характеристикам процессов. Наиболее наглядно их различие может быть представлено на диаграммах рассеивания (Рисунок 1.12).

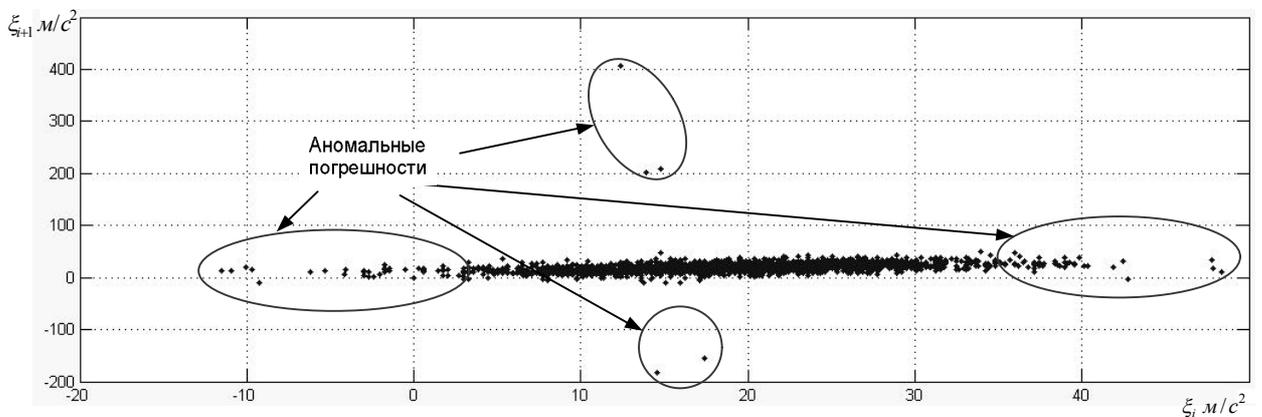


Рисунок 1.12 Диаграмма рассеивания телеметрической информации, полученной с датчика АЛЕ048 блока «И» ракеты-носителя «Союз-2» с космическим аппаратом «Сорот»

Наличие в поступающих измерениях случайных погрешностей приводит к необходимости рассматривать телеметрируемые параметры в качестве реализации случайного процесса, а для оценивания их характеристик необходимо использовать известный математический аппарат теории вероятностей.

1.2.2 Классификация телеметрируемых параметров ракет-носителей типа «Союз»

В ходе запуска ракеты-носителя контролируются группы различных по физической сущности и динамике процессов, протекающие как на нем самом так и вне его (Таблица 1.4) [35, 76].

Таблица 1.4 Перечень телеметрируемых параметров двигательной установки 1-й и 2-й ступеней ракеты-носителя «Союз-2»

Параметры	Система	Частота опроса	Количество параметров	Диапазон измерения
Токи управления рулевых машин	стабилизации	50, 100	20	от -60 до 60 мА
Углы поворота рулевых агрегатов		50, 100	12	от -35 до 35 град, от -30 до 30 град
Угловые скорости		100,200	12	от -15 до 15 град/с
Давление в баках окислителя и горючего	двигательные установки первой и второй ступеней ракеты-носителя	50, 100	10	от 0 до 6 кгс/см
Давление окислителя перед форсунками камер сгорания блоков		100,200	5	от 0 до 80 кгс/см
Давление в воздушных баллонах блоков		50, 100	5	от 0 до 300 кгс/см

Все параметры системы обработки и анализа телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз» могут быть классифицированы по характеру изменения во времени и виду их тарировочной характеристики [65].

По характеру изменения во времени телеметрируемые параметры подразделяются на [93]:

- функциональные, поведение которых во времени представляется непрерывной функцией времени с бесконечным числом возможных значений (Рисунок 1.13);

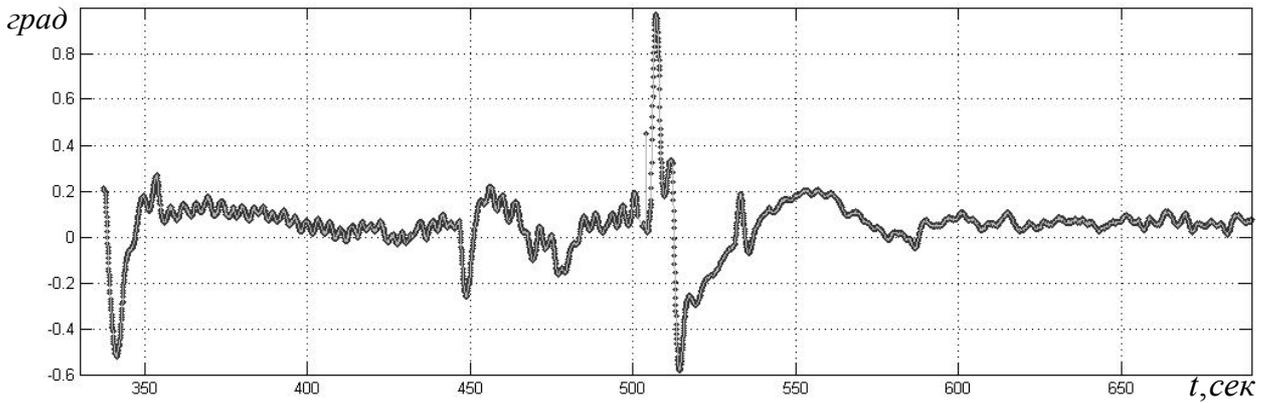


Рисунок 1.13 Графическое представление функционального параметра, поступающего с датчика КЕАФ.45-020А блока «И» ракеты-носителя «Союз-2»

- функционально-диапазонные параметры (Рисунок 1.14) могут быть как непрерывными, так и разрывными функциями, но, в любом случае, из множества его состояний характерным являются лишь конечное число;

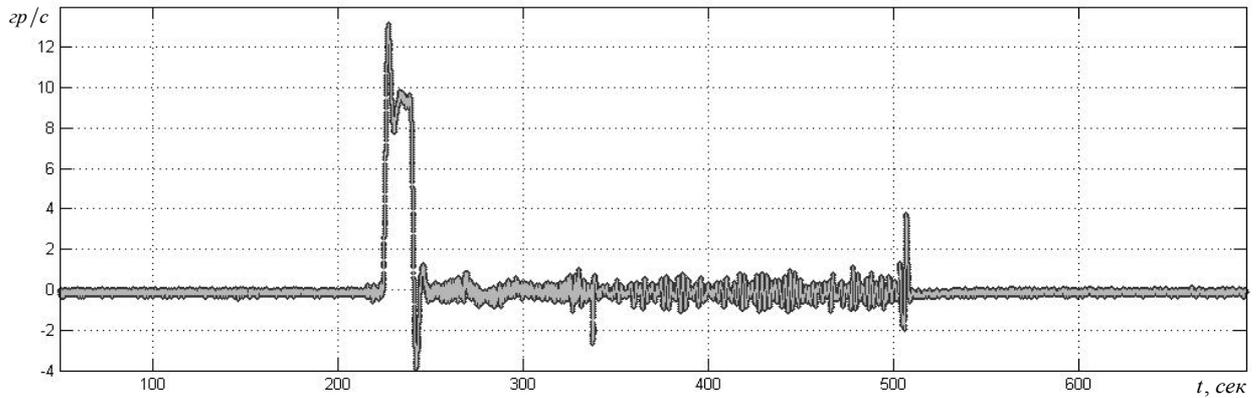


Рисунок 1.14 Графическое представление функционально-диапазонного параметра, поступающего с датчика КЕАФ.34-008А блока «И» ракеты-носителя «Союз-2»

- сигнальными параметрами (Рисунок 1.15) называют разрывные функции времени с двумя возможными состояниями, отражающими положение контактных преобразователей, например «включено»-«выключено».

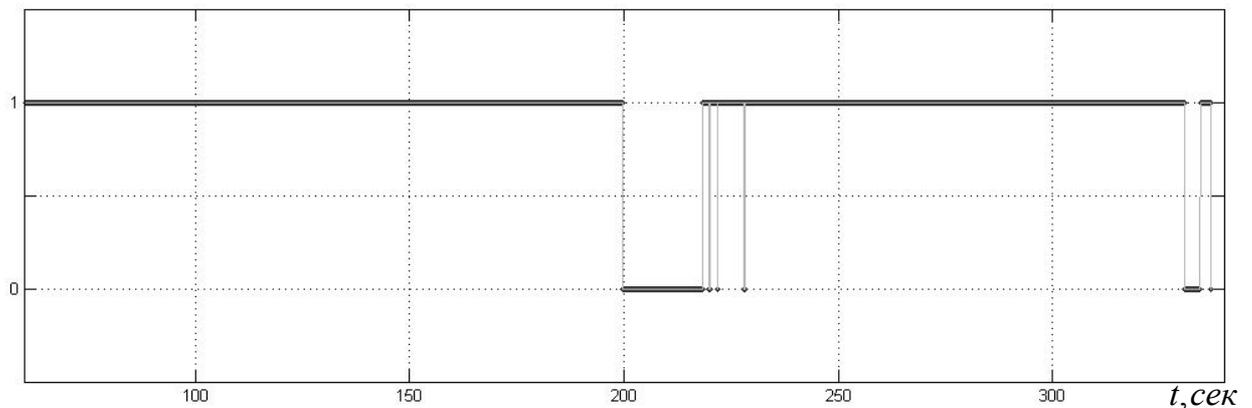


Рисунок 1.15 Графическое представление сигнального параметра Включения-выключения блока «В» ракеты-носителя «Союз-2»

В зависимости от скорости изменения телеметрируемые параметры можно разделить на медленно меняющиеся, к которым относятся параметры с верхней границей частотного спектра 20-50 Гц, и быстро меняющиеся (все остальные параметры, имеющие более высокую границу спектра) [65, 93].

Для проведения классификации телеметрируемых параметров ракет-носителей типа «Союз» по скорости их изменения была использована их частота опроса F_0 [51, 111].

В Программе телеизмерений [87] показано, что 217 параметров ракет-носителей типа «Союз» имеют частоты опроса 50 Гц, 286 – 100 Гц, 45 – 200 Гц, остальные имеют частоты дискретизации менее 15 Гц. Поэтому, 605 параметров ракеты-носителя можно отнести к медленно меняющимся, а оставшиеся 45 к быстро меняющимся.

К медленно меняющимся параметрам относятся:

- параметры температуры: температура газовой среды в верхней части бака, температура газовой среды у рамы двигателя;
- параметры давления: давление в баке окислителя, давление в баках горючего;
- параметры угловых перемещений: датчики угловых скоростей;
- электрические характеристики: токи управления рулевыми машинами.

К быстро меняющимся параметрам относятся вибрации элементов конструкции: осевая перегрузка (Рисунок 1.13).

Проведенный анализ поступающей телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз» показал, что она обладает большим разнообразием смыслового содержания и видами ее представления. В связи с этим синтез математической модели как отдельных параметров, так и их совместного поведения представляет чрезвычайно сложную задачу, требующую подробных сведений о конструкции и условиях эксплуатации ракеты-носителя.

1.3 Анализ основных этапов и видов обработки телеметрической информации ракеты-носителя типа «Союз»

Результаты обработки телеметрической информации ракеты-носителя типа «Союз» поступают кадрами в унифицированном формате УС0, формирующимися по мере поступления результатов измерений и передачи их в телеметрический тракт. Каждый кадр УС0 снабжен временной меткой с относительным значением времени его формирования и является множеством значений признаков, характеризующих техническое состояние ракеты-носителя семейства «Союз».

Прием и регистрацию телеметрической информации обеспечивает наземная передающая радиостанция типа МА-9МКТМ. Передача телеметрической информации осуществляется по двум радиоканалам со скоростью 512000 бит в секунду. Информация передается блоками по

512 десятиразрядных слов. Передача телеметрической информации по второму каналу осуществляется с задержкой на 3.1 сек.

Моноблок аппаратуры сбора является основной локальной единицей системы РТСЦ и предназначен для сбора информации с датчиков различных типов: аналоговых, вольтовой шкалы, дискретных и температурных (термосопротивлений и термопар) и передачи ее в основной коммутатор-формирователь. Максимальное количество датчиков разных типов, подключаемых к моноблоку сбора, при условии, что два входа локального коммутатора используются для передачи калибровочных уровней 0% и 100%, следующее (Таблица 1.5):

Таблица 1.5 Количество и состав телеметрируемых параметров локального коммутатора

Тип ЛКА	Дискретные датчики	Температурные датчики	Аналоговые датчики вольтовой шкалы
ТА271	64	31	62
ТА271А	128	0	62
ТА271В	64	31	62

Структура локальных коммутаторов предусматривает одинаковую частоту опроса по всем каналам, поэтому при штатной работе бортовой системы частота опроса оказывается чрезмерно высокой, а объём измерений избыточен.

Поступающие результаты измерений в формате УС0 имеют сложную структуру и не могут быть восприняты человеком-оператором непосредственно и использованы им для оценивания технического состояния ракеты-носителя. Поэтому поступившую телеметрическую информацию преобразуют к форме и виду, удобному для использования оператором по назначению. В процессе этих преобразований из исходной телеметрической информации происходит последовательное устранение структурной, статистической избыточности и выделение смыслового содержания в целях подготовки необходимых сведений для оценивания технического состояния [93].

Процесс анализа телеметрической информации космических средств подразумевает под собой реализацию соответствующих алгоритмов ее обработки при требуемых показателях точности, быстродействия и достоверности [121].

В наиболее общем виде основными целями анализа телеметрической информации являются [65, 93]:

- извлечение информации из поступающих данных;
- математическое преобразование, анализ и представление результатов за минимальное время, обеспечивающее своевременное использование их в процессе распознавания технического состояния ракеты-носителя;
- определение частных и обобщенных характеристик систем и подсистем ракеты-носителя;

- хранение и своевременная выдача в удобном потребителям виде.

Анализ поступающей телеметрической информации предполагает наличие трех связанных между собой этапов, отличающихся сложностью используемых алгоритмов, полнотой и формой отображаемых результатов (Рисунок 1.16): предварительная, первичная и вторичная обработки [78].

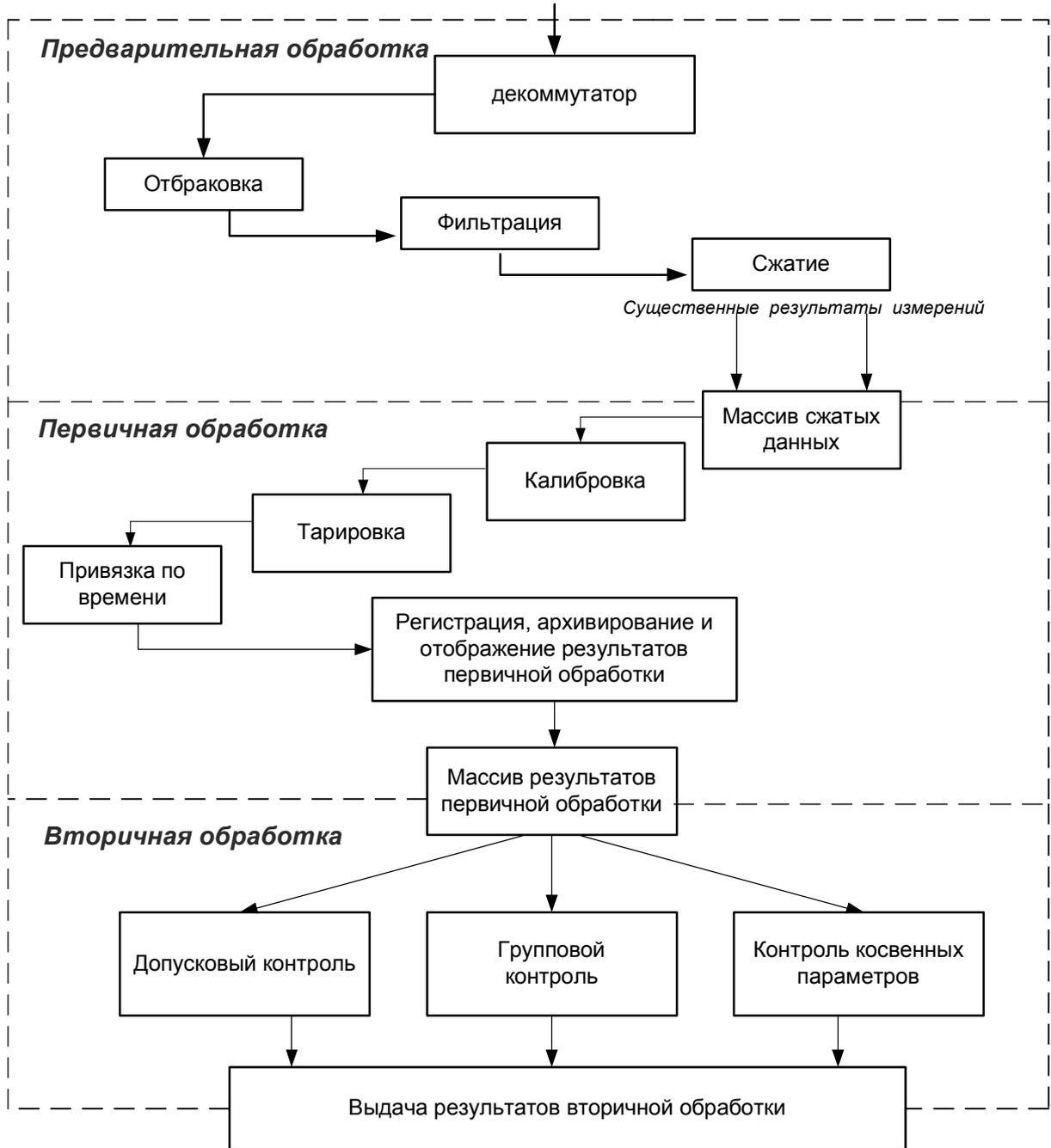


Рисунок 1.16 Схема существующего алгоритма обработки поступающей телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз»

Основной задачей предварительной обработки телеметрической информации (Рисунок 1.16) является формирование потока достоверных измерений, удовлетворяющих заданным требованиям по точности и оперативности результатов обработки. В состав математического про-

граммного обеспечения на этом этапе входят алгоритмы исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, фильтрации и сжатия исходной телеметрической информации [3, 108].

Первичной обработкой телеметрической информации (Рисунок 1.16) является процесс определения и уточнения ее оценок в физических единицах, предназначенный для получения достоверных оценок о техническом состоянии ракеты-носителя [66, 67].

На этапе вторичной обработки (Рисунок 1.16) решаются задачи определения параметров состояния и оценки работоспособности ракеты-носителя как в целом, так и его отдельных систем и агрегатов. Представление и анализ результатов обработки представляет собой процесс количественного и качественного анализа всех первично-обработанных телеметрируемых параметров, взаимосвязанных между собой и характеризующих функционирование ракеты-носителя.

Классификация распознаваемых состояний построена таким образом, что в любой произвольный момент времени ракета-носитель может находиться только в одном состоянии (в самом простом случае: «исправен», «неисправен») [65].

Из всего комплекса задач, решаемых при вторичной обработке, выделяют следующие: допусковый контроль, групповой контроль, контроль косвенных параметров; и различают два принципиально различных варианта - оперативный и полный.

Полную обработку телеметрической информации космических средств, в связи с большим объемом и сложностью алгоритмов анализа, проводят «постсеансно», при этом [23, 78, 93]:

- анализируют качество функционирования бортовых систем;
- оценивают их надежность и определяют статистические характеристики процессов, протекающих на борту, и сравнивают их с требуемыми;
- выявляют скрытые закономерности, делается вывод о технической доработке или изменении условий эксплуатации объекта.

С целью получения решения о техническом состоянии контролируемого объекта в реальном масштабе времени ограничивают объем и глубину вторичного анализа поступающих данных. Полученную таким образом информацию называют оперативной, а сам процесс оперативной обработкой или экспресс-анализом.

Оперативная обработка поступающей телеметрической информации решает следующие задачи [45, 46]:

- выбор параметров состояния и оценку работоспособности;
- выявление и локализацию неисправностей;
- краткосрочный прогноз состояния систем и агрегатов;
- генеза технического состояния (специфику эксплуатации объекта).

Для получения решений о техническом состоянии контролируемого объекта в реальном масштабе времени система анализа телеметрической информации должна [27, 82, 92, 125]:

- успевать реагировать на события и обрабатывать поступающую телеметрическую информацию за фиксированное время;

- обладать способностью к параллельной обработке нескольких событий.

Поэтому основным требованием, возникающим при проведении оперативной обработки, является требование сокращения времени обработки и анализа поступающей телеметрической информации. В состав математического обеспечения необходимо ввести упрощенные алгоритмы, не требующие больших затрат времени. Таким образом основную цель оперативной обработки телеметрической информации можно сформулировать следующим образом: получение максимально достоверных оценок технического состояния при минимальном объеме данных за минимальное время [66, 67, 93].

Проведенный анализ различных методов и алгоритмов обработки неоднородной информации (Таблица 1.6), с точки зрения оперативности и робастности получаемых ими результатов, показал невозможность их непосредственного применения в комплексах автоматизированного анализа телеметрической информации ракеты-носителя реального времени [5, 55, 70].

Таблица 1.6 Анализ методов и алгоритмов обработки информации

Методы и алгоритмы	Требования	Недостатки
Параметрическая статистика		
Алгоритмы исключения аномалий с использованием статистических критериев (Стьюдента, Румшинского, Граббса, Крамера-Уэлча)	Гауссова плотность распределения обрабатываемого процесса	Неустойчивость получаемых результатов при отклонении плотности распределения от гауссовой
Метод моментов		
Метод максимального правдоподобия		
Метод наименьших квадратов		
Метод Байеса		
Устойчивые методы оценивания параметра положения		
Методы усеченного среднего; оценка Винзора; средневзвешенная оценка Винзора	Априорные сведения об уровне загрязнения процесса; симметричность плотности распределения	Неадаптивность к изменению уровня загрязнения
Метод М-оценок (оценка Андриуса; оценка Рамсея)		
Непараметрические методы и алгоритмы		
Метод Лемана-Розенблатта	Непрерывная плотность распределения	Постоянная сортировка поступающих отсчетов, большой объем вычислений
Минимаксный метод Хьюберта	Априорные сведения об уровне загрязнения процесса	Большой объем вычислений, сложность оценивания уровня загрязнения

Алгоритмы исключения аномалий с помощью допусков, конечных разностей, эталонных параметров	Априорные знания о характере поведения процесса и его изменения во времени	Установка допусков возможно только при нормальной работе
Непараметрические методы оценивания плотности вероятности		
Метод гистограмм		Большой объем вычислений; смещенность оценки; трудность выбора числа интервалов группировки
Метод Розенблатта-Парзена	Априорные сведения о характере плотности распределения	Трудность оценивания параметра регуляризации
Проекционные методы		Трудность подбора реперной плотности вероятности
Методы выделения детерминированных и хаотических компонент		
Метод сглаживающих линейных и кубических сплайнов		Большой объем вычислений
Метод вейвлетов		Трудность подбора «несущей» функции; большой объем вычислений
Метод сингулярного анализа		Большой объем вычислений

В настоящее время этапы предварительной и первичной обработки телеметрической информации космических средств автоматизированы. Задачи вторичной обработки решаются, как правило, экспертами-операторами вручную. Им представляется смысловая информация о состоянии отдельных систем, подсистем, блоков и т.д., и на основании полученной информации выполняется интегральная оценка технического состояния.

1.4 Исследование особенностей телеметрической информации ракеты-носителя «Союз-2»

Анализ значений поступающей телеметрической информации, полученной в ходе испытаний ракеты-носителя «Союз-2» с 2004 по 2011 годы, показывают, что все контролируемые параметры обладают сложной, изменяющейся во времени структурой, явно связанной с режимами работы двигательных установок. Объем поступающих данных составляет 30 – 40 млн. значений. Все контролируемые системы ракеты-носителя взаимосвязаны между собой и представлены большой совокупностью разнородных параметров, которые не дают возможности заранее достоверно предугадать «состояние системы».

В процессе функционирования ракеты-носителя контролируются различные по физической сущности и динамике процессы (более 25 различных типов параметров). Поэтому разнообразие смыслового содержания является важной особенностью поступающей телеметрической информации.

Наиболее информативными аналоговыми телеметрируемыми параметрами являются функциональные и функционально-сигнальные параметры с частотами опроса F_0 от 50 до 200 Гц, составляющие более 70% от общего числа аналоговых параметров.

Проведенные исследования полученной в ходе испытаний телеметрической информации ракеты-носителя позволили систематизировать ее особенности и представить в виде множества эвристической информации Θ , которое характеризуется:

$\Theta_{сл ст}$ - сложной изменяющейся во времени структурой, явно связанной с режимами работы бортовых систем и агрегатов ракеты-носителя (Рисунок 1.8);

$\Theta_{аном}$ - наличием одиночных и группирующихся аномалий, существенно искажающих результаты измерений (Рисунок 1.8);

$\Theta_{пр}$ - пропуском данных, поскольку заведомо недостоверные результаты измерений исключаются на стадии первичной обработки;

$\Theta_{изб}$ - избыточностью (Рисунок 1.12), обусловленной фиксированной частотой опроса локального коммутатора различных по динамичности параметров, приводящей к увеличению числа результатов измерений в 10 – 30 раз и существенно затрудняющей обработку при использовании потоковых вычислительных моделей, ставя ограничения по оперативности [35];

$\Theta_{разн}$ - разнообразием смыслового содержания; в процессе функционирования ракеты-носителя контролируются различные по физической сущности и динамике процессы, происходящие как на самом объекте, так и вне его: телеметрируется более 25 различных типов параметров, 70% от общего числа которых составляют функциональные и функционально-диапазонные с частотами опроса 50, 100 и 200 Гц [39];

$\Theta_{сл инт}$ - сложностью интерпретации, связанной с большим числом возможных технических состояний ракеты-носителя, вызванных неисправностями или внешними возмущающими факторами, имеющими как субъективный, так и объективный характер, учет которых на практике предполагает проведение экспертного оценивания.

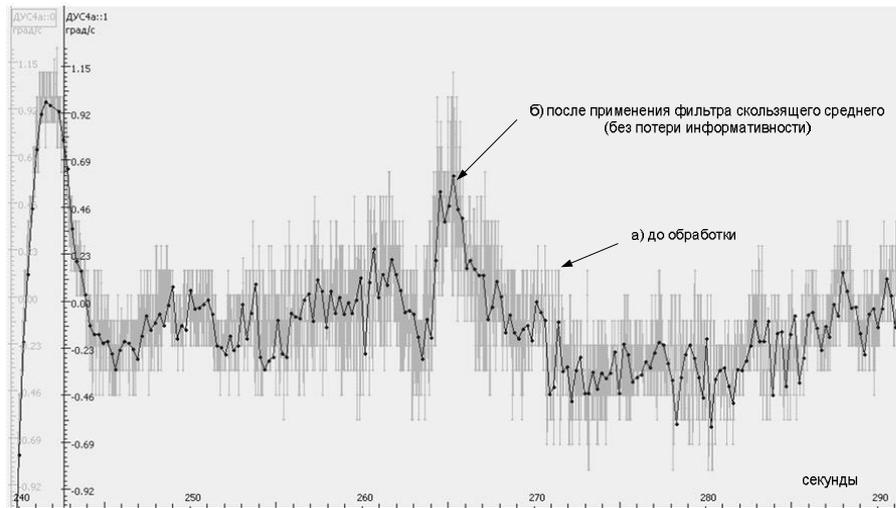


Рисунок 1.17 Телеметрическая информация, поступающая с датчика угловой скорости блока А:
 а) до обработки объем измерений составлял 104566 байт, б) после применения алгоритмов
 сглаживания - 2151 бит

$\Theta_{сл гр}$ - сложностью в определении границ области изменения параметров, определяемых возможностями физической реализуемости датчиковой системы и оцениваемых экспертными группами в области допусковых границ согласно Инструкции по эксплуатации и Программы телеметрических измерений.

Анализ условий формирования и передачи телеметрической информации ракеты-носителя позволил обосновать ее обобщенную модель. Физические процессы, протекающие на борту ракеты-носителя, по своей природе непрерывны и подвержены случайным возмущениям и воздействиям. Это позволяет выполнять их математическое описание в классе непрерывных случайных процессов [18, 99, 100]:

$$\{\xi(t)\} = \{\xi(t), \xi \in X, t \in T\},$$

где t - непрерывный параметр времени; T - непрерывное множество значений параметра t ; X - непрерывное пространство состояний переменной ξ .

С другой стороны, при передаче телеметрическая информация подвергается процедурам дискретизации по времени и квантованию по уровню, при этом оставаясь случайной. В этом случае математическое описание необходимо выполнять в классе случайных последовательностей:

$$\{\xi(t_i)\} = \{\xi(t_i), \xi \in X, t_i \in T\},$$

где t_i - дискретный параметр времени; T - дискретное множество значений параметра t_i , X - квантованное пространство состояний переменной ξ .

Таким образом, обобщенная модель формирования и передачи телеметрической информации ракеты-носителя «Союз-2» может быть представлена в виде (Рисунок 1.18):

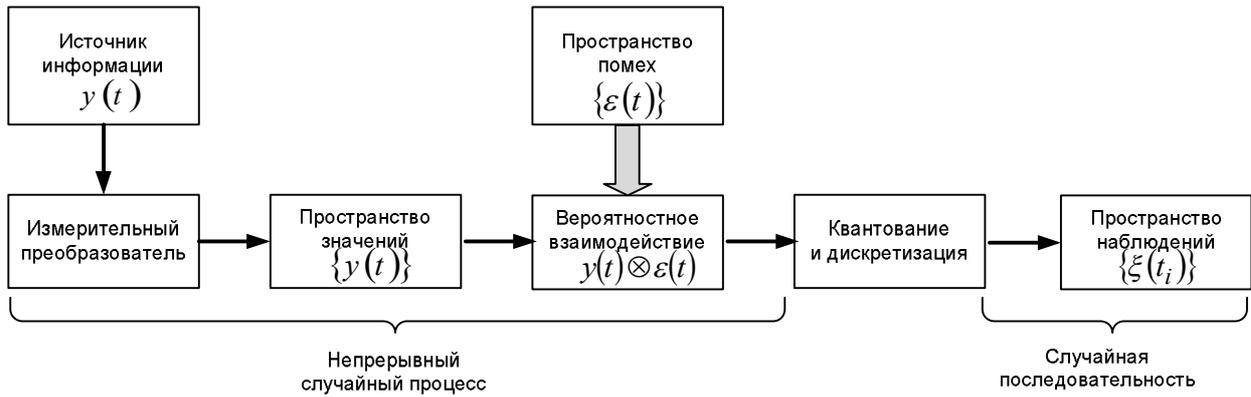


Рисунок 1.18 Обобщенная модель формирования и передачи телеметрической информации ракеты-носителя «Союз 2»

Использование такой телеметрической информации в качестве исходной для проведения автоматизированного анализа в реальном масштабе времени приводит к недостоверности заключений о контролируемых событиях, что вынуждает проводить повторное оценивание технического состояния бортовых систем и ракеты-носителя в целом, снижая оперативность получаемых результатов. Поэтому телеметрическую информацию предварительно необходимо оперативно обработать, уменьшив ее неоднородность и избыточность.

Систематизация особенностей поступающей телеметрической информации показывает сложность реализации комплексов автоматизированного анализа в реальном времени. В современных автоматизированных комплексах задача вторичной обработки решается нередко вручную, поскольку, как правило, нет автоматизированных средств по борьбе с неоднородностями и избыточностью исходной информации, снижающими достоверность и оперативность принимаемых решений. В связи с этим становится актуальной задача предварительной оперативной подготовки поступающей телеметрической информации с целью повышением ее качества и достоверности [35, 39, 79].

1.5 Формальная постановка задачи исследования

Систематизация результатов исследований системы информационно-телеметрического обеспечения процессов испытания и управления объектами ракетно-космической техники позволили сформировать для разрабатываемых алгоритмов множество показателей качества $W = \{W_{опер}, W_{дост}, W_{роб}\}$, где

$W_{опер}(t_{нс}/t_{об})$ - показатель оперативности, характеризует быстродействие алгоритма и оценивается как отношение времени поступления выборки $t_{нс}$ ко времени ее обработки $t_{об}$;

$W_{дост}(P(|\xi - \xi^*| \leq \varepsilon) \geq P_{зад})$ - показатель достоверности, характеризует меру отличия между оценочным и истинным значениями или вероятностью того, что результирующая погрешность оценивания не выходит за заданные пределы;

$W_{роб}$ - показатель робастности характеризует устойчивость результатов оценивания информационных компонент телеметрируемых процессов при искажении измерительной информации за счет погрешностей измерений.

Системный анализ целей и задач оперативного автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств позволил представить задачу разработки алгоритма оперативной обработки телеметрической информации в виде:

$$П : \langle G_{\partial}, \Omega, \Theta, P, W \rangle,$$

где $\Omega = \{ \Omega_{рн}, \Omega_{тмс}, \Omega_{ном}, \Omega_{неоп} \}$:

$\Omega_{рн} \Rightarrow \Theta_{сл ст}$ - множество факторов, связанных с показателями, определяющими техническое состояние ракеты-носителя как в целом, так и отдельных систем и блоков;

$\Omega_{тмс} \Rightarrow \Theta_{изб}$ - множество факторов, связанных с показателями, определяющими условия и особенности функционирования системы сбора, передачи и обработки телеметрической информации;

$\Omega_{ном} \supset \{ \Theta_{аном}, \Theta_{проп} \}$ - множество факторов, связанных с показателями, определяющими текущую помеховую обстановку, к числу которых относится:

$\Theta_{аном} \Rightarrow \Omega_{неод} (\xi(t) = \xi_u(t) \oplus \xi_a(t))$ - неоднородность, вызванная воздействием аномалий $\xi_a(t)$ на измерительный процесс $\xi_u(t)$, достигающая по различным группам параметров 3% - 13%

$\Theta_{проп} \Rightarrow \Omega_{проп} (\xi(t) \rightarrow \{ \xi(t_{i \in 0 \dots N}) \} \Delta t = t_j - t_{j-1} \neq const \ j \in 1 \dots N)$ - пропуски данных;

$\Omega_{неоп} \supset \{ \Theta_{раз}, \Theta_{сл ити}, \Theta_{сл гр} \}$ - множество неопределенных факторов, не входящих в перечисленные группы;

$P = \{ P_{огран}, P_{кон} \}$ - множество ограничений, накладываемых на применение множества допустимых алгоритмов G_{∂} , которое предварительно может быть сформировано следующим образом:

$P_{огран} (T_a < \infty)$ - конечность длительности T_a обрабатываемой выборки;

$P_{кон} \left(\int_0^{\infty} S_{\xi}(f) df = R_{\xi}(0) = \sigma_{\xi}^2 < \infty \right)$ - конечность энергии обрабатываемой выборки.

Систематизация особенностей поступающей телеметрической информации вскрывает существенное противоречие между требованиями, предъявляемыми к достоверности и оперативности автоматизированного анализа, и ее исходным качеством. Однако, большое разнообразие, неоднородность и избыточность поступающей телеметрической информации не позволяют

классическими методами провести синтез алгоритмов ее подготовки. Поэтому задача разработки сводится к задаче статификационного выбора алгоритма G^{stat} из множества допустимых G_o [23, 31, 64]:

$$P \xrightarrow{\Theta} K : G_o(\Omega) \xrightarrow{W} G^{stat},$$

где K - критерий выбора алгоритма, сформированный с привлечением дополнительной информации Θ .

Решение частных задач, возникающих в ходе разработки алгоритмов структурно-параметрической оперативной подготовки телеметрической информации ракеты-носителя, связано с проведением вероятностных исследований ее структуры, формированием и уточнением множества ограничений P , обоснованием ее обобщенной модели и выбором математического аппарата.

Выводы по главе 1

1. Совершенствование старых и разработка новых космических средств, расширение круга решаемых ими задач и развитие современных информационных технологий требует разработки комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации для повышения достоверности и оперативности принимаемых решений об их техническом состоянии в реальном масштабе времени. Основными достоинствами разрабатываемых комплексов являются:

- автоматизированная обработка информации и отображение обобщенных результатов оценивания в режиме реального времени;
- автоматизированная идентификация состояния космических средств и формирование рекомендаций по управлению в условиях жестких временных ограничений;
- интеграция существующих специализированных программно-аппаратных комплексов в единую систему мониторинга;
- учет накопленных знаний по устройству, принципам функционирования, правилам эксплуатации объекта мониторинга;

2. Разрабатываемые комплексы автоматизированного анализа предъявляют высокие требования к качеству и достоверности поступающей телеметрической информации, что связано с дефицитом времени, отводимым на решение задач анализа, использованием сложных формальных моделей и многопоточностью схем автоматизированного анализа.

3. Поступающая телеметрическая информация обладает сложной изменяющейся во времени структурой, явно связанной с режимами работы двигательных установок и разделением ступеней ракеты-носителя, и характеризуется разнообразием смыслового содержания, нестационарностью по совокупности параметров, неоднородностью, обусловленной наличием разнообразных погрешностей и пропусками измерений, высокой избыточностью.

4. Анализ особенностей существующих программных комплексов и средств их разработки, предназначенных для автоматизации процесса анализа телеметрической информации, показал их малую пригодность для решения задач оперативного автоматизированного анализа, поскольку в их составе отсутствуют средства по борьбе с неоднородностями поступающей телеметрической информации.

5. Опыт применения традиционных подходов к повышению качества и достоверности поступающей телеметрической информации показывает, что они в недостаточной мере учитывают особенности ее структуры и их алгоритмы сложны для применения в реальном масштабе времени. В связи с этим возникает необходимость выбора математического аппарата для оперативной обработки телеметрической информации.

6. Анализ условий формирования и передачи телеметрической информации семейства ракет-носителей типа «Союз» позволил обосновать ее обобщенную модель. Физические процессы, протекающие на борту ракеты-носителя, подверженные случайным внешним воздействиям и внутренним возмущениям, могут быть представлены в классе непрерывных случайных процессов. В то же время, с целью передачи по цифровым каналам связи, исходная информация подвергается дискретизации по времени и квантованию по уровню, поэтому на стороне обработки может быть представлена в классе случайных последовательностей.

7. Систематизация особенностей поступающей телеметрической информации вскрывает существенное противоречие между требованиями, предъявляемыми к достоверности и оперативности автоматизированного анализа, и ее исходным качеством. Однако, большое разнообразие, неоднородность и избыточность поступающей телеметрической информации не позволяют классическими методами провести синтез алгоритмов ее обработки. Формальная постановка задачи исследования позволила задачу синтеза свести к задаче статификационного выбора алгоритма из множества допустимых.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2»

Во второй главе проводится формирование и уточнение характеристик элементов множества ограничений P , обосновывается обобщенная модель телеметрируемых процессов $\xi(t)$ в системах обработки информации ракеты-носителя «Союз-2». Получены соотношения, позволяющие проводить оценивание моментных и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик с использованием характеристик «превышения уровня» траектории телеметрируемого процесса. Предложена метрика разделения телеметрируемых процессов с различными типами спектров.

2.1 Характеристики вероятностной структуры телеметрируемых процессов

С целью формирования множества ограничений P было проведено вероятностное исследование телеметрируемых процессов для наиболее информативных групп функциональных параметров с частотами опроса 50, 100 и 200 Гц, полученных в ходе испытаний ракеты-носителя «Союз-2» [87]. При этом считалось, что мультипликативная составляющая погрешности $\Omega_{неод}(\xi(t) = [\xi_u(t) \otimes \alpha \xi_a(t)] \rightarrow \xi_u(t) + \alpha \xi_a(t))$ полностью исключена на этапе первичной обработки, а исключенные результаты измерений восстановлены сплайн-интерполяцией, порядок которой определялся коэффициентом вариации телеметрируемого процесса; тогда время поступления значений $\xi(t_j)$ постоянно и равно $\Delta t = 1/F_0$:

$$P_{фикс}(\xi(t) = \{\xi(t_{i \in 0 \dots N})\} \Delta t = t_j - t_{j-1} = 1/F_0 = const \forall j \in 1 \dots N) \in P.$$

Анализ условий формирования телеметрируемых параметров ракеты-носителя показывает, что на любом выделенном участке они могут рассматриваться как реализации некоторого случайного процесса $\xi(t)$.

Описание свойств случайного процесса $\xi(t)$ в зависимости от класса решаемых задач может осуществляться на различных уровнях и различными способами.

1. Исследование одномерных распределений:

- оценивание моментных характеристик одномерных распределений, таких как математическое ожидание $m_\xi = M[\xi(t)]$, дисперсия $\sigma_\xi^2 = D_\xi = M[(\xi(t) - m_\xi)^2]$ и т. д.

- оценивание функции распределения $F(\xi)$ или плотности вероятности $p(\xi)$.

2. Исследование двумерных распределений:

- оценивание двумерной функции распределения $F(\xi_1, \xi_2)$ или плотностей вероятности $p(\xi_1, \xi_2)$;

- оценивание корреляционных функций $R_\xi(\tau)$ и спектральных плотностей $S_\xi(\omega)$;
- оценивание обобщенных спектрально-корреляционных характеристик, таких как центральная частота $f_0 = 2\pi\omega_0$, эффективная ширина спектра $\Delta f_s = 2\pi\Delta\omega_s$, интервал корреляции τ_k , коэффициент формы спектра \aleph .

3. Исследование характеристик детальной структуры телеметрируемых процессов:

- оценивание числа пересечений $n(H, T_a)$ траекторией $\xi(t)$ заданного уровня H на интервале анализа T_a , числа экстремальных значений $n_{\text{экс}}(T_a)$, высоты локальных максимумов ξ_m , высоты абсолютного максимума ξ_{mm} и др.

4. Исследование N -мерных плотностей вероятности.

Хотя N -мерная плотность вероятности и является полной статистической характеристикой случайного процесса, но алгоритмы оценивания ее характеристик предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам рабочих станций. Поэтому исследование характеристик поступающей в реальном масштабе времени телеметрической информации было ограничено исследованиями на уровнях одномерных, двумерных распределений и характеристик «превышения уровня».

В практике обработки телеметрической информации нередко возникает необходимость контроля значений $\xi(t_1), \xi(t_2), \dots, \xi(t_m)$ телеметрируемого параметра $\xi(t)$ в некотором диапазоне $[\xi_{\min}; \xi_{\max}]$. В связи с этим возникает ряд задач, требующих оценивания характеристик, связанных с выходом значений $\xi(t)$ за границы контролируемого диапазона, таких как:

- подсчет числа выходов значений за диапазон;
 - время первого выхода значений, время первого достижения границ;
 - длительность пребывания вне диапазона;
 - подсчет числа перегибов траектории $\xi(t)$;
 - значения абсолютного максимума, минимума;
- и т.д.

Все перечисленные характеристики могут быть получены в результате исследования N -мерных распределений $\xi(t)$. Однако, оценивание N -мерных распределений сопряжено с проведением большого объема вычислений, а интерпретация полученных результатов сложна. Поэтому для описания характеристик траектории телеметрируемого процесса $\xi(t)$ выделяют совокупность «особых точек» (Рисунок 2.1) и их характеристик, являющихся предметом изучения теории выбросов [96, 100, 107].

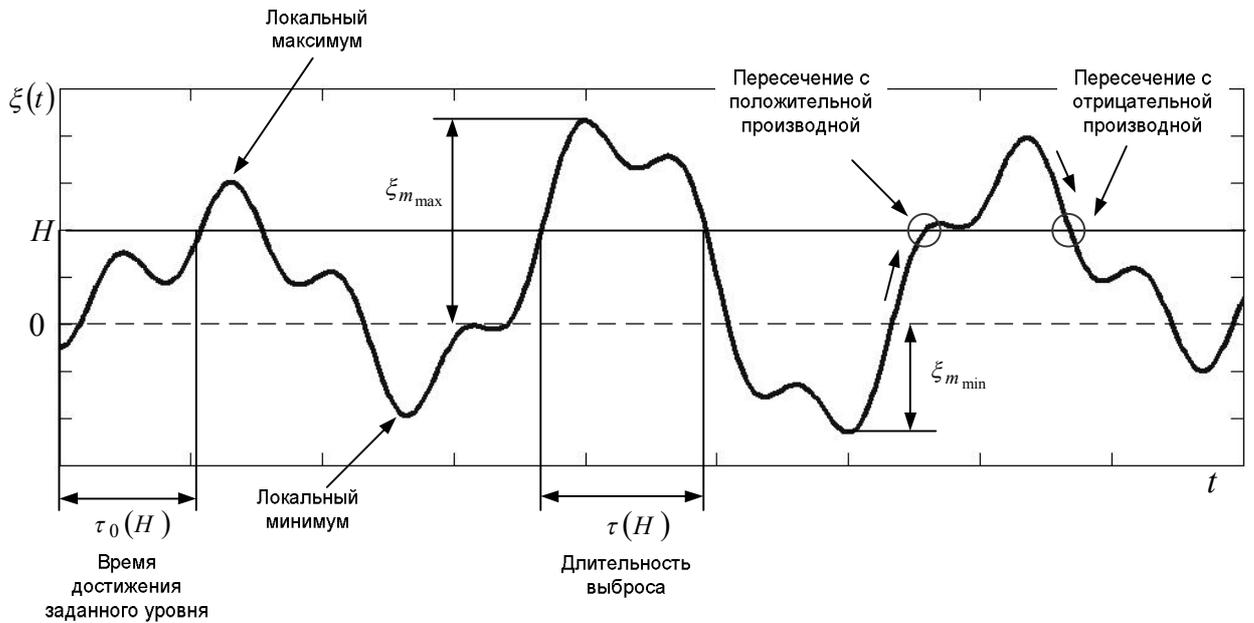


Рисунок 2.1 Характеристики типа «превышения уровня» траектории случайных процессов

Наиболее распространенными характеристиками структуры траектории телеметрируемого процесса являются [101]:

- количество пересечений траекторией $\xi(t)$ заданного уровня H за время анализа T_a , $n(H, T_a)$, $n^+(H, T_a)$, $n^-(H, T_a)$ (Рисунок 2.2);

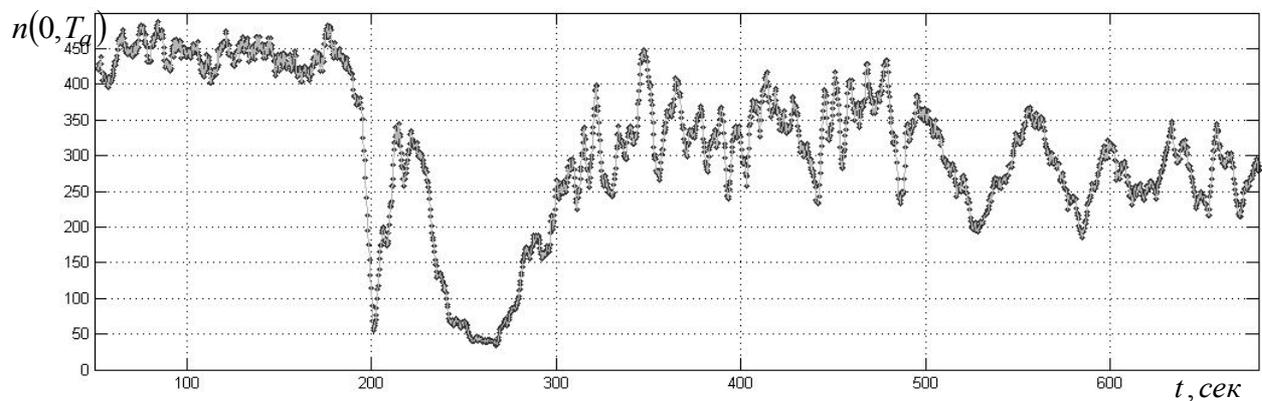


Рисунок 2.2 График изменения числа пересечений нулевого ($N=0$) уровня траекторией телеметрируемого процесса, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

- число экстремальных (максимумов, минимумов) значений траектории $\xi(t)$, $n_{экт}(T_a)$, $n_{\max}(T_a)$, $n_{\min}(T_a)$ (Рисунок 2.3);

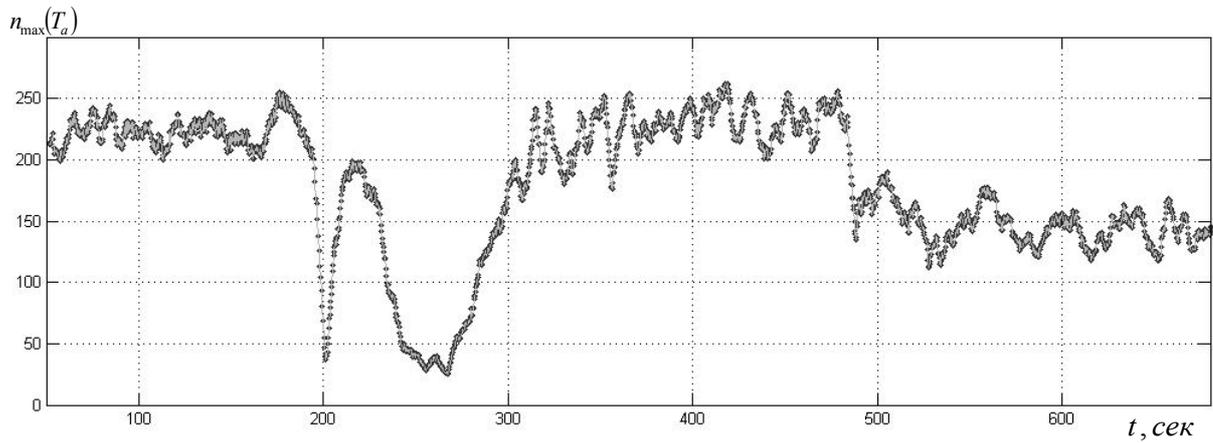


Рисунок 2.3 График изменения числа локальных максимумов траектории телеметрируемого процесса, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

- высота локального максимума (или минимума) $\xi_{\max/\min}$;
- высота абсолютного максимума (супремума), ξ_{mm} ;
- время первого достижения заданной границы, $\tau_0(H)$ (Рисунок 2.4);

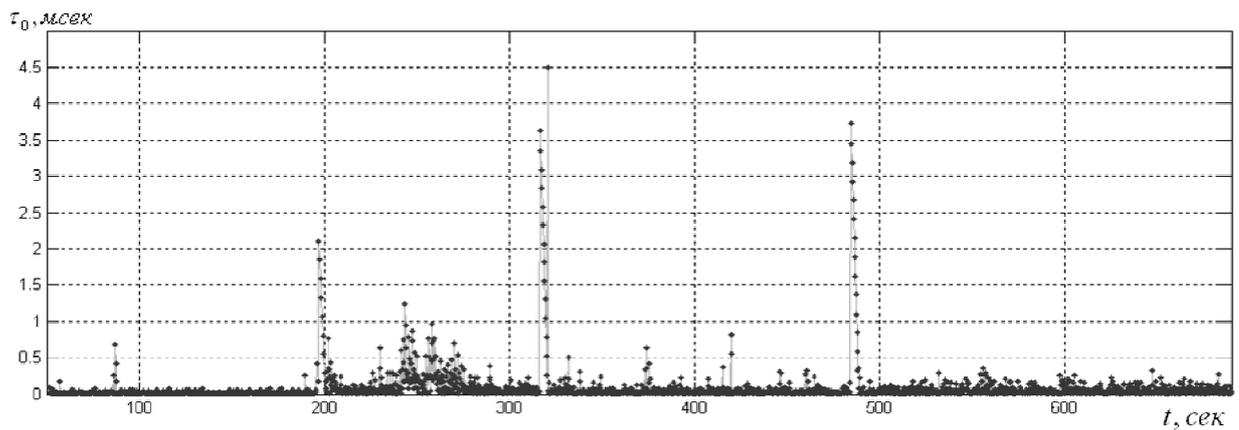


Рисунок 2.4 График изменения времени первого достижения заданного уровня ($H=0$) траекторией телеметрируемого процесса, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

- длительность выбросов траектории $\xi(t)$ над уровнем H , $t^+(H)$ (Рисунок 2.5);

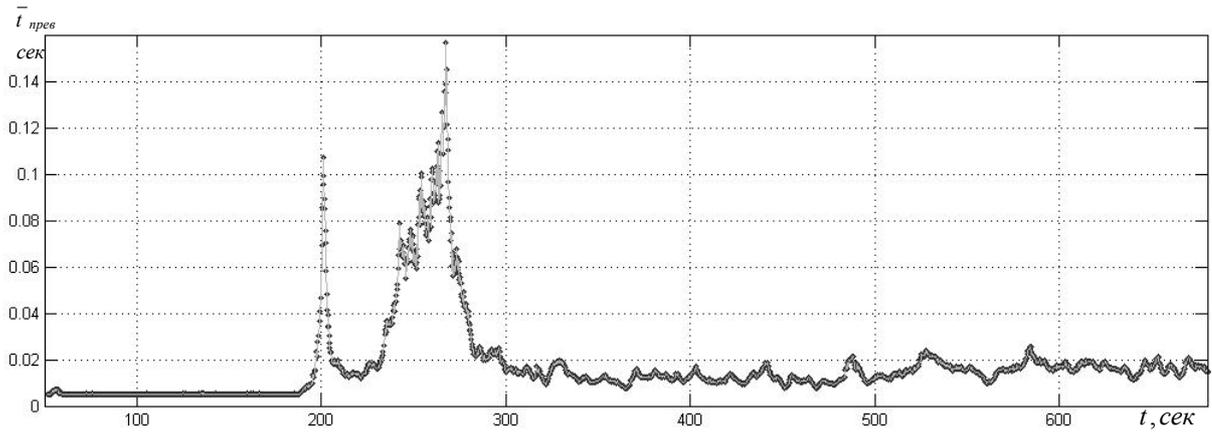


Рисунок 2.5 График изменения среднего времени превышения нулевого уровня ($H=0$) траекторией телеметрируемого процесса, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

- длительность интервалов между максимумом и минимумом траектории τ_{M-m} .

Характеристики выбросов находят широкое применение на практике. Так подсчет числа пересечений траекторией $\xi(t)$ заданного уровня H связан с исследованиями характеристик одномерных и спектрально-корреляционных характеристик $\xi(t)$. При оценке помехоустойчивости и надежности аппаратуры связи наибольшее использование находят характеристики длительности превышений и первого времени достижения заданной границы. Анализ предельных режимов работы сложных динамических систем, задачи расчета показателей безопасности, прогнозирования ресурса и оценивания живучести конструкций при случайных воздействиях связаны с исследованиями характеристик экстремальных значений [107].

Характеристики превышения уровня траектории $\xi(t)$ однозначно связаны с характером совместного поведения значений телеметрируемого процесса $\xi(t)$ и его производной $\xi'(t)$ в совпадающие моменты времени. Поэтому наиболее важными свойствами $\xi(t)$, с точки зрения использования характеристик выбросов, являются свойства непрерывности и дифференцируемости. Необходимым и достаточным условием непрерывности для стационарного случайного процесса $\xi(t)$ является [96, 119]:

$$R_{\xi}(0) = \sigma_{\xi}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) df < \infty. \quad (2.1)$$

Для анализа числа пересечений траекторией $\xi(t)$ заданного уровня H необходимо, чтобы телеметрируемый процесс был, по крайней мере, однократно дифференцируемым:

$$(-1)R_{\xi}^{(2)}(0) < \infty. \quad (2.2)$$

Исследование числа экстремальных значений траектории телеметрируемого процесса $\xi(t)$ накладывает более жесткое ограничение – исследуемый процесс $\xi(t)$ должен быть, по крайней мере, дважды дифференцируемым:

$$R_{\xi}^{(4)}(0) < \infty. \quad (2.3)$$

Характеристики выбросов относятся к детальным характеристикам случайных процессов. При решении любой практической задачи очень многое зависит от целей и условий исследования, вида вероятностных моделей и изучаемых процессов или используемых характеристик выбросов [101].

Число пересечений $n^+(H, T_a)$ траекторией $\xi(t)$ заданного уровня H и число экстремальных значений $n_{\text{экс}}(T_a)$ являются случайными величинами, поэтому интерес представляют не только они сами, но и их вероятностные характеристики, такие как среднее значение $N(H, T_a) = 2N^+(H, T_a) = 2N^-(H, T_a)$, $N_{\text{экс}}(T_a) = 2N_{\text{max}}(T_a) = 2N_{\text{min}}(T_a)$ и дисперсия $D[n(H, T_a)]$, $D[n_{\text{экс}}(T_a)]$ [100].

На интервале анализа, много большем интервала корреляции ($T_a \gg \tau_c$), среднее число пересечений с положительной производной $N^+(H, T_a)$ определяется известной формулой Райса [88, 98, 117, 118]:

$$N^+(H, T_a) = T_a \int_0^{\infty} \xi' p_2(H, \xi') d\xi', \quad (2.4)$$

где $p_2(H, \xi')$ – совместная плотность вероятности для значений $\xi(t)$ и $\xi'(t) = d\xi(t)/dt$ в совпадающие моменты времени t .

Если значения телеметрируемого процесса $\xi(t)$ и его производной $\xi'(t)$ в совпадающие моменты времени независимы, тогда [101]:

$$p_2(H, \xi') = p(\xi) p_{(1)}(\xi'). \quad (2.5)$$

Учитывая, что $\sigma_{\xi'}^2 = -d^2 R(\tau)/d\tau^2|_{\tau=0}$, получаем [114]:

$$N^+(H, T_a) = \frac{T_a}{\sqrt{2\pi}} \sigma_{\xi'} p(\xi)|_{\xi=H} = T_a \sigma_{\xi} \sqrt{\frac{-r''(0)}{2\pi}} p(H) \quad (2.6)$$

Помимо числа пересечений траекторией телеметрируемого процесса $\xi(t)$ некоторого уровня H также за время анализа $T_a < \infty$ можно наблюдать конечное число ее минимумов $n_{\text{min}}(T_a)$ и максимумов $n_{\text{max}}(T_a)$.

Моменты времени, в которые телеметрируемый процесс $\xi(t)$ достигает своего локального максимума или минимума, однозначно связаны с числом пересечений его траекторией «нулевого» уровня с положительной $N_{\min}(T_a) = N_{(1)}^+(0, T_a)$ или отрицательной производной $N_{\max}(T_a) = N_{(1)}^-(0, T_a)$ [107].

В таком случае среднее число максимумов траектории телеметрируемого процесса $\xi(t)$, имеющего плотность распределения близкую к гауссовой, будет:

$$N_{\max}(T_a) = N_{(1)}^-(0, T_a) = \frac{T_a}{2\pi} \sqrt{r^{(4)}(0)} p(0). \quad (2.7)$$

Выражения для вычисления среднего числа пересечений (2.6) и среднего числа максимумов (2.7) показывают, что характеристики одномерных и двумерных распределений тесно связаны между собой и позволяют наиболее простым способом решать задачу оценивания параметров этих процессов как во временной, так и в частотной области. Поэтому исследование структуры поступающей телеметрической информации можно проводить как классическими методами и алгоритмами вероятностного и спектрально-корреляционного анализа, так и с использованием математического аппарата теории выбросов.

2.2 Разработка и адаптация модели телеметрируемых процессов на уровне одномерных распределений

2.2.1 Исследование характеристик одномерных распределений телеметрируемых процессов

В любой фиксированный момент времени $t = t_1$ случайный процесс $\xi(t)$ принимает некоторое значение $\xi(t_1)$. Значение $\xi(t_1)$ есть случайная величина. Полной характеристикой, описывающей случайную величину $\xi(t_1)$, является функция распределения $F(\xi)$ или, если функция распределения $F(\xi)$ дифференцируема на всей области изменения $\xi(t)$, то плотность вероятности $p(\xi) = dF(\xi)/d\xi$ [100].

Одномерная плотность вероятности $p(\xi)$ не дает полного описания случайного процесса $\xi(t)$, но позволяет получить ряд его важных характеристик, таких как начальные [12, 94]:

$$a_k = a_k[\xi] = M[\xi^k] = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^k p(\xi) d\xi \quad (2.8)$$

и центральные моменты:

$$\mu_k = \mu_k[\xi] = M[(\xi - a_1)^k] = \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - a_1)^k p(\xi) d\xi. \quad (2.9)$$

Очевидно, что если первый начальный момент равен нулю $a_1 = 0$, начальные и центральные моменты совпадают.

Характеристики (2.8), (2.9) не могут быть получены точно, поскольку плотность вероятности $p(\xi)$ неизвестна. Поэтому на практике используют приближенные оценки для начальных [1, 50, 103]:

$$a_k = a_k[\xi] \approx a_k^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^k \quad (2.10)$$

и центральных моментов:

$$\mu_k = \mu_k[\xi] \approx \mu_k^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - a_1^*)^k, \quad (2.11)$$

где N - количество зафиксированных значений ξ_i .

В выборочной функции конечной длительности (время анализа $T_a < \infty$) содержится вполне определенное количество информации о параметрах процесса $\xi(t)$, таких, как моменты a_k , корреляционные функции $R_\xi(\tau)$ и др. Количеством этой информации будут определяться нижние границы дисперсий оцениваемых параметров случайного процесса $\xi(t)$ [116].

Для обеспечения требуемой точности оценивания a_ξ^k были использованы аналитические зависимости между продолжительностью анализа T_a и вероятностными свойствами телеметрируемого процесса $\xi(t)$. Минимальная дисперсия $D[a_\xi^k]$ моментной функции a_ξ^k k -го порядка по выборочной функции случайного процесса $\xi(t)$ на интервале $[t_0, t_0 + T_a]$ фиксированной длительности T_a оценивается как [35]:

$$D[a_\xi^k] = \frac{4k\tau_k\sigma_\xi^{2k}}{T_a}, \quad (2.12)$$

где σ_ξ - среднеквадратическое отклонение, τ_k - интервал корреляции $\xi(t)$ на интервале анализа T_a . Задаваясь величиной дисперсии $D[a_\xi^k]$ оцениваемого момента распределения, может быть получена необходимая длительность анализа T_a :

$$T_a = \frac{4k\tau_k\sigma_\xi^{2k}}{D[a_\xi^k]}, \quad (2.13)$$

Для оценивания моментов одномерных распределений поступающей телеметрической информации применялись некоррелированные отсчеты, поскольку сравнительно небольшое увеличение требуемой длительности реализации при их использовании является вполне приемлемым, так как позволяет сократить объем вычислительных операций. За верхнюю оценку длины интервала корреляции принималась величина [36]:

$$\tau_k^* = \frac{1}{F_0/4+1}, \quad (2.14)$$

где F_0 - частота дискретизации телеметрируемого процесса.

При фиксированном времени анализа T_a точность оценивания высоких моментов распределения заметно падает по сравнению с первыми (Рисунок 2.6). Поэтому для уменьшения величины дисперсии $D[a_{\xi}^k]$ получаемых оценок необходимо длительность обрабатываемой выборки ограничить не только сверху, но и снизу:

$$P_{огран}(T_a < \infty) \rightarrow P_{огран}(\tau_k \ll T_a < \infty).$$

Проведенные расчеты для различных групп функциональных параметров ракеты-носителя показали, что для обеспечения точности оценивания моментов одномерных распределений четвертого порядка не ниже 10%, длительность интервала анализа T_a должна находиться в пределах $12\tau_k - 17\tau_k$.

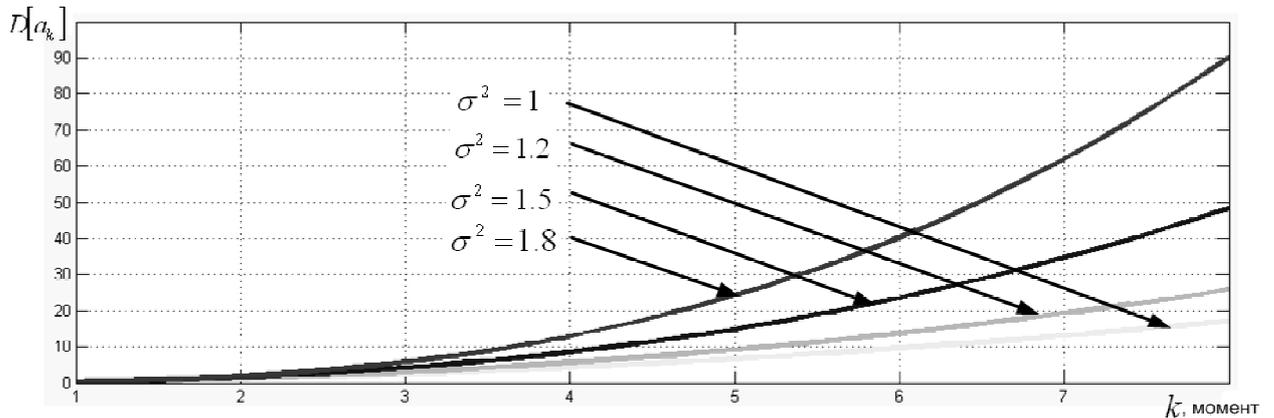


Рисунок 2.6 Графики изменения дисперсии оценки начального момента в зависимости от его порядка

Первый начальный момент – математическое ожидание $a_1^* = m_{\xi}^*$ характеризует центр рассеивания (Рисунок 2.7).

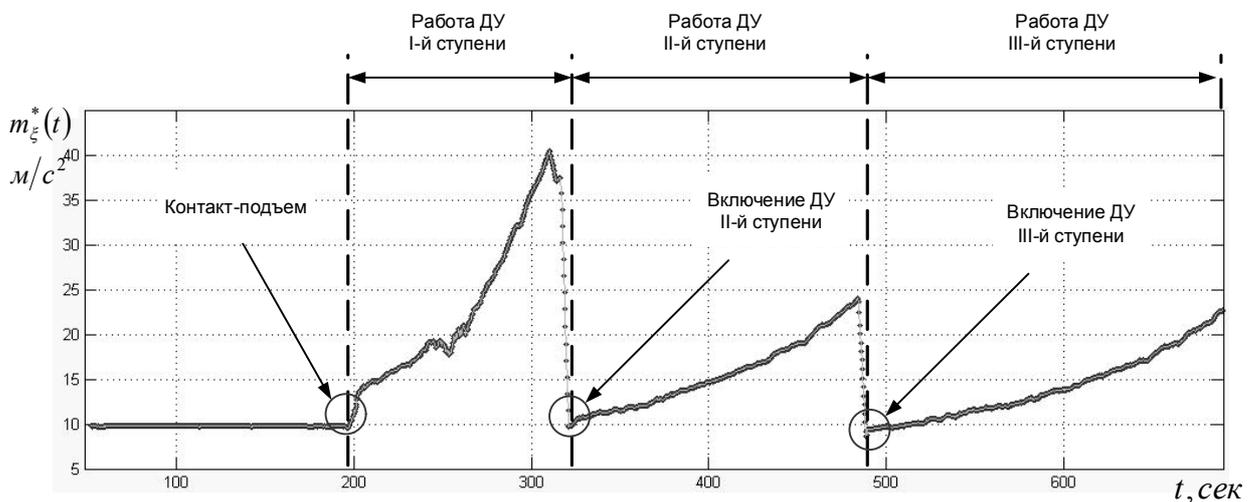


Рисунок 2.7 Изменение оценки математического ожидания параметра ОП, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Второй центральный момент – дисперсия, характеризующая величину рассеивания $\mu_2^* = D_\xi^* = \sigma_\xi^{2*}$ (Рисунок 2.8).

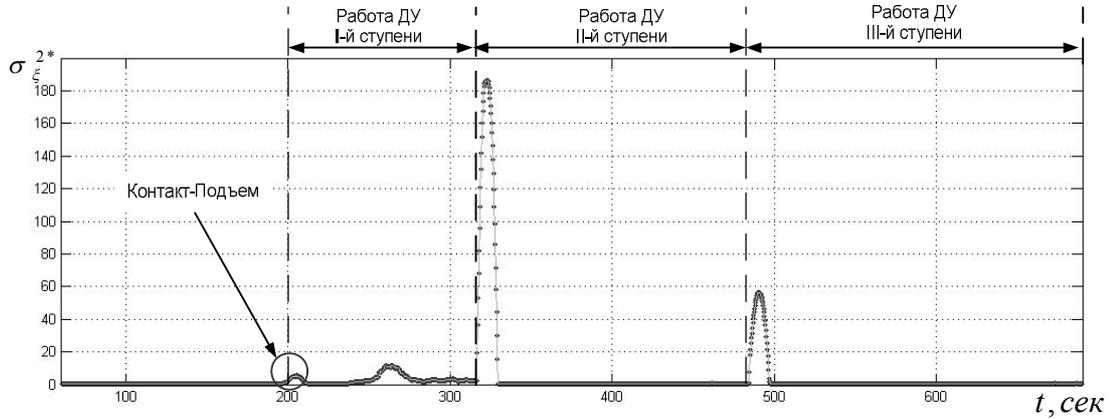


Рисунок 2.8 Изменение оценки дисперсии параметра ОП, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Для оценивания величины относительного разброса телеметрируемого процесса на практике получают оценку отношения среднеквадратического отклонения $\sigma_\xi^* = \sqrt{D_\xi^*}$ к математическому ожиданию m_ξ^* (Рисунок 2.9), называемую коэффициентом вариации:

$$v_\xi^* = \frac{\sigma_\xi^*}{|m_\xi^*|}. \quad (2.15)$$

По его значению можно судить об однородности телеметрируемого процесса. Однако при $|m_\xi^*| \approx 0$ $v_\xi^* \rightarrow \infty$, что приводит к неоднозначности и трудности применения выражения (2.15).

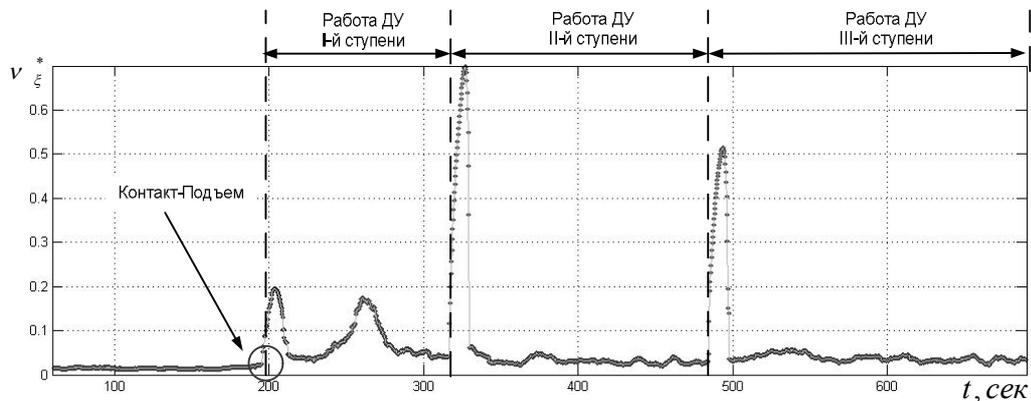


Рисунок 2.9 Изменение оценки коэффициента вариации параметра ОП, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Для оценивания характеристик формы и отклонения распределения от гауссова вместо третьего и четвертого центральных моментов удобнее рассматривать коэффициенты асимметрии (Рисунок 2.10, Рисунок 2.11) [1]:

$$\gamma_1^* = \mu_3^* / \sigma_\xi^{3*}, \quad (2.16)$$

и эксцесса:

$$\gamma_2^* = \mu_4^* / \sigma_\xi^{4*} - 3. \quad (2.17)$$

Коэффициент асимметрии является количественной характеристикой асимметрии плотности вероятности относительно ее центра рассеивания, т.е. математического ожидания. Если погрешности равные по величине, но различные по знаку встречаются одинаково часто, то γ_1 равен нулю, и распределение является симметричным.

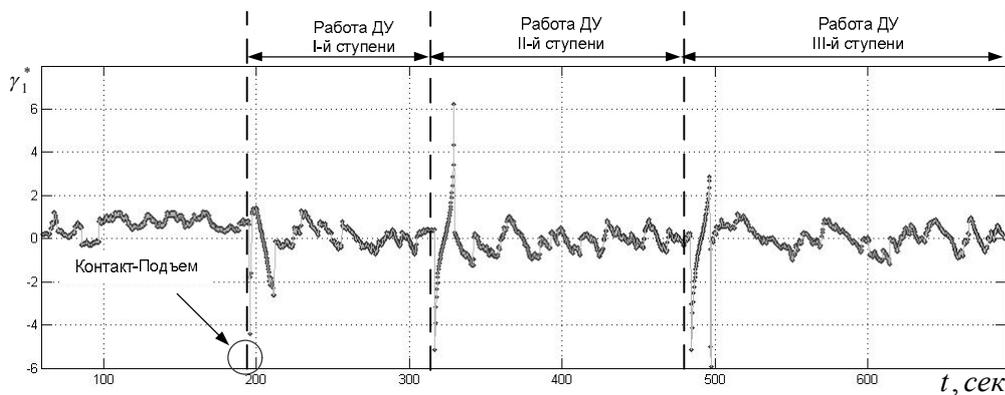


Рисунок 2.10 Изменение оценки коэффициента асимметрии параметра ОП, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Коэффициент эксцесса характеризует сглаженность кривой около математического ожидания. Положительное значение γ_2 указывает на большую концентрацию значений в «окрестностях» математического ожидания, и, как следствие, кривая плотности вероятности имеет более высокую и острую вершину, чем гауссова плотность. Отрицательное значение γ_2 указывает на более низкий и плоский характер вершины по сравнению с кривой гауссовой плотности [98].

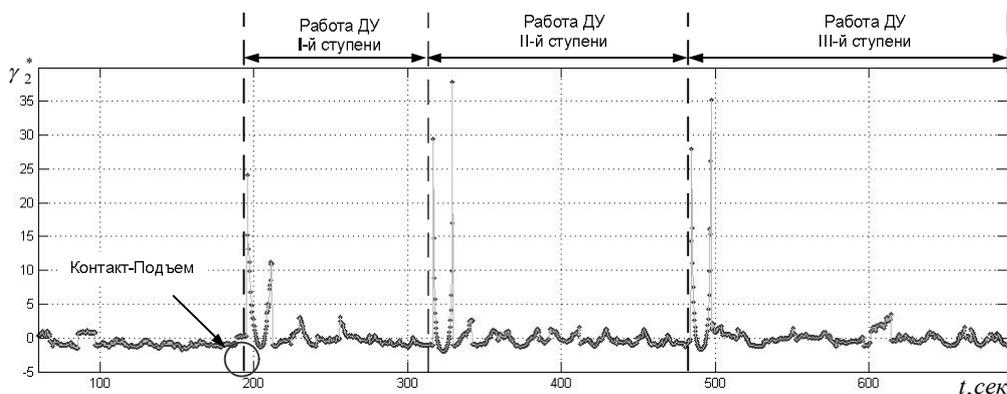


Рисунок 2.11 Изменение оценки коэффициента эксцесс параметра ОП, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

На основании результатов проведенных исследований телеметрируемых процессов на уровне моментов одномерных распределений можно сделать вывод, что телеметрируемые процессы $\xi(t)$ являются нестационарными в широком смысле $\Theta_{нест} \in \Theta$, но, в тоже время, можно выделить довольно протяженные по времени (100-200 секунд) участки, на которых изменения полученных оценок дисперсии σ_{ξ}^{*2} , коэффициентов асимметрии γ_1^* и эксцесса γ_2^* невелики. Таким образом, во время устоявшейся работы систем и агрегатов ракеты-носителя случайную составляющую $\xi(t)$ можно рассматривать как непрерывный стационарный на уровне одномерных распределений случайный процесс:

$$P_{стат} (p(\xi, t) = p(\xi, t + \tau) \forall t, t + \tau \in T_a) \in P.$$

При этом изменения полученных оценок коэффициентов асимметрии γ_1^* , эксцесса γ_2^* невелики, а их математические ожидания малы (Приложение 2) (Рисунок 2.10, Рисунок 2.11). Следовательно, можно утверждать, что плотность вероятности случайной составляющей телеметрируемых процессов $\xi(t)$, в целом, является симметричной и близка к гауссовой.

2.2.2 Исследование плотности вероятности телеметрируемого процесса

2.2.2.1 Исследование плотности вероятности с использованием гистограмм

Полной характеристикой, описывающей случайную величину на уровне исследования одномерных распределений, является функция распределения $F(\xi)$ или плотность вероятности $p(\xi)$.

Обычно считается, что случайная составляющая телеметрируемых процессов $\xi(t)$ имеет гауссово распределение. Действительно, если случайная составляющая телеметрируемого процесса является результатом воздействия многих независимых случайных факторов, то согласно центральной предельной теореме: «закон распределения суммы n независимых случайных величин, имеющих одно и то же распределение с математическим ожиданием m и дисперсией σ^2 , при увеличении n неограниченно приближается к гауссову» [4, 15, 47, 50]. Обосновать независимость и линейность воздействующих факторов трудно, поэтому в качестве оценки функции распределения $F(\xi)$ берут эмпирическую оценку $F_n^*(\xi)$:

$$F_n^*(\xi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta(\xi - \xi_i), \quad (2.18)$$

где η – единичная функция вида $\eta(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi < 0 \\ 1, & \xi \geq 0 \end{cases}$.

Согласно теореме Гливенко-Кантелли, эмпирическая оценка функции распределения (2.18) является состоятельной, причем сходимость $F_n^*(\xi)$ к $F(\xi)$ равномерна по ξ [13].

В отличие от восстановления функции распределения по выборке, восстановление плотности вероятности представляет гораздо большие трудности. Действительно, получив оценку $F^*(\xi)$, можно, проведя операцию дифференцирования, получить оценку $p^*(\xi) = dF^*(\xi)/d\xi$. Но задача дифференцирования принадлежит к классу некорректно поставленных, так как сколь угодно малые изменения в $F^*(\xi)$ могут привести к большим изменениям в $p^*(\xi)$ [55].

Существует довольно много алгоритмов получения оценки плотности вероятности $p^*(\xi)$ случайной величины ξ . Довольно подробно они рассмотрены в [55, 72, 101], однако большинство из них сложны и ресурсоемки.

Исторически первым методом оценивания плотности вероятности $p^*(\xi)$ является метод гистограмм.

Алгоритм оценивания плотности вероятности по гистограмме заключается в следующем: область изменения значений случайной величины разбивается на N равных интервалов, $\Delta\xi_1 = \Delta\xi_2 \dots = \Delta\xi_M = \Delta\xi$ и за оценку плотности вероятности принимается [1, 43]:

$$p^*(\xi) = \frac{n_i}{n\Delta\xi} \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (2.19)$$

где n_i - число значений, «попавших» в i -й интервал, n - общее число значений.

Достоинством метода гистограмм является то, что он не требует никакой априорной информации об исследуемом распределении. К недостаткам данного метода необходимо отнести сложность практической реализации, связанную с большим объемом вычислений, и смещенность получаемой оценки $p^*(H)$, пропорциональной $\Delta\xi^2$ [8]:

$$|p^*(H) - p(H)| \approx \frac{\Delta\xi^2}{24} p''(H), \quad (2.20)$$

где $p(H)$ - истинное значение.

Одной из задач, связанных с применением метода гистограмм, является задача выбора числа интервалов M , на которые разбивается область изменения значений $\xi(t)$. Слишком большое число малых интервалов, некоторые из которых окажутся пустыми или содержащие малое число отсчетов, приведет к «изрезанности» получаемой оценки $p^*(\xi)$. Слишком малое M приведет к «крупной ступенчатости» $p^*(\xi)$, что скроет характерные особенности $p(\xi)$ [72].

Существует множество рекомендаций по выбору количества интервалов M . Наиболее распространенная из них говорит о количестве «попаданий» значений в каждый интервал. При этом предпочтительно выбирать число интервалов всегда нечетным, так как при четном числе

интервалов и островершинной или двумодальной симметричной плотности вероятности в центре гистограммы оказываются два равных по высоте столбца, и середина кривой плотности вероятности принудительно уплощается. В тоже время, существуют и более конкретные рекомендации по выбору оптимального числа интервалов M , связанные, в основном, с объемом выборки n . Наиболее известными из них являются оценки [42, 109, 72]:

- Старджеса:

$$M = \log_2(n) + 1 \approx 3.3 \lg(n) + 1; \quad (2.21)$$

- Брукса и Каррузера:

$$M = 5 \lg(n); \quad (2.22)$$

- И. Хайнхольда и К. Гаеде:

$$M = \sqrt{n}; \quad (2.23)$$

- Г. Манна и А. Вальда для применения критерия χ^2 :

$$M \approx 4\sqrt[5]{2}(n/\rho)^{0.4}, \quad (2.24)$$

где ρ - квантиль гауссова распределения, соответствующий выбранному уровню значимости;

- П. В. Новицкого:

$$\begin{aligned} M_{\min} &= 0.55n^{0.4} \\ M_{\max} &= 1.25n^{0.4} \\ M_{\text{сред}} &= \frac{(M_{\max} + M_{\min})}{2} = 0.9n^{0.4}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Для сопоставления перечисленных рекомендаций на Рисунок 2.12 приведены кривые, соответствующие рекомендациям Старджеса (1), Брукса (2) и Хайнхольда (3); заштрихованными прямоугольниками показаны рекомендации ВНТМИМ им. Д.И. Менделеева. При небольшом объеме выборки $n \approx 100$ рекомендации схожи, но при возрастании объема выборки становятся существенно различными [72]:

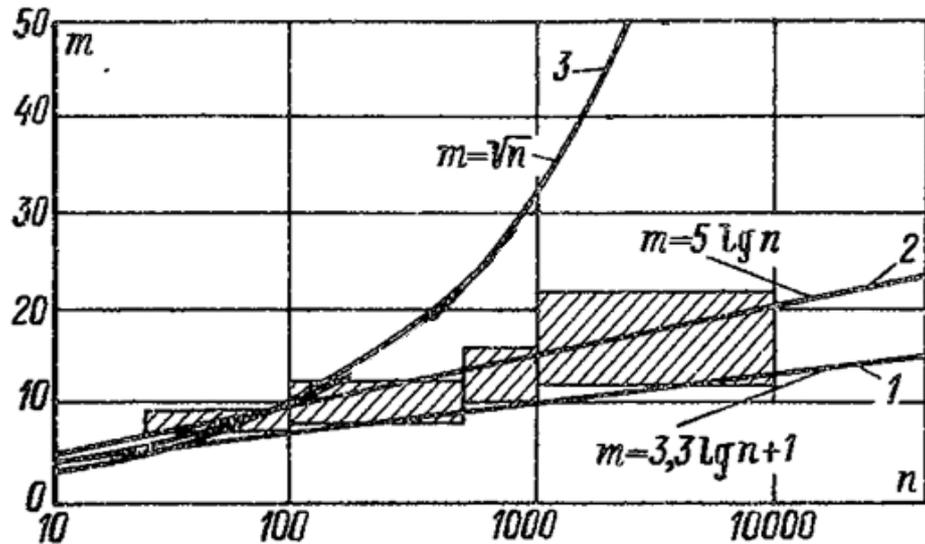


Рисунок 2.12 Оптимальное число столбцов гистограммы по различным критериям выборки различного объема

В Таблица 2.1 приведено рекомендуемое количество интервалов гистограммы, рассчитанное по различным критериям и зависящее только от объема выборки n . Полученные результаты были округлены всегда в большую сторону, и, если число интервалов M получалось четным, то добавлялся еще один.

Таблица 2.1 Рекомендуемое число столбцов гистограммы, полученное различными методами

Объем вы- борки	Старджес	Брукс	Гаеде	Новицкий		
				Min	Max	Сред.
2000	13	17	45	13	27	19
2500	13	17	51	13	29	21
3000	13	19	55	15	31	23
3500	13	19	61	15	33	25
4000	13	19	65	17	35	25

Разброс «оптимального» числа интервалов группировки, полученных с использованием различных критериев (Таблица 2.1), говорит о том, что выражения (2.37) - (2.43) носят, в целом, рекомендательный характер, и на практике необходимо варьировать число интервалов в ту или иную сторону в зависимости от требуемой точности оценивания.

Для сопоставления полученной оценки плотности вероятности $p^*(\xi)$ с каким-либо параметрическим семейством распределений (с точностью 1%) время наблюдения телеметрируемого процесса составляет [75]:

для параметров с частотой опроса 50 Гц – 50-60 сек,

для параметров с частотой опроса 100 Гц – 25-30 сек,

для параметров с частотой опроса 200 Гц – 12-15сек.

Поэтому оценивание плотности вероятности телеметрируемых процессов было проведено только на участках устоявшейся работы систем и агрегатов ракеты-носителя (см. п. 2.2). При этом число интервалов группировки M бралось для средней оценки $M_{\text{сред}}$ числа интервалов по критерию Новицкого (2.43). Характерный результат оценивания $p^*(\xi)$ приведен на (Рисунок 2.13)

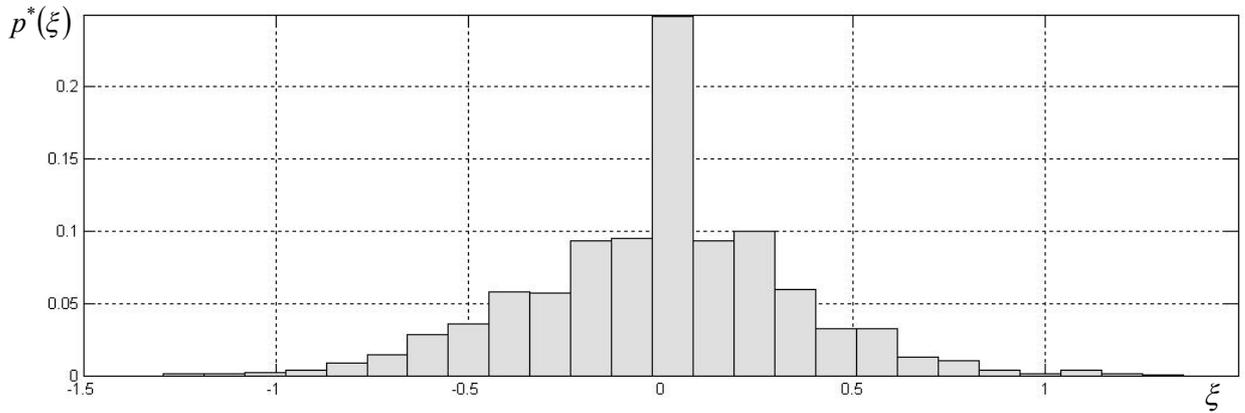


Рисунок 2.13 Характерный вид плотности вероятности параметра ОП, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2» во время работы двигательной установки 2-й ступени (385-390 сек.)

2.2.2.2 Исследование плотности вероятности с использованием характеристик превышения уровня

Проведенные исследования показали, что поступающая телеметрическая информация на всех этапах ее формирования и передачи подвергается большому числу воздействий, и результирующая плотность вероятности случайной составляющей $\xi(t)$ телеметрируемых процессов близка к гауссовой $p(\xi) \approx p_{\text{гаусс}}(\xi)$. В связи с этим можно утверждать, что значения самого телеметрируемого процесса $\xi(t)$ и его производной $\xi'(t)$ в совпадающие моменты времени статистически независимы $p_2(\xi, \xi') = p(\xi)p_{(1)}(\xi')$.

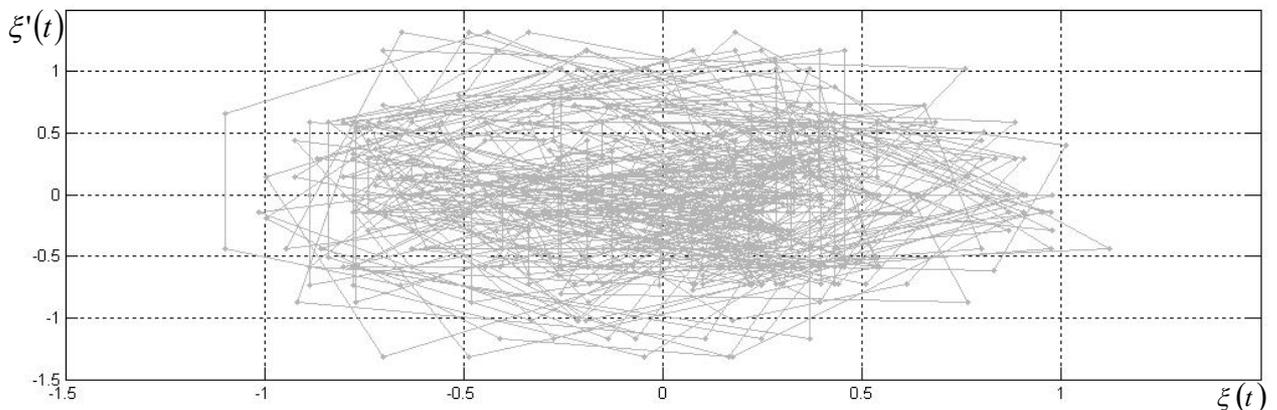


Рисунок 2.14 Характерный вид псевдофазовой траектории телеметрируемого процесса, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

В таком случае, среднее число пересечений $N(H, T_a)$ уровня H с точностью до постоянного множителя k пропорционально значению одномерной плотности вероятности рассматриваемого процесса $p(H)$ на этом уровне [101]:

$$N(H, T_a) = M\{\xi\} p(H) = k p(H) \quad (2.26)$$

Такая зависимость может использоваться для экспериментального определения плотности вероятности $p(\xi)$ путем простой регистрации числа пересечений $N(H, T_a)$ или регистрации числа выбросов $N^+(H, T_a)$ траектории $\xi(t)$ на разных уровнях $\xi(t) = H$.

При достаточно большом времени анализа (по сравнению с интервалом корреляции $T_a \gg \tau_\xi$) в качестве оценки $p^*(H)$ плотности вероятности $p(\xi)$ на уровне H может быть принята величина [101]:

$$p^*(H) = \frac{N(H, T_a)}{\kappa T_a}. \quad (2.27)$$

В отличие от метода гистограмм такая оценка не только более проста в реализации, но и обладает важным свойством несмещенности [101]:

$$M[p^*(H)] = \frac{M[n(H, T_a)]}{\kappa T_a} = p(\xi)|_{\xi=H} \quad (2.28)$$

Дисперсия оценки (2.27) имеет следующий вид [101]:

$$D[p^*(H)] = \frac{2n(H, T_a)}{(\kappa T_a)^2} \quad (2.29)$$

Относительная погрешность оценивания значения $p^*(H)$ функции $p(\xi)$ при этом равна (Рисунок 2.15) [101]:

$$\varepsilon[p^*(H)] = \frac{\sqrt{D[p^*(H)]}}{p(H)} = \frac{1}{\sqrt{N^+(H, T_a)}} \quad (2.30)$$

На Рисунок 2.15 приведено изменение относительной погрешности оценивания $\varepsilon[p^*(H)]$ от уровня, кратного среднеквадратическому отклонению, для гауссова процесса. Резкое возрастание значений $\varepsilon[p^*(H)]$ при $H > 2\sigma_\xi$ объясняется тем, что количество значений $\xi(t)|_{t > 2\sigma_\xi}$ мало.

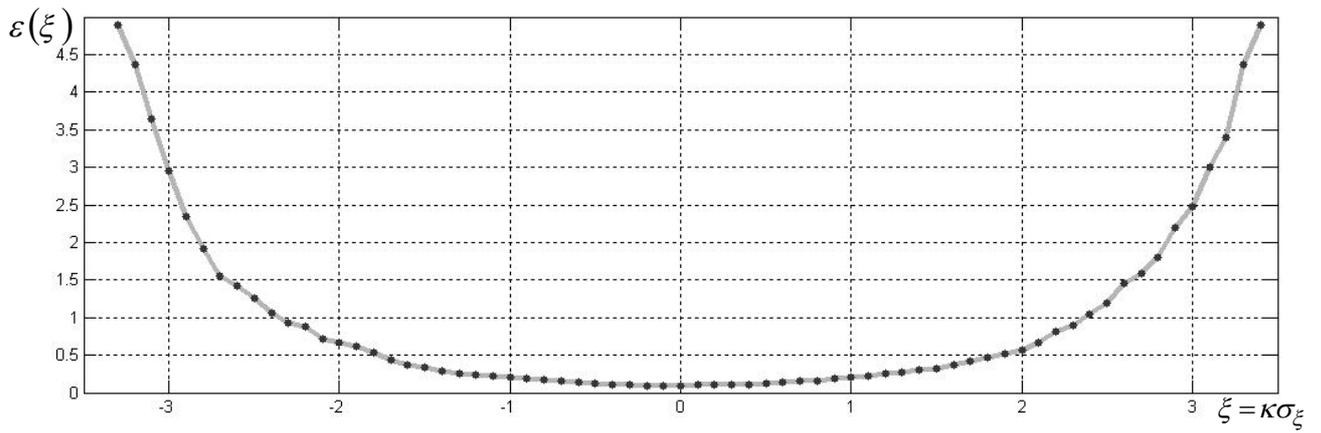


Рисунок 2.15 График изменения значения величины относительной погрешности оценивания плотности вероятности с использованием характеристик превышения уровня

Оценки плотности вероятности $p^*(\xi)$, получаемые с использованием характеристик превышения уровня, в отличие от оценок, получаемых с использованием метода гистограмм, являются несмещенными, более сглаженными (Рисунок 2.16) и требуют значительно меньшего объема вычислений [101]. Однако, для использования характеристик выбросов траектории телеметрируемых процессов необходимо, чтобы обрабатываемый процесс был, как минимум, однократно дифференцируем на интервале анализа T_a :

$$P_{\text{одн}}(r_{\xi}''(0) < \infty | T_a) \in P.$$

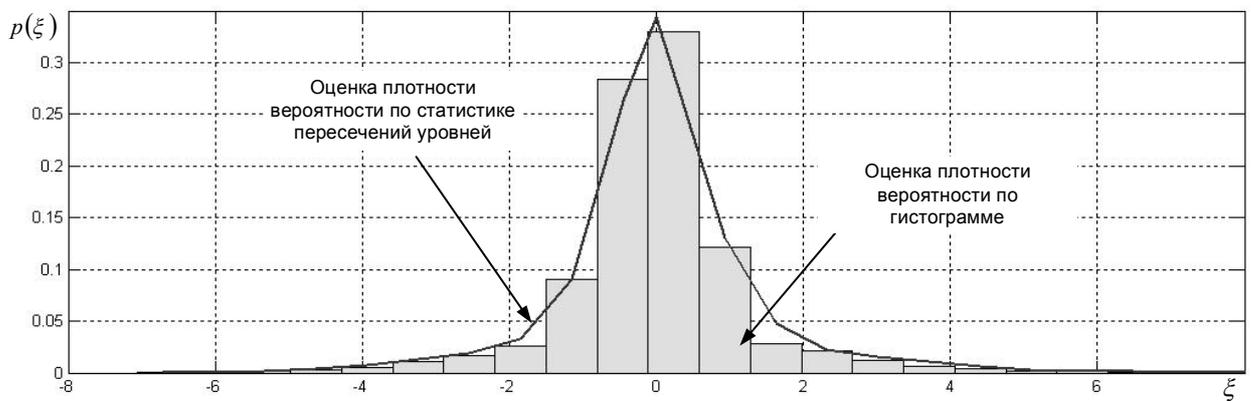


Рисунок 2.16 Сравнение оценок плотности вероятности по методу гистограмм и статистике превышения уровня

Анализ результатов оценивания плотности вероятности телеметрируемого процесса показывает, что на различных режимах работы ракеты-носителя полученные оценки $p^*(\xi)$, в целом, схожи и характеризуются асимметрией и эксцессом, что не позволяет их однозначно соотносить с простой гауссовой моделью:

$$p^*(\xi | \gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0) \neq p_z(\xi).$$

2.2.2.3 Классификация результирующей плотности вероятности по коэффициентам эксцесса и энтропии

Систематизация аналитических моделей законов распределений, приведенная в [71, 72], показывает взаимную «близость-удаленность» законов друг от друга и позволяет оценить эту «близость-удаленность» численно в зависимости от коэффициентов эксцесса γ_2 и энтропии K_3 распределения.

Результаты исследования моментных характеристик телеметрируемых процессов $\xi(t)$ ракеты-носителя позволяют говорить, что результирующие плотности вероятности $p(\xi)$ случайной составляющей телеметрируемых параметров на устоявшихся режимах работы систем и агрегатов ракеты-носителя симметричны, средние значения коэффициента асимметрии γ_1 – малы (Приложение 2). Таким образом, форма результирующей плотности вероятности характеризуется только коэффициентом эксцесса γ_2 .

Значения коэффициента эксцесса γ_2 для различных распределений колеблется в пределах от -2 до ∞ (распределение Коши), что для построения классификации неудобно. С целью ограничить область изменений γ_2 было проведено нелинейное преобразование, нормировка [71, 72]:

$$\chi = \frac{\sigma_\xi^2}{\sqrt{\mu_4}} = \frac{1}{\sqrt{\gamma_2 + 3}}, \quad \chi \in (0;1). \quad (2.31)$$

Соответственно, для гауссова распределения ($\gamma_2 = 0$) полученный коэффициент формы будет равен $\chi = 1/\sqrt{3} \approx 0.577$.

Однако классификация распределений по одному коэффициенту эксцесса является недостаточной, поскольку совершенно разные законы распределения могут иметь близкие или совпадающие значения эксцесса.

В качестве второго независимого признака формы закона распределения в [71, 72] предлагается принять энтропийный коэффициент:

$$K_3 = \frac{\Delta_3}{\sigma_\xi}, \quad (2.32)$$

где $\Delta_3 = \frac{1}{2} \exp(H(\xi))$, - энтропийное значение погрешности; $H(\xi) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi) \ln(p(\xi)) d\xi$ - изменение энтропии, вносимое измерением случайной величины ξ ; $p(\xi)$ - плотность вероятности случайной величины.

Выражение (2.32) применимо к любым распределениям и лежит в диапазоне от 0 (детерминированный процесс) до 2.066 (гауссов процесс) [71].

Оценивание коэффициента энтропии $K_{\mathcal{G}}$ по экспериментально полученным гистограммам производится следующим образом (Рисунок 2.17):

$$K_{\mathcal{G}}^* = \frac{\Delta \xi n}{2\sigma_{\xi}} 10^{-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^M n_i \lg n_i}, \quad (2.33)$$

где $H^*(\xi) = \ln \left[\Delta \xi \prod_{i=0}^M \left(\frac{n}{n_i} \right)^{\frac{n_i}{n}} \right]$ – энтропия распределения.

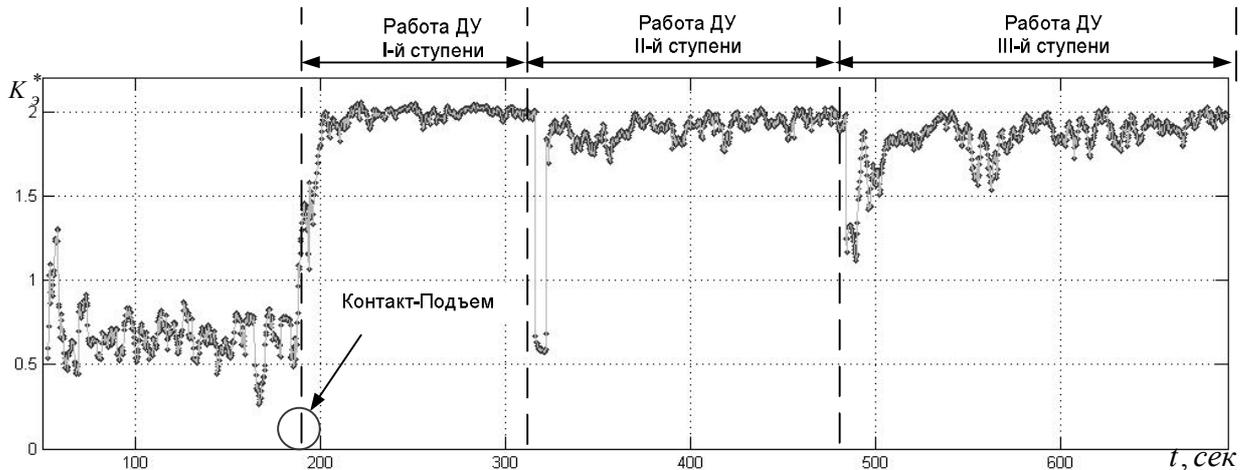


Рисунок 2.17 График изменения оценки коэффициента энтропии, параметра Осевая Перегрузка, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Таким образом, при использовании этих двух признаков любое распределение будет характеризоваться точкой на плоскости $\{\chi, K_{\mathcal{G}}\}$ (Рисунок 2.18) Вопрос оптимальности разбиения плоскости $\{\chi, K_{\mathcal{G}}\}$ и выбора «ближайшего» распределения исследовался в [105].

Проведенный анализ полученных оценок коэффициентов формы $\chi^* \in [0.411; 0.753]$ и энтропии $K_{\mathcal{G}}^* \in [1.464; 1.991]$ показывает (Рисунок 2.18), что большинство полученных оценок $p^*(\xi)$ принадлежат достаточно широкому классу распределений, называемых симметричными экспоненциальными распределениями [73]:

$$p(\xi) = \frac{\vartheta}{2\phi\sigma_{\xi}} \Gamma(1/\vartheta) \exp\left(-\left|\frac{\xi - m_{\xi}}{\phi\sigma_{\xi}}\right|\right), \quad (2.34)$$

где $\phi = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\vartheta)}{\Gamma(3/\vartheta)}}$, $\Gamma(x)$ - гамма-функция $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt$. При $\vartheta = 2$ (2.34) плотность вероятности $p(\xi)$ становится гауссовой плотностью, при $\vartheta > 2$ приближается к семейству трапецидальных распределений $\chi \in [0.435; 0.601]$ и $K_{\vartheta} \in [1.548; 2.021]$:

$$p(\xi) = \begin{cases} 0, & \text{при } |\xi| > y \\ \frac{y - |\xi|}{y^2}, & \text{при } |\xi| < y \end{cases} \quad (2.35)$$

при $\alpha \rightarrow \infty$ вырождается в равномерное распределение.

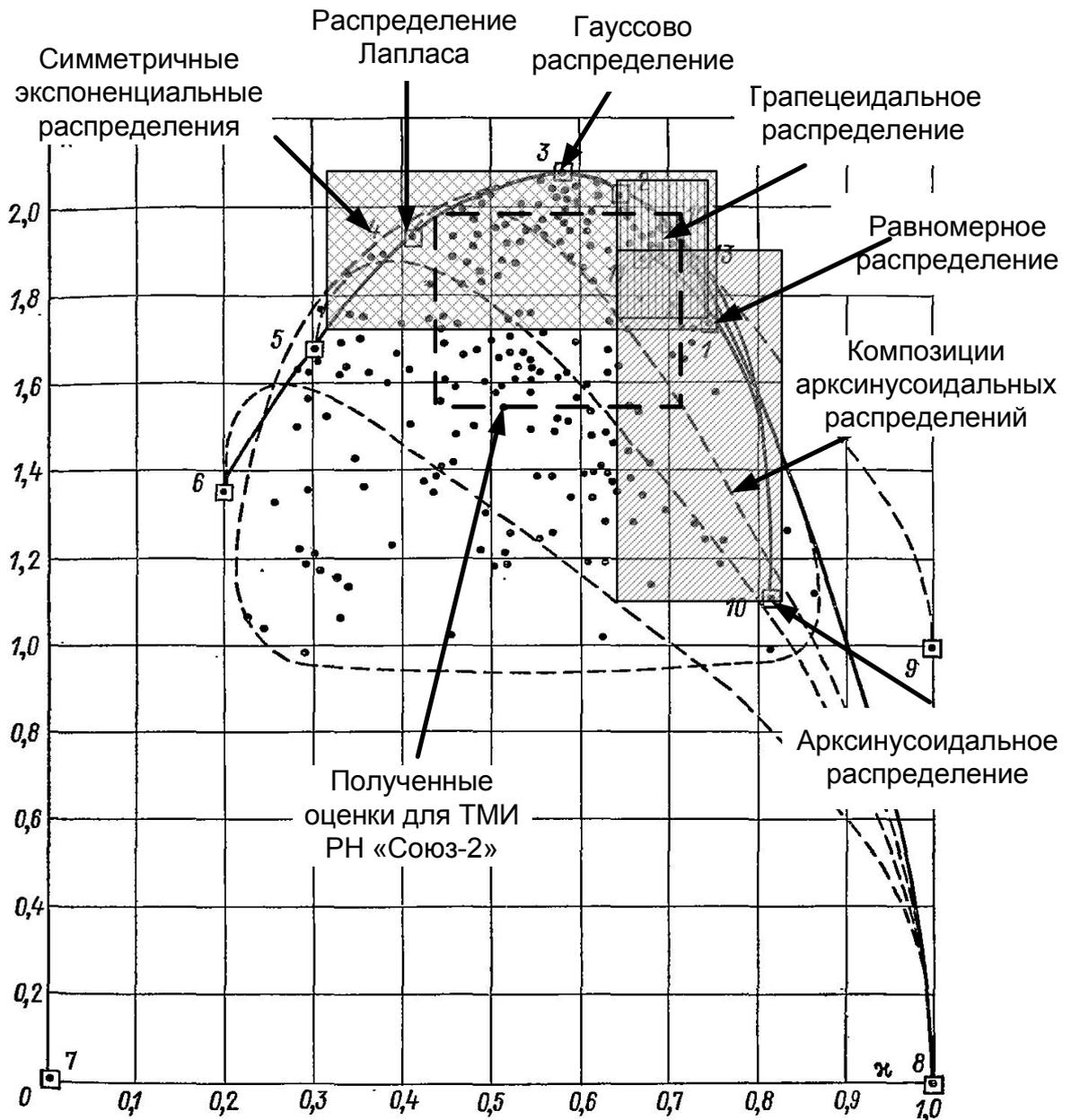


Рисунок 2.18 Результаты оценивания значения энтропии и коэффициента формы полученных оценок $p^*(\xi)$

Применение рассмотренного способа классификации распределений в реальном масштабе времени связано со следующими трудностями:

- дисперсия оценки коэффициента эксцесса γ_2^* в соответствие с (2.12) достаточно велика;
- оценивание энтропийного коэффициента $K_{\mathcal{G}}^*$ требует оценивания результирующей плотности вероятности $p^*(\xi)$, что связано с большим объемом вычислений;
- требуется достаточно точный расчет номограмм, приведенных в [71, 72].

Таким образом, рассмотренный метод классификации распределений может применяться только для качественного оценивания близости экспериментально получаемых плотностей вероятности $p^*(\xi)$ к известным параметрическим семействам.

Анализ полученных оценок коэффициентов формы χ^* и энтропии $K_{\mathcal{G}}^*$ показывает, что экспериментально полученные плотности вероятности $p^*(\xi)$ могут быть отнесены к классу симметричных экспоненциальных распределений. Однако использование модели (2.34) для аппроксимации получаемых оценок $p^*(\xi)$ сложно из-за большого объема вычислений значений гамма-функции $\Gamma(x)$ и трудностью оценивания в явном виде коэффициента \mathcal{G} .

2.2.3 Исследование модели временной структуры телеметрируемых процессов

Результаты исследования коэффициентов эксцесса γ_2^* и $K_{\mathcal{G}}^*$ энтропии показывают, что полученные оценки $p^*(\xi)$, в целом, близки к плотности вероятности Гаусса. В то же время, результаты исследования моментных характеристик распределения, проведенные в п. 2.2.1, из-за наличия асимметрии и эксцесса, не позволяют аппроксимировать полученные оценки $p^*(\xi)$ простой гауссовой моделью. Поэтому предлагается рассматривать результирующую плотность вероятности $p(\xi)$ в виде «смеси», состоящей из нескольких простых компонент [35, 36, 101]:

$$p(\xi) \approx \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i(\xi), \quad (2.36)$$

где $\alpha_i \geq 0$ и $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.

В наиболее общем случае компоненты $p_i(\xi)$ могут принадлежать к различным классам распределений. Выбор коэффициентов α_i осуществляется из условия [115]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left(p(\xi) - \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i(\xi) \right)^2 d\xi = \min, \quad (2.37)$$

которое сводится к критерию равенства моментов:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \xi^k p(\xi) d\xi = \sum_{i=1}^n \alpha_i \int_{-\infty}^{\infty} \xi^k p_i(\xi) d\xi, \quad k=1,2,3... \quad (2.38)$$

Проведенный анализ условий формирования и передачи телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз» позволяет представить результирующую плотность вероятности $p(\xi)$ в виде «смеси», состоящей из флуктуационной и аномальной компонент:

$$p(\xi) \approx \alpha_\phi p_\phi(\xi) + \alpha_a p_a(\xi), \quad (2.39)$$

где α_u , α_a - представляют вероятность появления флуктуационной и аномальной компонент, или, иными словами, α_a - величина загрязнения $\xi(t)$.

Весовые коэффициенты α_u , α_a фактически играют роль вероятности появления той или иной компоненты ($\alpha_u + \alpha_a = 1$). На практике удобнее оперировать не двумя коэффициентами α_u , α_a , а одним: $\alpha_u = 1 - \alpha_a$. Таким образом, модель (2.39) может быть представлена в виде [35,32,38]:

$$p(\xi) \approx (1 - \alpha_a) p_u(\xi) + \alpha_a p_a(\xi). \quad (2.40)$$

Полученная модель (2.39) носит название модели с α -загрязнением (коэффициент α_a - величина загрязнения $\xi(t)$) и может быть интерпретирована как модель со случайным «переключением» компонент (Рисунок 2.19) [36, 39,68, 101].

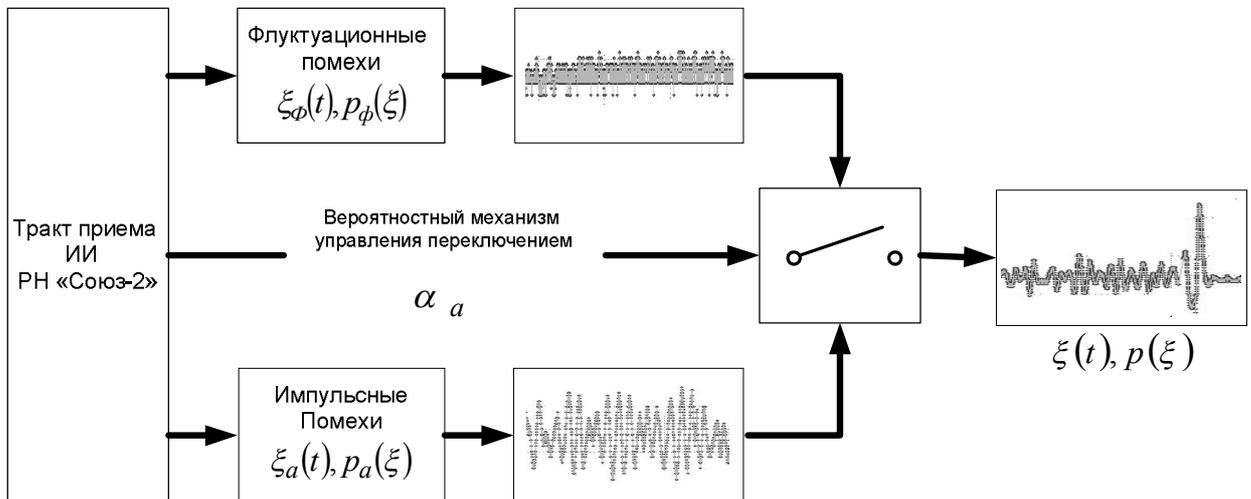


Рисунок 2.19 Упрощенная схема формирования телеметрируемых процессов

Модель (2.39) дает возможность как отдельного, так и совместного анализа вероятностной структуры флуктуационной и аномальной компонент телеметрируемых процессов. При этом дисперсия аномальной компоненты σ_a^2 должна быть значительно больше дисперсии флуктуационной компоненты σ_ϕ^2 .

Таким образом, характерные особенности полученных оценок $p^*(\xi)$ могут быть объяснены воздействием аномальной компоненты. Наличие асимметрии ($\gamma_1 \neq 0$) у результирующей

плотности вероятности объясняется разницей математических ожиданий аномальной и флуктуационной компонент ($m_u \neq m_a$).

В общем случае, компоненты результирующей «смеси» $p_u(\xi)$ и $p_a(\xi)$ могут принадлежать к различным классам распределений. Анализ результатов исследования моментных и энтропийных характеристик полученных оценок $p^*(\xi)$ показывают их близость к гауссовой плотности вероятности, поэтому в качестве модели плотности вероятности флуктуационной компоненты будем рассматривать гауссову плотность.

О природе возникновения аномальной компоненты известно мало, и обычно на практике в качестве ее модели рассматривают плотности вероятности Гаусса, арксинуса и равномерную [68, 121].

Если о физической природе аномальной компоненты ничего не известно, то в качестве модели аномальной компоненты $p_a(\xi)$ принимают плотность вероятности Гаусса [101, 115]:

$$\begin{aligned} p(\xi) &\approx (1 - \alpha_u) p_\phi(\xi) + \alpha_a p_a(\xi) = \\ &= \frac{1 - \alpha_a}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\phi^2}\right) + \frac{\alpha_a}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_a^2}\right). \end{aligned} \quad (2.41)$$

На (Рисунок 2.20) представлены результаты численного моделирования плотности вероятности, полученной из «смеси» гауссовой флуктуационной и аномальной компонент (величина загрязнения принималась $\alpha_a = 0.02$).

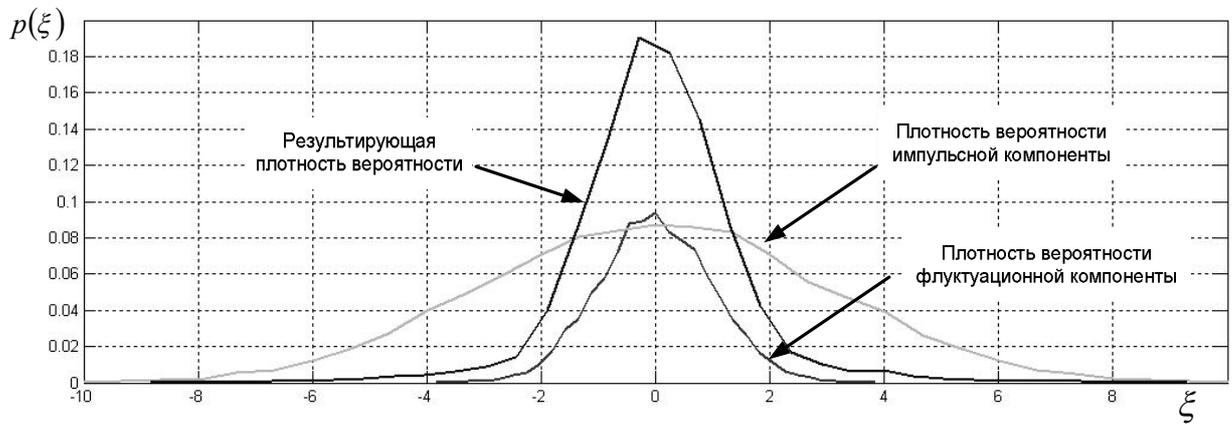


Рисунок 2.20 Результаты численного моделирования плотности вероятности, состоящей из двух гауссовых компонент

С другой стороны, хорошо известно, что характерной помехой при проведении электрических измерений является наводка синусоидального напряжения на входе измерительного прибора или линии связи от силовых цепей. Эта помеха обладает распределением, близким к распределению арксинуса, и ее плотность вероятности имеет вид [85]:

$$p(\xi) = \frac{1}{\pi \sqrt{2\sigma^2 - \xi^2}}. \quad (2.42)$$

Если в качестве модели плотности вероятности аномальной компоненты взять плотность вероятности арксинуса, то модель (2.39) примет вид [32]:

$$p(\xi) \approx (1 - \alpha_u) p_\phi(\xi) + \alpha_a p_a(\xi) = \frac{1 - \alpha_a}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\phi^2}\right) + \frac{\alpha_u}{\pi\sqrt{2\sigma_a^2 - \xi^2}}. \quad (2.43)$$

Результаты численного моделирования плотности вероятности, полученной из «смеси» гауссовой флуктуационной и арксинусной аномальной компонент, представлены на Рисунок 2.21.

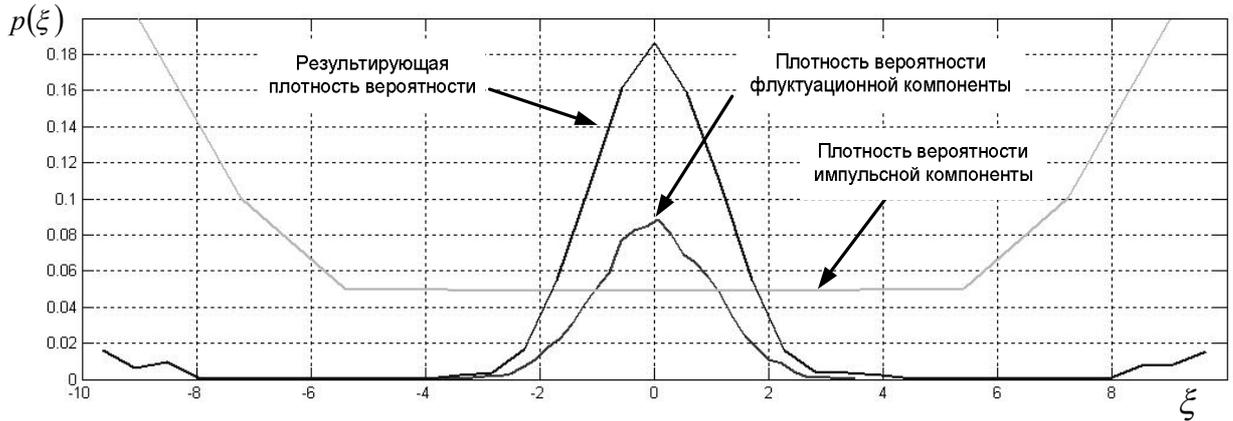


Рисунок 2.21 Результаты численного моделирования плотности вероятности, состоящей из смеси гауссовой и арксинусной компонент

Природа аномальных погрешностей при передаче непрерывных сообщений в цифровых системах передачи приводит к искажению в старших разрядах и характеризуется равномерной плотностью вероятности значений в пределах шкалы сообщений ($\Delta\xi$). Тогда (2.39) примет вид:

$$p(\xi) \approx (1 - \alpha_u) p_\phi(\xi) + \alpha_a p_a(\xi) = \frac{1 - \alpha_a}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\phi^2}\right) + \frac{\alpha_a}{\Delta\xi}. \quad (2.44)$$

Результаты численного моделирования плотности вероятности, полученной из «смеси» гауссовой флуктуационной и равномерной аномальной компонент, приведены на Рисунок 2.22.

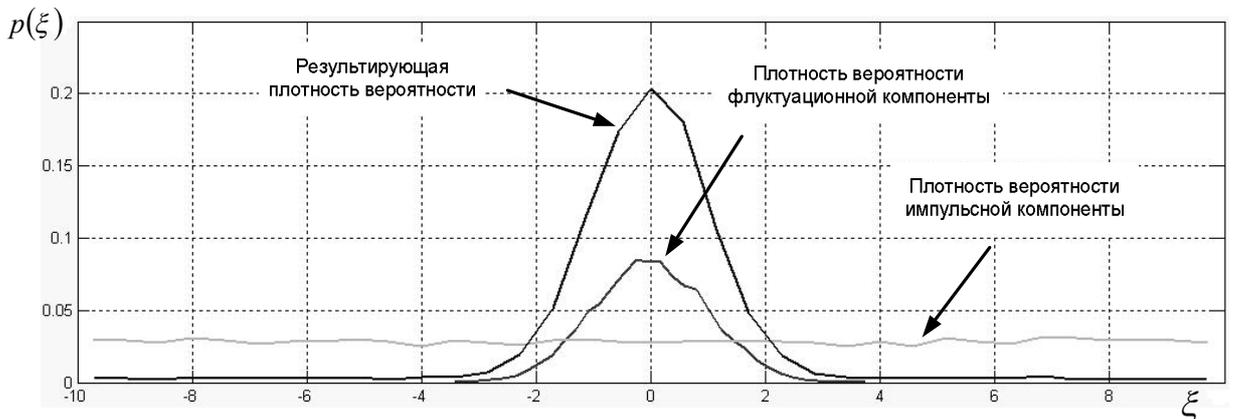


Рисунок 2.22 Результаты численного моделирования плотности вероятности, состоящей из смеси гауссовой и равномерной компонент

Для подтверждения согласованности моделей «гаусс+гаусс» (2.41), «гаусс+арксинус» (2.43) и «гаусс+равномерный» (2.44) с реальной телеметрической информацией на Рисунок 2.23 приведена экспериментально полученная гистограмма $p^*(\xi)$ с наложенными кривыми модельных аппроксимаций.

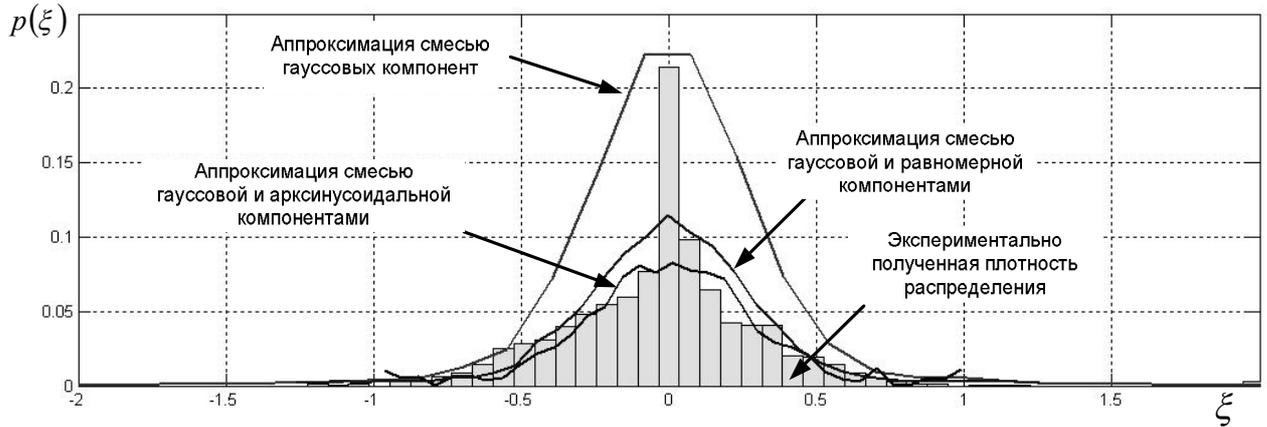


Рисунок 2.23 Аппроксимация плотности вероятности телеметрической информации, полученной с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Анализ результатов численного моделирования показывает, что модельные «смеси» распределений (2.41), (2.43) и (2.44) обладают практически идентичными энтропийными характеристиками, но, в тоже время, коэффициент эксцесса «смеси» гауссовых компонент значительно ближе к экспериментально полученным оценкам (

Таблица 2.2). Кроме того необходимо отметить, что для моделей «Гаусс + Равномерный» и «Гаусс + Арксинус» значение коэффициента эксцесса при увеличении уровня загрязнения процесса практически не изменяется и не превышает 1.1 и 1.5 соответственно, хотя практика обработки телеметрической информации показывает, что коэффициента эксцесса может достигать и больших значений (Рисунок 2.11). Поэтому в качестве модели, поступающей телеметрической информации будем рассматривать модель в виде «смеси» двух гауссовых компонент (2.41).

Таблица 2.2 Моментные и энтропийные характеристики смесей распределений в сравнении с полученными оценками

Характеристика	$p^*(\xi)$	Модель «Гаусс+ Гаусс»	Модель «Гаусс+ Арксинус»	Модель «Гаусс+ равномерный»
Среднеквадратичное отклонение (σ_ξ^*)	0.34	0.34	0.34	0.34
Коэффициент эксцесса (γ_2^*)	0.891	0.92	0.67	0.51
Коэффициент формы (χ_ξ^*)	0.507	0.49	0.52	0.53
Энтропийный коэффициент (K_ξ^*)	1.871	2.06	2.05	2.01

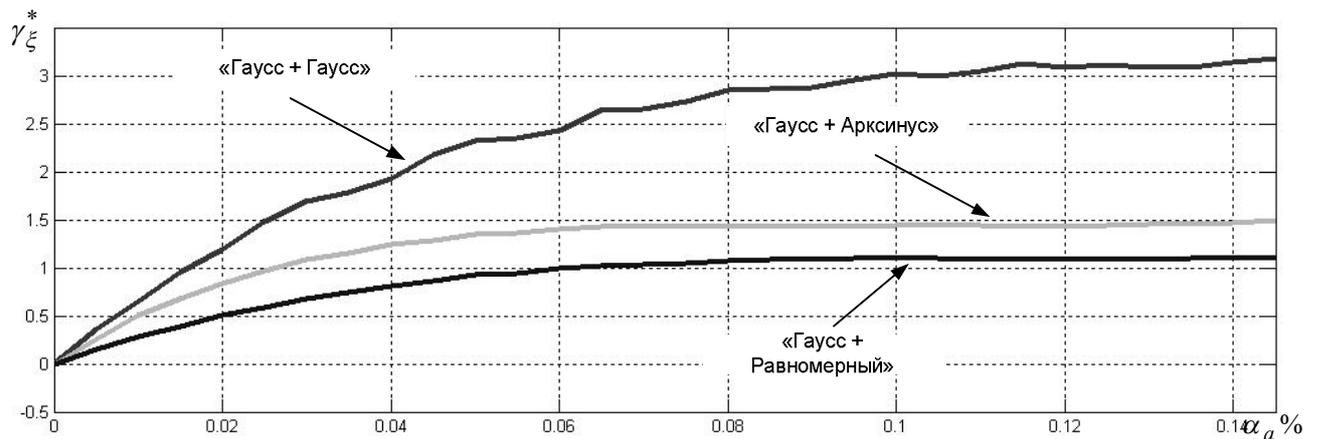


Рисунок 2.24 Графики изменения значения коэффициента эксцесса в зависимости уровня загрязнения телеметрируемого процесса

2.2.4 Адаптация модели временной структуры телеметрируемых процессов

Рассмотренные обобщенные модели распределений (2.41), (2.43) и (2.44) дают принципиальную возможность описания полученных оценок $p^*(\xi)$ в виде «смеси» распределений. Однако применение этой модели на практике с целью оценивания величины α -загрязнения весьма сложно, поскольку оценивание вероятностных характеристик компонент «смеси» возможно только по результатам численного моделирования, что связано с большим числом вычислений. Поэтому предлагается представить полученные оценки $p^*(\xi)$ аппроксимацией, разложив результирующую плотность вероятности в ряд по ортогональному базису.

Известно, что если для произвольной плотности вероятности $p(\xi)$ существует интеграл

$\int_{-\infty}^{\infty} |p(\xi)|^2 d\xi < \infty$ [47], то $p(\xi)$ может быть представлена в виде:

$$p(\xi) = p_0(\xi) \sum_{n=0}^{\infty} k_n q_n(\xi), \quad (2.45)$$

где $p_0(\xi)$ - некоторая «базовая» плотность вероятности, «близкая» к полученной экспериментальной плотности $p^*(\xi)$; $\{q_n(\xi)\}$ - система нормированных полиномов на $(-\infty; \infty)$; k_n - весовые коэффициенты, причем $k_0 = 1$ [55].

Результаты совместного исследования моментных и энтропийных характеристик показывают близость полученных оценок плотности вероятности $p^*(\xi)$ к гауссовой плотности, поэтому в качестве базовой «реперной» плотности вероятности $p_0(\xi)$ была взята плотность вероятности Гаусса [60, 98]:

$$p(\xi) = p_G(\xi) \sum_{n=1}^{\infty} k_n p_G^{(n)}(\xi), \quad (2.46)$$

где $p_G(\xi)$ - гауссова плотность вероятности, k_i - весовые коэффициенты.

Для упрощения (2.46) производные $p_G^{(i)}(\xi)$ можно представить в виде полиномов Чебышева-Эрмита, таким образом (2.46) преобразуется к виду, называемому рядом Грама-Шарлье типа А [43, 98]:

$$p(\xi) = p_G(\xi) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{b_n}{n! \sigma_\xi^n} H_n \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi} \right), \quad (2.47)$$

где $H_i(\xi)$ - одномерные полиномы Чебышева-Эрмита [5, 95]:

$$H_i(x) = (-1)^i \exp\left(\frac{x^2}{2}\right) \frac{d^i}{dx^i} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (2.48)$$

Весовые коэффициенты b_i называются квазимоментами распределения и могут быть определены следующим образом [43, 98]:

$$b_n = \sigma_\xi^n \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi) H_n \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi} \right) d\xi, \quad (2.49)$$

$$b_0 = 1, \quad b_1 = 0, \quad b_2 = 0.$$

В [60, 98] было показано, что квазимоменты представляют собой комбинации начальных или центральных моментов:

$$\begin{aligned} b_3 &= a_3 - 3a_1 a_2 + 2a_1^3 \\ b_4 &= a_4 - 3a_1 a_2^2 - 4a_1^2 a_3 + 12a_1^3 a_2 - 6a_1^4 \\ &\dots \end{aligned} \quad (2.50)$$

Число членов разложения играет роль параметра регуляризации. Если существуют моменты любых порядков, то принципиально возможно неограниченное увеличение числа членов ряда, которое должно производиться согласованно с ростом объема выборки [55].

В практических целях всегда приходится брать конечное число членов ряда (2.47) и пренебрегать остальными, причем число слагаемых зависит от требуемой точности представления $p(\xi)$. Поэтому становится важным вопрос, когда с помощью конечного числа членов ряда можно получить удовлетворительную аппроксимацию $p^*(\xi)$. Таким образом, ряд (2.47) преобразуется к виду, называемому одномерным рядом Эджворта [98]:

$$p(\xi) \approx p_r(\xi) \left[1 + \sum_{i=3}^N \frac{b_i}{n! \sigma^i} H_i \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma} \right) \right]. \quad (2.51)$$

Первые два члена ряда являются характеристиками асимметрии γ_1 и эксцесса γ_2 :

$$\gamma_1 = \frac{b_3}{\sigma^3} = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad \gamma_2 = \frac{b_4}{\sigma^4} = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (2.52)$$

а поскольку точность оценивания моментов высоких порядков заметно падает (2.12) [43, 69, 98], то достаточно ограничиться первыми двумя членами ряда. С учетом (2.52), получаем:

$$p(\xi) \approx p_r(\xi) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} H_3 \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi} \right) + \frac{\gamma_2}{4!} H_4 \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi} \right) \right], \quad (2.53)$$

или через производные $p_r(\xi)$, с учетом (2.49) [98]:

$$p(\xi) \approx \frac{1}{\sigma} \left[p_r(\xi) - \frac{\gamma_1}{3!} p_r^{(3)} \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi} \right) + \frac{\gamma_2}{4!} p_r^{(4)} \left(\frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi} \right) \right]. \quad (2.54)$$

Модели (2.53) и (2.54) тождественны и при небольших отклонениях от гауссова распределения (γ_1 и γ_2 малы) дают хорошее приближение к $p(\xi)$. При возрастании коэффициентов асимметрии и эксцесса точность моделей начинает заметно падать, приводя к появлению эффекта «отрицательных вероятностей» на хвостах распределения (Рисунок 2.25). Причем, как показывают результаты численного моделирования, модели (2.53), (2.54) более чувствительны к увеличению асимметрии γ_1 , поэтому необходимо ввести ограничение:

$$P_c(p(\xi) = p(\xi | |\gamma_1^*| < 1, |\gamma_2^*| < 1)) \in P.$$

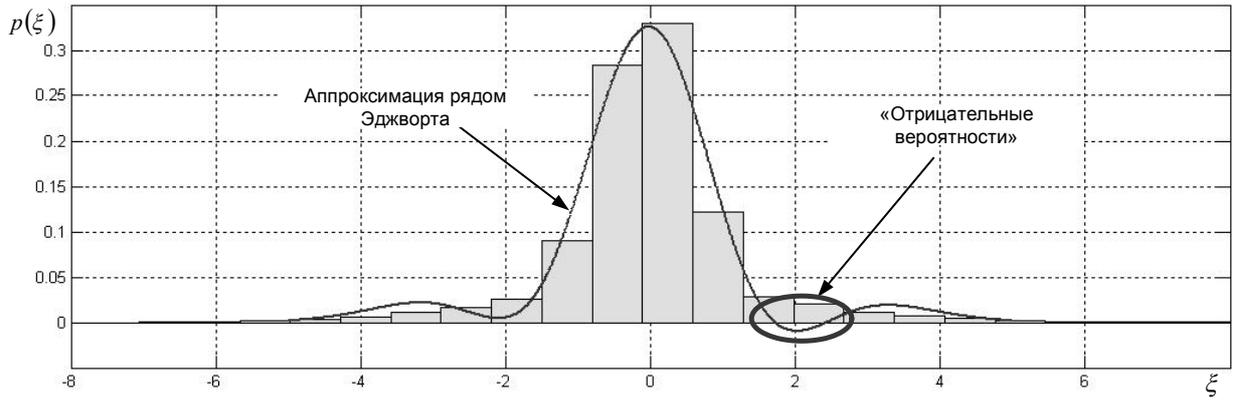


Рисунок 2.25 Аппроксимация плотности вероятности рядом Эдворта

Использование моделей (2.53), (2.54) позволяет оценить отклонение результирующей плотности вероятности $p^*(\xi)$ телеметрируемого процесса от гауссовой плотности, тем самым оценивая уровень его загрязнения.

Совместное использование аналитических зависимостей (2.6) и (2.54) позволяет, при известных спектрально-корреляционных свойствах, получить оценки характеристик σ_{ξ}^{2*} , γ_1^* , γ_2^* , путем подсчета числа пересечений траектории телеметрируемого процесса трех уровней:

$$\begin{cases} n^+(H_1, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\xi}^2}} \sqrt{-r''(0)} \exp\left(-\frac{H_1^2}{2\sigma_{\xi}^2}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} H_3\left(\frac{H_1}{\sigma_{\xi}}\right) + \frac{\gamma_2}{4!} H_4\left(\frac{H_1}{\sigma_{\xi}}\right)\right] \\ n^+(H_2, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\xi}^2}} \sqrt{-r''(0)} \exp\left(-\frac{H_2^2}{2\sigma_{\xi}^2}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} H_3\left(\frac{H_2}{\sigma_{\xi}}\right) + \frac{\gamma_2}{4!} H_4\left(\frac{H_2}{\sigma_{\xi}}\right)\right] \\ n^+(H_3, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\xi}^2}} \sqrt{-r''(0)} \exp\left(-\frac{H_3^2}{2\sigma_{\xi}^2}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} H_3\left(\frac{H_3}{\sigma_{\xi}}\right) + \frac{\gamma_2}{4!} H_4\left(\frac{H_3}{\sigma_{\xi}}\right)\right] \end{cases} \quad (2.55)$$

Для упрощения решения предложенной системы уравнений (2.55) значения ξ_1, ξ_2, ξ_3 были выбраны следующим образом: $\xi_1 = 0, \xi_2 = -\xi_3 = H$ и, учитывая $H_3(H) = -H_3(-H)$ и $H_4(H) = H_4(-H)$, получаем:

$$\begin{cases} n^+(0, 1) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-r''(0)} \left[1 + \frac{\gamma_2^*}{8}\right] \\ n^+(H, 1) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-r''(0)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{\xi}^{2*}}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1^*}{3!} H_3\left(\frac{H}{\sigma_{\xi}^*}\right) + \frac{\gamma_2^*}{4!} H_4\left(\frac{H}{\sigma_{\xi}^*}\right)\right] \\ n^+(-H, 1) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-r''(0)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{\xi}^{2*}}\right) \left[1 - \frac{\gamma_1^*}{3!} H_3\left(\frac{H}{\sigma_{\xi}^*}\right) + \frac{\gamma_2^*}{4!} H_4\left(\frac{H}{\sigma_{\xi}^*}\right)\right] \end{cases} \quad (2.56)$$

Для малых значений коэффициентов асимметрии γ_1^* и эксцесса γ_2^* результирующей плотности вероятности можно воспользоваться приближенным решением:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\xi}^{2*} &\approx \frac{4H^2}{\ln(n^+(0,1)/n^+(H,1)) + \ln(n^+(0,1)/n^+(-H,1))} \\ \gamma_1^* &= \frac{12\pi}{H_3(H/\sigma_{\xi})\sqrt{-r'''(0)}} \left[\frac{n^+(H, T_a)}{\exp(-H^2/2\sigma_{\xi}^2)} - \frac{n^+(0,1)}{3} \left(1 - H_4\left(\frac{H}{\sigma_{\xi}}\right) \right) \right] \\ \gamma_2^* &= 8 \left(\frac{2\pi n^+(0,1)}{T_a \sqrt{-r'''(0)}} - 1 \right) \end{aligned} \right. \quad (2.57)$$

Результаты численного моделирования показывают, что в зависимости от выбора значения H оценка плотности вероятности $p^*(\xi)$ будет изменяться. Очевидно, что значения H , расположенные вне области, ограниченной экстремальными значениями телеметрируемого процесса $\xi(t)$, не могут быть использованы, т.к. не несут информации о его вероятностных свойствах. При небольших значениях H аппроксимация моделью (2.53) дает хорошее приближение к «оригинальной» плотности (Рисунок 2.26).

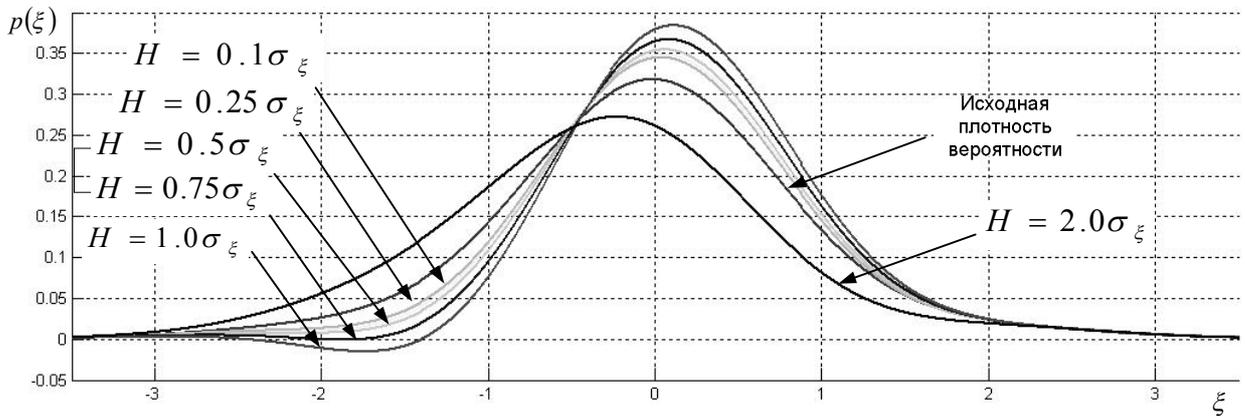


Рисунок 2.26 Изменение аппроксимации плотности вероятности рядом Эджворта при значениях $H < 2.5\sigma_{\xi}$.

Если же значения $H > 2.5\sigma_{\xi}$ велики, то точность получаемой аппроксимации начинает падать (Рисунок 2.27), т.к. точность оценивания плотности вероятности унимодальных распределений заметно падает при приближении к «хвостам» распределения по сравнению с центральной частью. Поэтому значение H желательно выбирать вблизи математического ожидания реализации [101, 107].

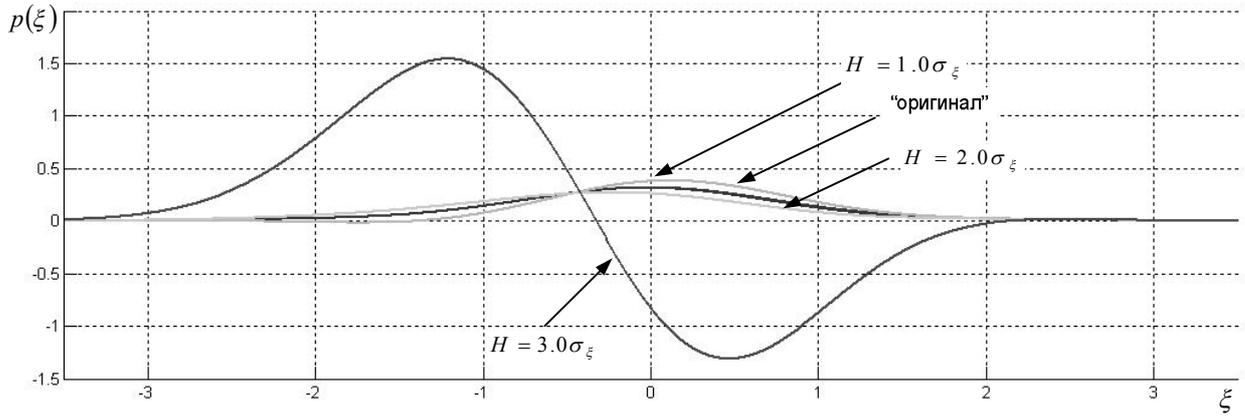


Рисунок 2.27 Изменение аппроксимации плотности вероятности рядом Эджворта при значениях $H > 2.5\sigma_\xi$

При фиксированном типе спектра и полученной оценке дисперсии σ_ξ^{2*} телеметрируемого процесса можно выбрать значение H таким образом, чтобы $H_4(H/\sigma_\xi^*)=0$ ($H/\sigma_\xi = 0.742$ или $H/\sigma_\xi = 2.335$) (Рисунок 2.28). Тогда оценки коэффициентов γ_1^* и γ_2^* могут быть получены из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \gamma_1^* &= \frac{15.74n^+(0.74\sigma_\xi, 1) - 6.91n^+(0, 1)}{\sqrt{-r''(0)}} \\ \gamma_1^* &= \frac{2.17n^+(0, 1) - 0.42n^+(2.34\sigma_\xi, 1)}{\sqrt{-r''(0)}} \\ \gamma_2^* &= 8 \left(\frac{6.28n^+(0, 1)}{\sqrt{-r''(0)}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.58)$$

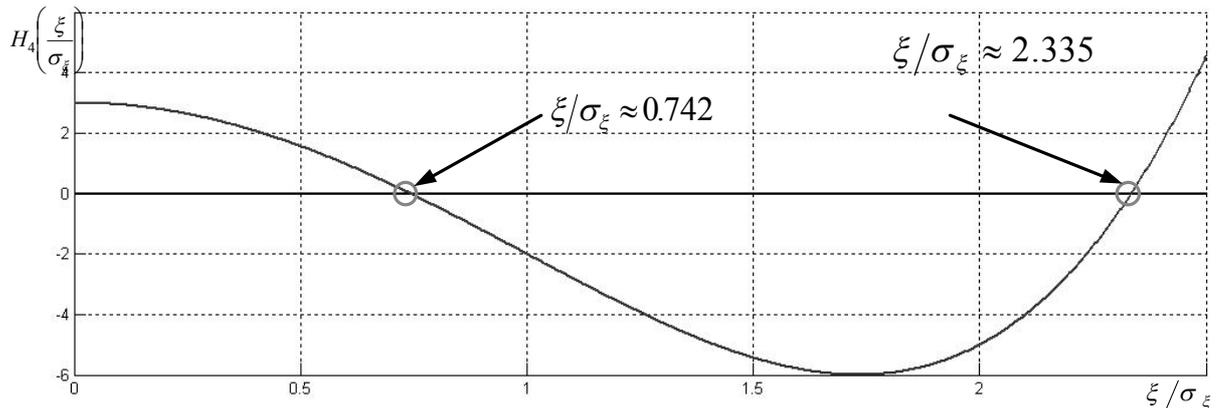


Рисунок 2.28 Корни полинома Эрмита четвертой степени

Полученные соотношения (2.57) и (2.58) позволяют получать несмещенные оценки моментов одномерных распределений и тесно связаны с оцениванием спектрально-корреляционных характеристик. Поэтому с целью получения значений $\sqrt{-r''(0)}$ необходимо оценить телеметрическую информацию на уровне спектрально-корреляционных характеристик.

2.3 Разработка и настройка модели телеметрируемых процессов на уровне двумерных распределений

2.3.1 Разработка модели телеметрируемых процессов в частотной области

Двумерная плотность вероятностей $p(\xi_1, t_1; \xi_2, t_2)$ определяет вероятность совместной реализации значений случайных величин $\xi(t_1)$ и $\xi(t_2)$ в произвольные моменты времени t_1 и t_2 и описывает двумерную случайную величину $\{\xi(t_i), \xi(t_j)\}$ в виде функции вероятности реализации случайной величины $\xi(t_i)$ на бесконечно малом интервале $d\xi_i$ в окрестностях точки ξ_i в момент времени t_i при условии, что в момент времени t_j значение $\xi(t_j)$ реализовано в бесконечно малом интервале $d\xi_j$ в окрестностях ξ_j [17].

Двумерную модель «смеси» плотностей вероятности можно представить как [115]:

$$p(\xi_1, \xi_2; t_1, t_2) = \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i(\xi_1, \xi_2; \sigma_i^2, r_i(\tau)), \quad (2.59)$$

где σ_i - среднеквадратическое отклонение, $r_i(\tau)$ - нормированная корреляционная функция рассматриваемой компоненты. Весовой коэффициент $0 \leq \alpha_i \leq 1$ играет роль вероятности появления компоненты.

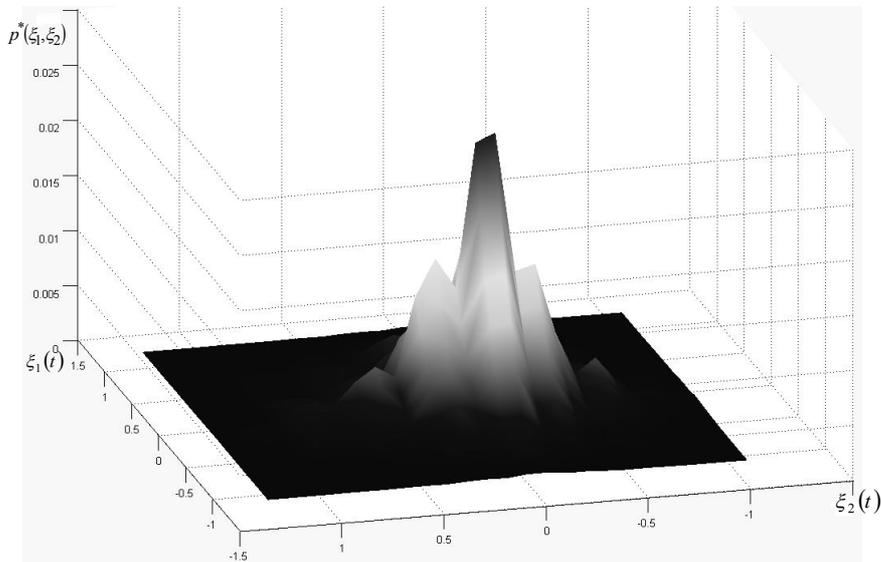


Рисунок 2.29 Оценка двумерной плотности вероятности параметра Осевой Перегрузки, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2» во время работы двигательной установки 3-й ступени (560-580 сек.)

На Рисунок 2.29 представлены характерные результаты оценивания двумерной плотности вероятности $p^*(\xi_1, \xi_2 | \sigma, r(\tau))$. При оценивании функций $p^*(\xi_1, \xi_2 | \sigma, r(\tau))$ значения переменных $\xi_1(t) = \xi(t_1)$ и $\xi_2(t) = \xi(t_2)$ брались из условия некоррелированности выборок. Форма полученных двумерных распределений имеют явно выраженный негауссовский характер.

По аналогии с одномерной вероятностной моделью (2.36) в качестве обобщенной модели двумерного распределения для значений $\xi_1(t) = \xi(t_1)$ и $\xi_2(t) = \xi(t_2)$ телеметрируемых процессов $\xi(t)$ ракеты-носителя «Союз-2» было использовано представление негауссовой двумерной плотности вероятностей в виде двухкомпонентной смеси двумерной плотности вероятности флуктуационной $p_\phi(\xi_1, \xi_2 | \sigma_\phi, \rho_\phi(\tau))$ и аномальной компонент $p_a(\xi_1, \xi_2 | \sigma_a, \rho_a(\tau))$ [32]:

$$p(\xi_1, \xi_2; t_1, t_2) \approx (1 - \alpha_a) p_\phi(\xi_1, \xi_2 | \sigma_\phi, \rho_\phi(\tau)) + \alpha_a p_a(\xi_1, \xi_2 | \sigma_a, \rho_a(\tau)) \quad (2.60)$$

Модель двумерной плотности вероятности (2.60) является более обобщенным представлением, чем модель (2.39), и из нее может быть получено выражение для одномерного распределения [115]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(\xi_1, \xi_2; t_1, t_2) d\xi_2 \approx (1 - \alpha_u) p_\phi(\xi) + \alpha_a p_a(\xi) \quad (2.61)$$

Учитывая условия формирования телеметрической информации ракеты-носителя «Союз-2», моделью для результирующей двумерной плотности вероятности $p(\xi_1, \xi_2; t_1, t_2)$ является «смесь» двумерных гауссовых компонент плотностей вероятности.

Второй центральный момент совместной плотности распределения в фиксированный момент времени t_1 и t_2 $p(\xi_1, t_1; \xi_2, t_2)$ называют корреляционной или автокорреляционной функцией случайного процесса [1, 8, 43]:

$$R_\xi(t_1, t_2) = M[(\xi(t_1) - m_\xi(t_1))(\xi(t_2) - m_\xi(t_2))]. \quad (2.62)$$

Корреляционная функция представляет собой статистически усредненное произведение значений случайного процесса $\xi(t)$ в моменты времени t_1 и t_2 и служит мерой корреляции между отсчетами [19].

Второй момент времени t_2 обычно задают величиной сдвига τ относительно первого момента, который при этом задан в виде координатной переменной [14, 48]:

$$R_\xi(t, t + \tau) = M[(\xi(t) - m_\xi(t))(\xi(t + \tau) - m_\xi(t + \tau))]. \quad (2.63)$$

Под нормированной корреляционной функцией понимают:

$$r(t_1, t_2) = \frac{R_\xi(t_1, t_2)}{\sqrt{R_\xi(t_1, t_1)R_\xi(t_2, t_2)}}. \quad (2.64)$$

Из оценок корреляционной функции $r_\xi^*(\tau)$ (Рисунок 2.30), полученных во время устоявшихся работы двигательных установок и агрегатов ракеты-носителя, видно, что она представляет собой некоторую осциллирующую и достаточно быстро убывающую функцию, что подтверждает предположение о стационарности телеметрируемого процесса на этих участках.

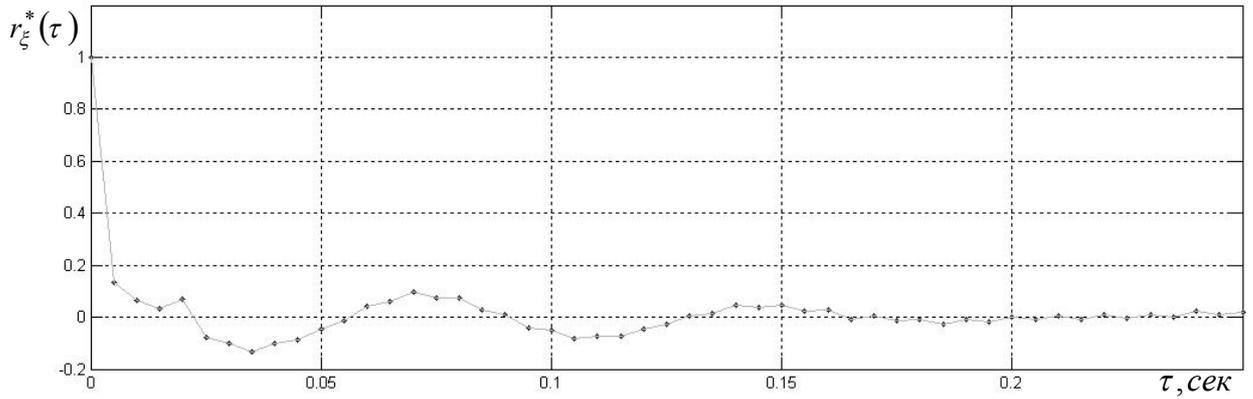


Рисунок 2.30 Характерный вид оценки нормированной корреляционной функции телеметрируемого параметра ракеты-носителя «Союз-2»

Согласно известной теореме Винера-Хинчина корреляционная функция представляет собой обратное преобразование Фурье его спектральной плотности [5, 8, 48, 98]. Характерный вид оценки спектральной плотности телеметрируемого процесса $S_{\xi}^*(f)$, во время устоявшейся работы двигательных установок и агрегатов ракеты-носителя, (Рисунок 2.31) показывают, что телеметрируемый процесс $\xi(t)$ может быть представлен в виде «смеси» широкополосной и узкополосной, близкой по форме к «колокообразной», компонент, что подтверждает гипотезу о гауссовом характере аномальной компоненты. Таким образом, оценки корреляционной функции $r_{\xi}^*(\tau)$ и спектральной плотности $S_{\xi}^*(f)$ с учетом (2.60) могут быть представлены в виде модели с α -загрязнением:

$$S_{\xi}^*(f) \approx (1 - \alpha_a) S_{\phi}(f) + \alpha_a S_a(f), \quad (2.65)$$

$$r_{\xi}^*(\tau) \approx (1 - \alpha_a) r_{\phi}(\tau) + \alpha_a r_a(\tau), \quad (2.66)$$

где α_a - величина загрязнения $\xi(t)$.

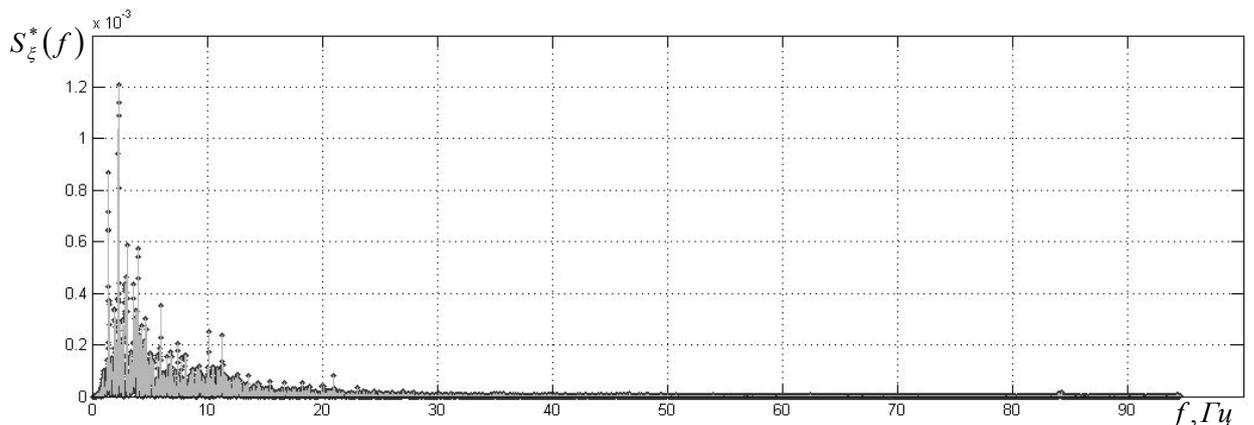


Рисунок 2.31 Характерный вид оценки нормированной спектральной плотности телеметрируемого параметра ракеты-носителя «Союз-2»

Изменение характера спектральной плотности на участке работы двигательной установки

третьей ступени может быть объяснено тем, что величина α -загрязнения $\xi(t)$ не является постоянной $\alpha = \alpha(t) \neq const$ и зависит от режима работы ракеты-носителя.

2.3.2 Исследование взаимосвязи характеристик модели телеметрируемых процессов в частотной области с характеристиками «превышения уровня»

Алгоритмы, реализующие оценивание корреляционных функций $R_\xi^*(\tau)$ и спектральных плотностей $S_\xi^*(f)$, требуют проведения достаточно большого объема вычислений. Поэтому в условиях реального масштаба времени целесообразно оценивать не сами функции $S_\xi^*(f)$ или $R_\xi^*(\tau)$, а их некоторые обобщенные характеристики, достаточно полно описывающие основные спектрально корреляционные свойства телеметрируемых процессов. При этом алгоритмы их оценивания значительно проще алгоритмов оценивания самих функций.

В качестве обобщенных спектрально корреляционных характеристик в работе рассматриваются: центральная частота f_0 , эффективная полоса частот Δf_9 , интервал корреляции τ_k и коэффициент формы спектра \aleph . Для их оценивания были использованы нормированные спектральные начальные и центральные моменты [22, 93, 106].

Основными характеристиками спектральной плотности $S_\xi(f)$ являются нормированные начальные λ_n и центральные Λ_n моменты, которые удобно использовать в качестве простых числовых характеристик спектральной плотности $S_\xi(f)$ [53,54, 113]:

$$\Lambda_n[S_\xi(f)] = \frac{\int_0^\infty f^n S_\xi(f) df}{\int_0^\infty S_\xi(f) df}, \quad (2.67)$$

$$\lambda_n[S_\xi(f)] = \frac{\int_0^\infty (f - \lambda_1[S_\xi(f)])^n S_\xi(f) df}{\int_0^\infty S_\xi(f) df}. \quad (2.68)$$

Для нормированных начальных λ_n и центральных моментов Λ_n также будут выполняться все соотношения, связывающие начальные и центральные моменты функции во временной области:

$$\Lambda_n[S_\xi(f)] = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \lambda_{n-i}[S_\xi(f)] \Lambda_i^n[S_\xi(f)]. \quad (2.69)$$

Таким образом, центральная частота f_0 телеметрируемого процесса $\xi(t)$ (Рисунок 2.32) будет характеризоваться первым нормированным начальным спектральным моментом

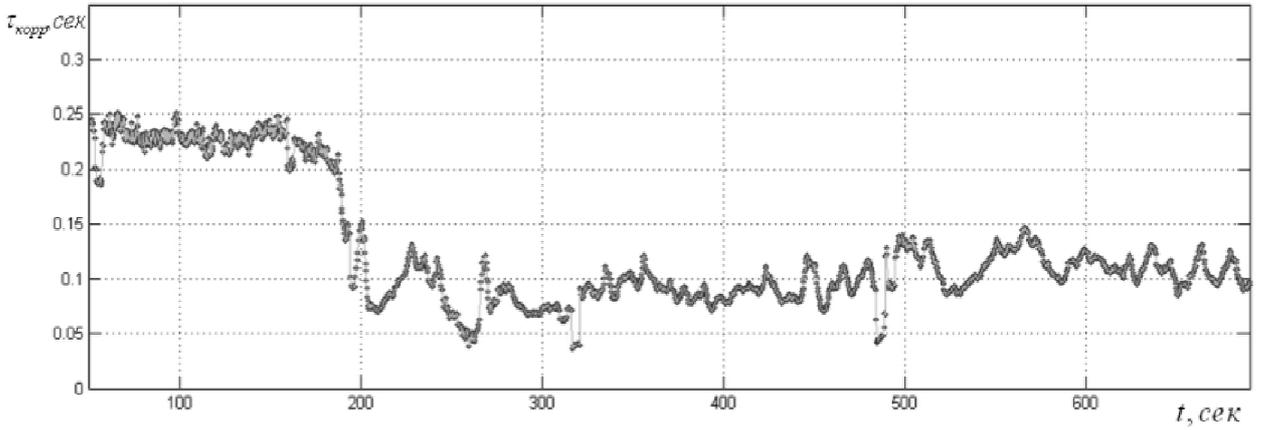


Рисунок 2.34 График изменения оценки интервала корреляции для параметра Осовой Перегрузки, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

Таким образом, основные спектрально-корреляционные свойства телеметрируемых процессов могут быть описаны с использованием нормированных спектральных моментов, что позволяет унифицировать алгоритмы оценивания одномерных и двумерных характеристик.

Проведенные исследования обобщенных спектрально-корреляционных характеристик (см. п. 2.3.2) показали, что полученные оценки τ_K^* длительности интервалов корреляции телеметрируемых процессов ракеты-носителя «Союз-2» невелики и составляют:

$\tau_K^* \approx 0.5\tau_{\max} = \frac{1}{2(F_0/4+1)}$. Поэтому в разложении нормированной корреляционной функции $r_\xi(\tau)$ телеметрируемого процесса $\xi(t)$ в ряд Тейлора можно ограничиться значениями второй $r_\xi^{(2)}(0)$ и четвертой производных $r_\xi^{(4)}(0)$ [16]:

$$r_\xi(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r_\xi^{(2n)}(0)}{2n!} \tau^{2n} \approx r_\xi(0) + \frac{1}{2} r_\xi^{(2)}(0) \tau^2 + \frac{1}{24} r_\xi^{(4)}(0) \tau^4 + \Delta(\tau^6), \quad (2.72)$$

где $\Delta(\tau)$ - остаточный член ряда. Тогда, учитывая взаимосвязь начальных и центральных спектральных моментов $\lambda_{2i}[S_\xi(f)] = (-1)^i d^{2i} r(\tau) / d\tau^{2i} |_{\tau=0}$, выражение (2.72) можно переписать в виде:

$$r_\xi(\tau) = 1 - \frac{1}{2} \Lambda_2[S_\xi(f)] \tau^2 + \frac{1}{24} \Lambda_4[S_\xi(f)] \tau^4 + \Delta(\tau^6) \quad (2.73)$$

Среднее число положительных пересечений $N^+(0,1)$ траектории телеметрируемого процесса «нулевого» уровня $\xi(t)$ с плотностью вероятности $p(\xi)$, аппроксимируемой рядом Эджворта (2.53), составляет, учитывая (2.6) и (2.67):

$$N^+(0,1) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 S(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f) df} \right]^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma_2}{8} \right). \quad (2.74)$$

При линейных преобразованиях процессов, близких к гауссовым, их свойства не меняются, следовательно, если рассматривать i -ю производную $\xi^{(i)}(t)$ телеметрируемого процесса $\xi(t)$ и учитывать, что ее спектральная плотность и нормированная корреляционная функция:

$$r_{(i)}(\tau) = (-1)^i r_{\xi}^{(2i)}(\tau) \text{ и } S_{(i)}(\omega) = f^{2i} S_{\xi}(\omega),$$

то можно записать [113]:

$$N_{(i)}^+(0,1) = \frac{1}{\sigma_{\xi}} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 S_{(i)}(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} S_{(i)}(f) df} \right]^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma_2}{8} \right). \quad (2.75)$$

Следовательно, нормированные спектральные моменты непосредственно связаны с характеристиками превышения уровня:

$$\Lambda_{2n}[S_{\xi}(f)] = (2\pi)^{2n} \prod_{i=0}^{n-1} (N_{(i)}^+(0,1))^2 \left(1 + \frac{\gamma_2}{8} \right). \quad (2.76)$$

Из подстановки (2.76) в (2.72) следует, что нормированная корреляционная функция полностью определяется количеством положительных пересечений $N^+(0,1)$, числом максимумов $N_{\max}(1) = N_{(i)}^+(0,1)$ траектории телеметрируемого процесса и формой его плотности распределения:

$$r_{\xi}(\tau) \approx 1 - \left(1 + \frac{\gamma_2}{8} \right) \left(\frac{1}{2} (2\pi N^+(0,1))^2 \tau^2 + \frac{1}{24} (2\pi)^4 (N^+(0,1) N_{\max}(1))^2 \tau^4 \right). \quad (2.77)$$

2.3.3 Адаптация модели телеметрируемых процессов в частотной области

В условиях реального масштаба времени получение оценок $r_{\xi}^*(\tau)$ и $S_{\xi}^*(f)$ в явном виде достаточно сложно и ресурсоемко. Поэтому для оперативного получения оценок эффективной ширины спектра Δf_{σ}^* и коэффициента его формы \aleph^* предлагается вместо оценивания $r_{\xi}^*(\tau)$ и $S_{\xi}^*(f)$ использовать типовые нормированные корреляционные функции $r(\tau)$ и соответствующие им спектральные плотности $S(f)$.

Перечень корреляционных функций и спектральных плотностей, часто встречающихся в промышленных системах управления и мониторинга, довольно велик [16, 35, 100, 106]:

Таблица 2.3 Нормированные однопараметрические корреляционные функции и спектральные плотности

№	$r(\tau)$	$S(\omega)$	$-r''(0)$	$\Delta\omega_3$	\aleph	ν^2
1	$(1 + \alpha \tau)\exp(-\alpha \tau)$	$\frac{4\alpha^3}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$	α^2	$\frac{\pi\alpha}{2}$	0.637	-
2	$\exp(-a\tau^2)$	$\sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(-\frac{\omega^2}{4a}\right)$	2α	$2\sqrt{\pi\alpha}$	0.399	0.667
3	$\frac{\sin(\alpha\tau/2)}{\alpha\tau/2}$	$\begin{cases} 2\pi/\alpha, & \omega \leq \alpha/2 \\ 0, & \omega > \alpha/2 \end{cases}$	$\frac{\Delta\omega^2}{12}$	α	0.289	0.445
4	$\left(1 + \alpha \tau + \frac{1}{3}(\alpha\tau)^2\right) \exp(-\alpha \tau)$	$\frac{16a^5}{3(a^2 + \omega^2)^3}$	$\frac{\alpha^2}{3}$	$\frac{3\pi\alpha}{8}$	0.869	0.888
5	$\left(1 + \alpha \tau + \frac{2}{5}(\alpha\tau)^2 + \frac{1}{15}(\alpha \tau)^3\right) \exp(-\alpha \tau)$	$\frac{32a^7}{5(a^2 + \omega^2)^4}$	$\frac{\alpha^2}{5}$	$\frac{5\pi\alpha}{16}$	0.456	0.800
6	$\frac{1}{2 + (\alpha\tau)^2}$	$\frac{\pi}{\alpha} \exp\left(-\frac{ \omega }{\alpha}\right)$	$2\alpha^2$	2α	0.707	0.833
7	$\operatorname{sech}(\alpha\tau)$	$\frac{\pi}{\alpha} \operatorname{sech}\left(\frac{\pi\omega}{2\alpha}\right)$	α^2	2α	0.5	0.800

Анализ результатов исследования формы полученных оценок $S_{\xi}^*(f)$ показал, что наиболее близкими к ним являются спектры Гаусса, Лоренца и равномерный. Эти модели являются хорошо изученными и позволяют просто получать обобщенные спектрально-корреляционные характеристики телеметрируемых процессов. Разделение этих моделей (Таблица 2.3) может осуществляться с использованием коэффициента формы спектра \aleph :

$$\aleph = \frac{\sqrt{\lambda_2[S_{\xi}(f)]}}{\Delta f_3} = \frac{1}{\Delta f_3} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (f - f_0)^2 S(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f) df} \right) \quad (2.78)$$

или метрики ν^2 :

$$\nu^2 = 1 - \left(n^+(0, T_a) / n_{(1)}(0, T_a) \right)^2 = 1 - \left(n^+(0, T_a) / n_{\max}(T_a) \right)^2, \quad (2.79)$$

определяемой корреляционной зависимостью между $\xi(t)$ и $\xi'(t)$ в совпадающие моменты времени. Это позволяет проводить оценивание обобщенных спектрально-корреляционных ха-

рактических, используя характеристики превышения уровня, и, наоборот, оценивать характеристики превышения, используя спектрально-корреляционные характеристики.

Обобщенная характеристика v^2 содержит полную информацию о законе распределения высот локальных максимумов (Рисунок 2.35) и применяется в задачах экстраполяции и прогнозирования высоты супремумов.

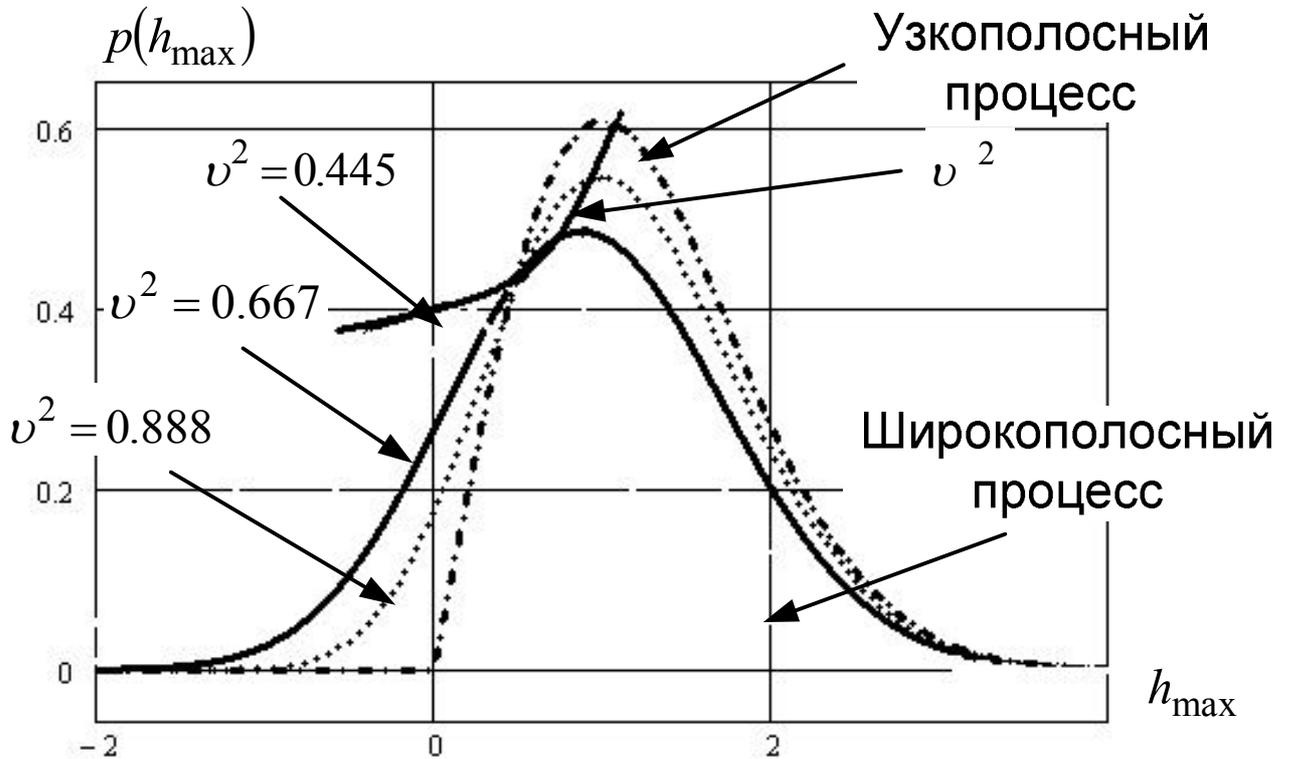


Рисунок 2.35 Плотность вероятности высоты локальных максимумов при различных значениях характеристики v^2

Телеметрируемые процессы, обладающие типом спектра, близкого к лоренцевскому, не являются дважды дифференцируемыми, и использование метрики v^2 их распознавания является необоснованным. Поэтому вместо лоренцевского типа спектра был использован «четвертый тип», близкий к нему по значению коэффициента формы спектра \aleph . (Рисунок 2.36, Рисунок 2.37).

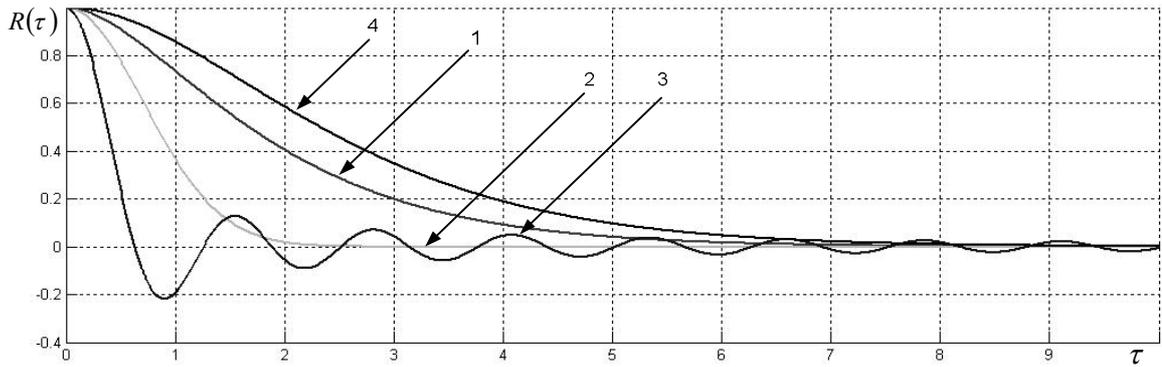


Рисунок 2.36 Графическое представление основных типов однопараметрических нормированных корреляционных функций

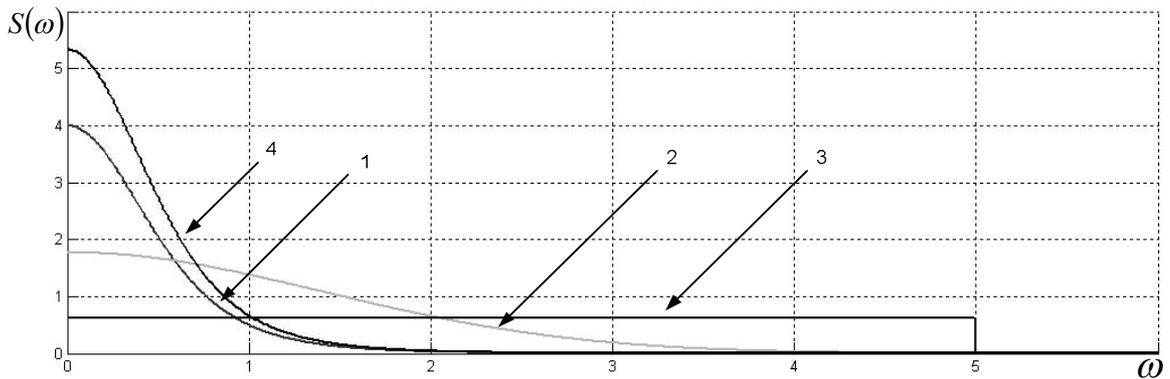


Рисунок 2.37 Графическое представление основных типов однопараметрических нормированных спектральных плотностей

Анализ результатов исследования зависимости функций плотности вероятности высот локальных максимумов от характеристики ν^2 позволил сделать вывод, что зависимость изменения ν^2 этих трех моделей (Рисунок 2.35) близка к линейной (отклонение не более 5%), а сами значения наиболее равномерно перекрывают диапазон от узкополосного гармонического $\nu^2 = 0$ до широкополосного процессов $\nu^2 = 1$ (Рисунок 2.34). Таким образом, разбив область определения ν^2 на три интервала, каждый из которых будет соответствовать определенному типу спектра:

- $\nu^2 \in [0; 0.556]$ третий тип;
- $\nu^2 \in (0.566; 0.755]$ второй тип;
- $\nu^2 \in (0.755; 1]$ четвертый тип;

«попадание» ν^2 в один из этих интервалов определит тип спектральной плотности телеметрируемого процесса (Рисунок 2.38 Рисунок 2.39).

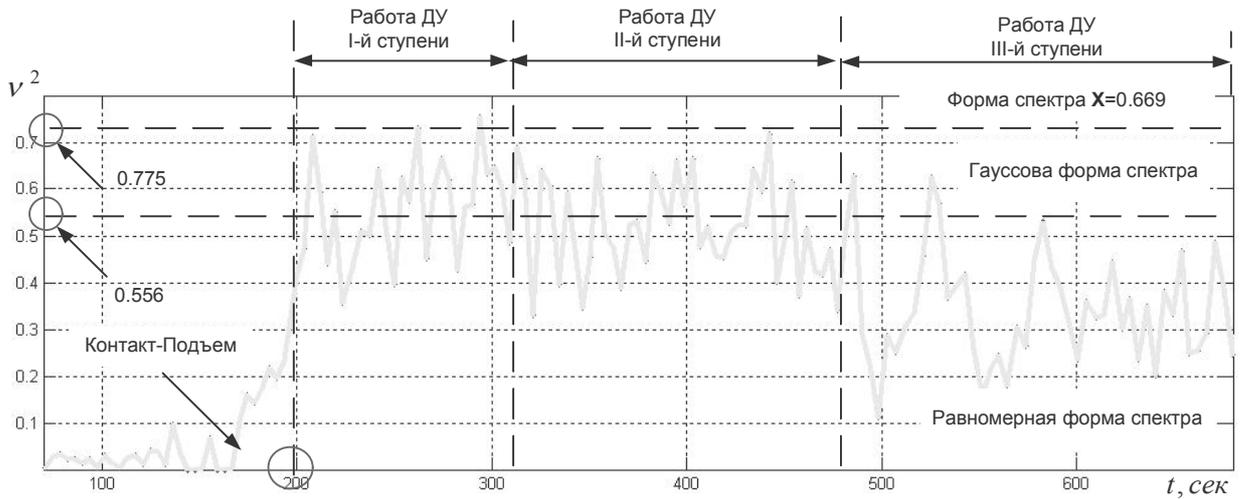


Рисунок 2.38 График изменения оценки характеристики v^2 параметра Осевой Перегрузки, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

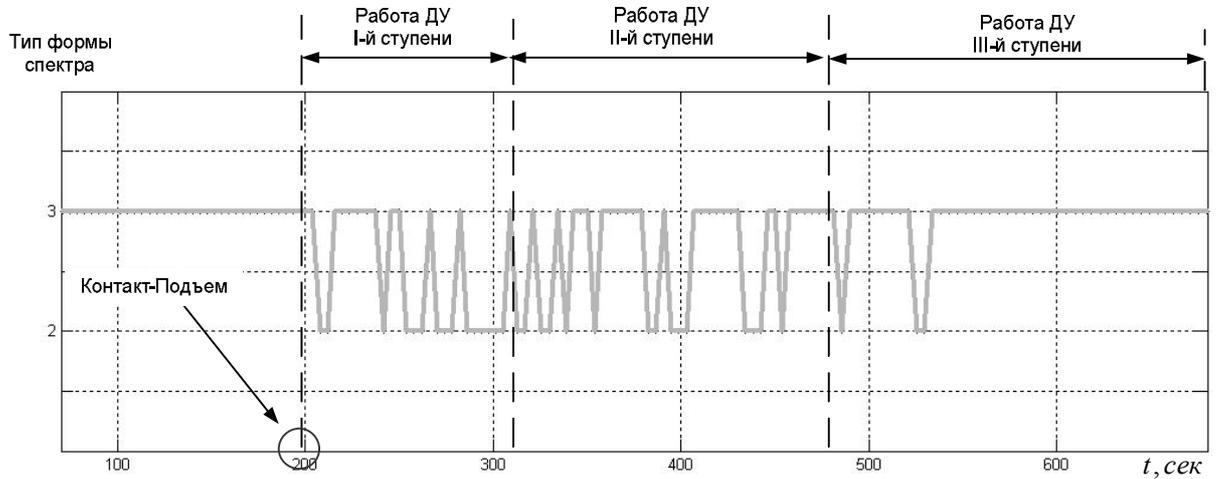


Рисунок 2.39 График изменения типа корреляционной функции и спектральной плотности параметра Осевой Перегрузки, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2»

При известном типе корреляционной функции и спектральной плотности для получения эффективной ширины спектра $\Delta f_{\text{э}}$ необходимо получить значение параметра α , подставляя в (2.6) соответствующие значения $-r''(0)$, и, решая полученное уравнение относительно α , получаем

- для второго типа:

$$\alpha = \left(\frac{N^+(0,1)}{0.225(1 + \gamma_2/8)} \right)^2; \quad (2.80)$$

- для третьего типа:

$$\alpha = \frac{N^+(0,1)}{21.766(1 + \gamma_2/8)}; \quad (2.81)$$

- для четвертого типа:

$$\alpha = \frac{N^+(0,1)}{0.092(1 + \gamma_2/8)}. \quad (2.82)$$

Воспользовавшись полученными соотношениями (2.80)-(2.82), получаем Δf_3 :

- для второго типа:

$$2\pi\Delta f_3 = 15.755 \frac{N^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}; \quad (2.83)$$

- для третьего типа:

$$2\pi\Delta f_3 = 0.046 \frac{N^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}; \quad (2.84)$$

- для четвертого типа:

$$2\pi\Delta f_3 = 12.805 \frac{N^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}. \quad (2.85)$$

Полученная оценка эффективной полосы частот Δf_3 (2.83)-(2.85) зависит от выбранных типов корреляционных функций $r(\tau)$ и оптимальности разбиения области определения $v^2 \in [0;1]$ и является достаточно грубой. Однако, в условиях существенной неопределенности исходной телеметрической информации, оценка (2.83)-(2.85) может эффективно применяться для решения задач оперативного анализа.

Введенная метрика v^2 позволяет оперативно разделять телеметрируемые процессы по форме их спектров и оценивать их обобщенные спектрально-корреляционные характеристики. Совместное использование соотношений (2.57), (2.58) и типовых спектральных плотностей дает возможность проводить совместное оценивание моментов одномерных распределений и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и позволяет разработать алгоритмы оперативной подготовки телеметрической информации.

Выводы по главе 2

1. Перспективным подходом к анализу результатов первичной обработки телеметрической информации является использование статистики характеристик «превышения уровня». Эти характеристики более полно отражают особенности обрабатываемой выборки, нежели вероятностные и спектрально-корреляционные характеристики. Это особенно важно для систем реального времени, поскольку предлагаемый подход позволяет оперативно оценивать моментные и спектрально-корреляционные характеристики телеметрируемых процессов. В этой связи использование математического аппарата теории выбросов существенно расширяет возможности проведения оперативного автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств.

2. Проведенные исследования характеристик моментов одномерных распределений

телеметрируемых процессов на входе комплексов автоматизированного анализа позволили выделить достаточно протяженные по времени участки (100-200 сек) устоявшейся работы двигательных установок и агрегатов ракеты-носителя «Союз-2», на которых телеметрическая информация может рассматриваться как стационарный случайный процесс.

3. Использование статистики «превышения уровня» позволило получить несмещенные и более сглаженные оценки по сравнению с методом гистограмм плотности вероятности телеметрируемых процессов. Оценки, полученные во время устоявшейся работы двигательных установок и агрегатов ракеты-носителя «Союз-2», в целом, близки к гауссовым, но наличие эксцесса и асимметрии не позволяет однозначно соотнести их с простой гауссовой моделью. Проведенная классификация полученных оценок по их форме и энтропии и результаты имитационного моделирования позволили обосновать модель временной структуры телеметрируемых процессов ракеты-носителя «Союз-2» в виде двухкомпонентной смеси гауссовых распределений.

4. Адаптация модели временной структуры телеметрируемых процессов ракеты-носителя «Союз-2» позволила получить выражения для несмещенного оценивания характеристик моментов одномерных распределений, используя характеристики «превышений уровня», и оценивать уровень его загрязнения. При этом робастность $W_{роб} \in W$ получаемых оценок достигается за счет использования характеристик «превышения уровня», инвариантных к дисперсии телеметрируемого процесса.

5. Проведенные исследования позволили ввести метрику для оперативной классификации телеметрируемых процессов по форме их спектра. Совместное использование соотношений оценивания моментов одномерных распределений и типовых нормированных спектральных плотностей позволяет проводить совместное оценивание вероятностных и спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов, тем самым обеспечивая оперативность $W_{оп} \in W$ обработки поступающей телеметрической информации. Более глубокий вероятностный и спектральный анализ, требующий больших вычислительных затрат и системных ресурсов, может быть произведен в дальнейшем после записи телеметрической информации в базу данных измерений.

6. Проведенные исследования телеметрируемых процессов на входе комплексов автоматизированного анализа космических средств позволили сформировать множество ограничений $P = \{P_{фикс}, P_{огр}, P_{стат}, P_{гаусс}, P_{отл}, P_{аном}, P_{диф2}\}$ и обосновать обобщенную двухкомпонентную модель в виде смеси гауссовых распределений. Ее использование позволяет разделять флуктуационную и аномальную компоненты по критерию Неймана-Пирсона с вероятностью пропуска результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, равной уровню загрязнения телеметрируемого процесса, и проводить исследование их временной и частотной структур, обеспечивая при этом достоверность поступающей информации.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ НЕОДНОРОДНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В главе проводится разработка и параметрическая адаптация алгоритмов оперативной обработки телеметрируемых процессов, удовлетворяющих сформированному множеству ограничений $P = \{P_{опр}, P_{стат}, P_{гаусс}, P_{отл}, P_{аном}, P_{диф2}\}$ и множеству показателей качества $W = \{W_{опер}, W_{дост}, W_{роб}\}$.

3.1 Существующие алгоритмы обнаружения измерений, содержащих аномальные значения

Проведенные исследования полученной в ходе летных испытаний ракеты-носителя «Союз-2» телеметрической информации показали, что поступающие результаты измерений $\xi(t_i)$ представляют собой случайную последовательность, состоящую из аддитивной смеси флуктуационной и аномальной компонент, имеющих гауссово распределение [35].

Использование таких результатов в качестве исходной информации для проведения оперативного автоматизированного анализа приводит к искажению заключений о контролируемых событиях при подготовке и запуске ракеты-носителя. Для исключения указанных недостатков предлагается фильтровать поступающую телеметрическую информацию, используя самонастраивающиеся алгоритмы, обеспечивающие оперативное обнаружения и исключение из последующей обработки результатов измерений, содержащих аномальную погрешность [39].

Обнаружение результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, заключается в проверке двух альтернативных гипотез о том, принадлежит ли проверяемый результат генеральной совокупности, либо нет. Решение принимается по результату сравнения проверяемого измерения с рассчитываемым порогом. Результат измерений, содержащий аномальную погрешность, должен быть исключен из дальнейшей обработки или заменен на значение, предсказанное на основе предшествующих результатов измерений, не содержащих аномальной погрешности [68,106].

Существующие алгоритмы обнаружения результатов измерений, содержащих аномальные погрешности, могут быть объединены в две группы [93]:

- использующие различные статистические критерии, обеспечивающие наибольшую мощность решающего правила (критерии Стьюдента, Румшинского, Граббса и др.);
- использующие корреляционные зависимости между измерениями (вычисление текущих конечных разностей различных порядков между измерениями и сравнение их с некоторым порогом).

К недостаткам большинства алгоритмов первой и второй групп можно отнести неустойчивость получаемых результатов при отклонении результирующей плотности вероятности телеметрируемого процесса от гауссовой и изменении штатных режимов работы ракеты-носителя, большой объем вычислений, что не удовлетворяет сформированному множеству показателей качества $W = \{W_{опер}, W_{дост}, W_{роб}\}$.

С целью преодоления указанных недостатков, для оперативного обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, предлагается использовать согласованную фильтрацию, принимая за основу квазиоптимальные конечноразностные фильтры. При этом возможность обнаружения результатов измерений, содержащих аномальные погрешности, основывается на следующих предположениях [36, 37, 38]:

- статистические свойства аномалий существенно отличаются от статистических свойств остальных результатов измерений;
- для обнаружения аномалий измерительный процесс должен рассматриваться, как помеха;
- процессы стационарны на всем протяжении интервала анализа T_a ;
- на интервале анализа T_a присутствует только один результат измерений, содержащий аномальную погрешность.

При настройке конечноразностного фильтра необходимо учесть специфику разработанной двухкомпонентной модели смеси гауссовых распределений (2.41) во временной области и классификацию телеметрируемого процесса по форме спектра (Таблица 2.3).

3.2 Разработка структурно-параметрического алгоритма обнаружения измерений, содержащих аномальную погрешность

Анализ спектральных характеристик оптимального фильтра для дискретных случайных процессов показывает, что близким к оптимальному реальным фильтром может быть вычислитель конечной разности [106]:

$$\Delta^N \xi(t_i) = \sum_{j=0}^N (-1)^j \binom{N}{j} \xi\left(t_i - \frac{j}{F_0}\right) \quad (3.1)$$

некоторого порядка N_{opt} , при котором он имеет однотипную с оптимальным фильтром частотную характеристику, описываемую выражением:

$$|W(j2\pi_c f_0^*)| = 2^N \sin^N\left(\frac{\pi f_0^*}{F_0}\right); \text{ при } \frac{2\pi f_0^*}{F_0} \leq \pi, \quad (3.2)$$

где $\binom{N}{j} = C_N^j = \frac{N!}{j!(N-j)!}$ - число сочетаний из N по j , f_0^* - оценка центральной частоты, F_0 - частота дискретизации телеметрируемого процесса $\xi(t)$.

Порядок N_{omm} вычислителя конечной разности (3.1) определяется порядком дифференцируемости телеметрируемого процесса $\xi(t)$ и дает правило выбора количества значений в анализируемой группе:

$$n_{omm} = N_{omm} + 1. \quad (3.3)$$

Вычислитель конечной разности (3.1) усиливает аномальную погрешность. Максимальное усиление, согласно свойству числа сочетаний, будет при отсчете $h = i - \langle N/2 \rangle$, где i - момент наблюдения, $\langle \rangle$ целая часть числа. Тогда, если результат измерений с индексом $h \in [0; N]$ содержит аномальную погрешность величиной A , составляющая выходного эффекта вычислителя конечной разности за счет аномальной погрешности определяется как:

$$q_{ant_i}(h) = A \binom{|i-h|}{N}; \quad |i-h| \leq N. \quad (3.4)$$

Решение о наличии или отсутствии результатов действия аномальной погрешности в момент времени t_i принимается относительно результата с номером $i - \langle N/2 \rangle$ и заключается в сравнении полученного значения $q_{ant_i}(h)$ с рассчитываемым в реальном масштабе времени порогом $H_{пор}$, зависящим от моментных и спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемого процесса. Если порог меньше модуля $|q_{ant_i}(h)|$, то результат измерений считается принадлежащим генеральной совокупности. В противном случае измерение считается содержащим аномальную погрешность и должно быть исключено из дальнейшей обработки [68].

Правильность решения определяется величиной соотношения «сигнал-шум» Γ на выходе фильтра по отношению к входу [39]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{вых}^2 = \frac{q_a^2}{\sigma_{инф.вых}^2} = A^2 \frac{\binom{\langle N/2 \rangle}{N}}{\sigma_{pN}^2} \\ \Gamma = \frac{\rho_{вых}^2}{\rho_{вх}^2} = \frac{\binom{\langle N/2 \rangle}{N}}{\delta_{pN}^2} \end{array} \right., \quad (3.5)$$

где $\rho_{вых}^2$ – выходное отношение квадрата амплитуды аномального результата A к дисперсии информационной компоненты $\sigma_{инф}^2$, q_a^2 – корреляционная сумма аномального результата и информационной компоненты телеметрируемого процесса $\xi(t)$, $\sigma_{pN}^2 = \sigma_{инф.вых}^2$ – дисперсия $\xi(t)$ на выходе вычислителя конечной разности (3.1), δ_{pN}^2 – приведенное значение дисперсии на выходе конечной разности.

При прочих равных условиях эффективность обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, повышается с ростом дифференцируемости измерительного процесса. Для решения задачи оперативного обнаружения результатов измерения достаточно ограничиваться четвертым порядком вычислителя конечной разности (3.1). Тогда соотношение «сигнал-шум» на выходе фильтра составит [93, 106]:

$$\Gamma = 324\nu^8 / \pi^8, \quad (3.6)$$

где $\nu = F_0 / 2f_0$.

Для определения величины порога обнаружения $H_{нор}$ результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, использовался критерий Неймана-Пирсона с двухсторонним симметричным порогом [97]:

$$|q_i(h)| \leq H_{нор}, \quad (3.7)$$

причем аномальная компонента рассматривалась как полезный сигнал, а флуктуационная – как помеха. Таким образом, задача обнаружения результата измерений, содержащего аномальную погрешность, сводится к задаче обнаружения сигнала на фоне помех. Тогда, если флуктуационная компонента обладает гауссовым распределением (см. п. 2.2.3), то вероятность ложного обнаружения будет:

$$P_{ло} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\rho_{вых}} \int_{H_{нор}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\rho_{вых}^2}\right) d\xi = 2(1 - \Phi_0(H_{нор})), \quad (3.8)$$

где $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$ – интегральное гауссово распределение, а вероятность пропуска аномальной погрешности амплитудой A составит:

$$P_{пр}(A) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{A\rho_{вых} - H_{нор}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) d\xi = 2(1 - \Phi_0(A\rho_{вых} - H_{нор})), \quad A \geq 0 \quad (3.9)$$

Таким образом, вероятность пропуска $P_{пр}$ результата измерений, содержащего аномальную погрешность, для модели смеси гауссовых компонент будет:

$$\begin{aligned}
P_{np} &= 2 \int_0^{\infty} P_{np}(A) p_{ан}(A) dA = \\
&= \frac{2}{\sqrt{2\pi} \sigma_a^2} \int_0^{\infty} (1 - \Phi_0(A \rho_{вых}^2 - H_{нор})) \exp\left(-\frac{A^2}{2\rho_{вых}^2}\right) P_{np}(A) dA,
\end{aligned} \tag{3.10}$$

где $P_{ан}(A)$ - плотность вероятности аномальной погрешности.

С целью упрощения решения уравнения (3.10) относительно $H_{нор}$ будем рассматривать только гарантированно обнаруживаемые аномалии, для которых вероятность обнаружения практически равна единице.

При $A \rho_{вых} \gg H_{нор}$ выражение (3.9) быстро уменьшается, стремясь в пределе (при $\rho_{вых} \rightarrow \infty$) к нулю. Поэтому для определения нижней границы $|A_{нз}|$ справедливо [106]:

$$P_{ло} = P_{np}(|A_{нз}|). \tag{3.11}$$

Нижняя граница гарантированно обнаруживаемого результата измерений, содержащего аномальную погрешность, для процессов с единичной амплитудой и гауссовым распределением аномальной погрешности будет:

$$|A_{нз}| = \sqrt{-\frac{3}{2} \ln\left(\frac{\sqrt{2\pi} P_{np}}{3}\right)} = \frac{2H_{нор}}{3\sqrt{\Gamma}}. \tag{3.12}$$

Откуда следует, что

$$H_{нор} = \sqrt{-1.5\Gamma \left(\frac{F_0}{2f_0^*}\right) \ln\left(\frac{\sqrt{2\pi}}{3} p_{np}\right)}. \tag{3.13}$$

При вероятности ложного обнаружения $P_{ло} < 10^{-3}$ и соотношения «сигнал-шум» $\Gamma > 9$ отклонение результата (3.12) от (3.10) составляет менее 0.5%. Таким образом, для вычисления порога обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, необходимо в реальном масштабе времени проводить оценивание центральной частоты и типа спектра обрабатываемого процесса.

Полученный результат является теоретически верхним пределом для характеристик обнаружения аномальных результатов измерений.

Рассмотрим основные этапы функционирования реализованного алгоритма обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность (Рисунок 3.1).

Исходными данными для работы алгоритма являются:

- частота дискретизации F_0 и диапазон изменений обрабатываемого параметра $\Delta\xi(t)$;
- вероятность пропуска аномалии p_{np} ;

- верхняя граница центральной частоты $f_0 = F_0/2$;
- объем выборки $N_{пер}$, для которой производится оценивание текущего типа спектра и центральной частоты f_0^* телеметрируемого процесса;
- максимальный размер серии (следующих подряд) $N_{кр}$ результатов измерений, содержащих аномальную погрешность.

Рассмотрим основные этапы работы алгоритма обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность (Рисунок 3.1):

1. Поступающие значения $\xi(t_i)$ телеметрируемого процесса $\xi(t_i)$ помещаются в буфер.
2. Если количество значений $\xi(t_i)$ меньше, чем $n_{онм}$ (3.3), то алгоритм завершает работу. Для вычислителя конечной разности четвертого порядка $\Delta^4 \xi(t_i)$ требуется пять значений $n_{онм} = 5$.
3. В соответствии с (3.1) производится вычисление конечной разности $\Delta^4 \xi(t_i)$ по последним $n_{онм} = 5$ измерениям.
4. Принимается решение о способе вычисления $H_{нор}$ порога обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность.
5. До набора выборки заданного объема $N_{пер}$, с целью ограничить обрабатываемые значения $\xi(t_i)$ от сильных всплесков аномальных измерений, определяется максимальное $H_{max} = H_{нор}(f_0^* = F_0/2)$ значение порога обнаружения.
6. После набора заранее определенного числа отсчетов $N_{пер}$, для расчета более точного порога обнаружения $H_{нор}$, используются оценки центральной частоты и типа спектра телеметрируемого процесса.
7. В зависимости от результатов сравнения полученной конечной разности $\Delta^4 \xi(t_i)$ и порога $H_{нор}$ отбраковки выносится решение о том, принадлежит ли проверяемый результат измерений генеральной совокупности, либо нет (решение выносится о $h = i - \langle n_{онм}/2 \rangle$ отсчете с конца выборки).
8. Если значение конечной разности $\Delta^4 \xi(t_i)$ меньше порога $H_{нор}$, то выносится решение, что проверяемый результат измерений принадлежит генеральной совокупности и не является аномальным.

9. Если количество аномальных результатов $N_{аном}$ не равно нулю, то производится восстановление сбойных отсчетов и сброс счетчика аномалий. Как показывает практика обработки телеметрической информации, поступающей от ракеты-носителя «Союз-2», длинные серии следующих подряд аномалий редки, поэтому, как правило, можно ограничиться аппроксимацией сбойных участков сплайнами нулевой или первой степени.

10. Если число «хороших» значений $\{\xi(t_i)\}$ превышает заранее заданное число $N_{пер}$, то производится оценивание спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемого процесса.

11. На основании полученных оценок производится оценивание текущего типа корреляционной функции $\Delta_{мин}^*$, f_0^* центральной частоты обрабатываемого процесса $\xi(t)$ и расчет величины порога обнаружения $H_{пор}$ в соответствии с (3.13).

12. Из буфера, в котором хранятся «хорошие» и восстановленные значения, удаляются первые $N_{окн}$ значения телеметрируемого процесса $\xi(t_i)$.

13. Алгоритм завершает работу.

14. Если значение конечной разности $\Delta^4 \xi(t_i)$ больше порога $H_{пор}$, то выносится решение, что проверяемый результат измерений не принадлежит генеральной совокупности и является аномальным; производится увеличение счетчика аномалий $N_{аном} = N_{аном} + 1$.

15. Если длина серии аномальных результатов меньше некоторого заранее заданного значения $N_{кр}$, то полученный аномальный результат измерений сохраняется для последующей обработки (см. шаг 9). В противном случае ($N_{аном} > N_{кр}$) принимается решение о том, что обрабатываемый процесс $\xi(t)$ перестал быть стационарным, что означает: все полученные ранее оценки спектрально-корреляционных характеристик «устарели» и, поэтому, вновь определяется максимальное значение порога отбраковки H_{max} (см. шаг 5).

16. Алгоритм завершает работу.

Использование обобщенной модели (2.41) и метрики v^2 для разделения телеметрируемых процессов по форме спектра (Таблица 2.3) позволило реализовать алгоритм обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, в реальном масштабе времени (Рисунок 3.1). Для оперативного оценивания величины порога (3.13) обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, необходимо разработать алгоритмы оценивания центральной частоты f_0^* и оценивания величины вероятности пропуска $p_{пр}$ аномалии.

3.3 Разработка алгоритма совместного оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и степени загрязнения телеметрируемых процессов

3.3.1 Оценивание обобщенных спектрально-корреляционных характеристик

Высокая вычислительная сложность алгоритмов оценивания спектрально-корреляционных характеристик, использующих быстрые преобразования Фурье, делает их малоприменимыми для обработки больших объемов поступающей телеметрической информации в реальном масштабе времени. Поэтому на практике, как правило, прибегают к упрощенным алгоритмам, основанным на оценивании характеристик типа «превышения уровня» телеметрируемых процессов [28, 84, 107].

Достаточно распространенным алгоритмом оценивания центральной частоты f_0^* телеметрируемого процесса $\xi(t)$, принимаемого на фоне шума, является подсчет числа пересечений траекторией $\xi(t)$ «нулевого» уровня $n^+(H, T_a) \Big|_{H=m_\xi^*}$ [101]:

$$f_0^* = \frac{n^+(m_\xi^*, T_a)}{T_a} \quad (3.14)$$

Один из возможных методов практической реализации алгоритма (3.14) приведен на Рисунк 3.2 [107]:

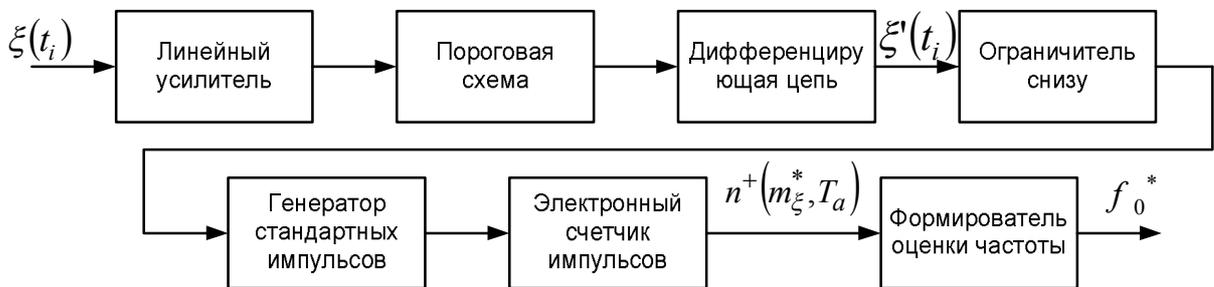


Рисунок 3.2 Измеритель частоты сигнала методом «счетчика нулей»

Если телеметрируемый процесс $\xi(t)$ является узкополосным $f_0 \gg \Delta f_\Theta \rightarrow 0$, то, при достаточно большом времени наблюдения ($T_a \rightarrow \infty$), алгоритм (3.14) дает несмещенную оценку

$f_0^* \rightarrow \frac{1}{T_a} n^+(m_\xi^*, T_a) \rightarrow N^+(m_\xi, 1) \rightarrow f_0$, и ее дисперсия зависит только от дисперсии числа пересечений

$D[N^+(m_\xi, 1)] = \frac{1}{T_a^2} D[n^+(m_\xi^*, T_a)]$. При этом плотность распределения $p(f_0^*)$ характеризуется

асимптотически (при $T_a \rightarrow \infty$) гауссовым распределением.

Однако [101] затягивание «хвостов» спектральной плотности $\Delta f_s \neq 0$ и концентрация значений $\xi(t)$ в окрестности математического ожидания $m_\xi = 0$ приводит к смещению получаемой оценки f_0^* , $\delta(f_0^*) = M\{f_0^*\} - f_0$ (см. Рисунок 3.3).

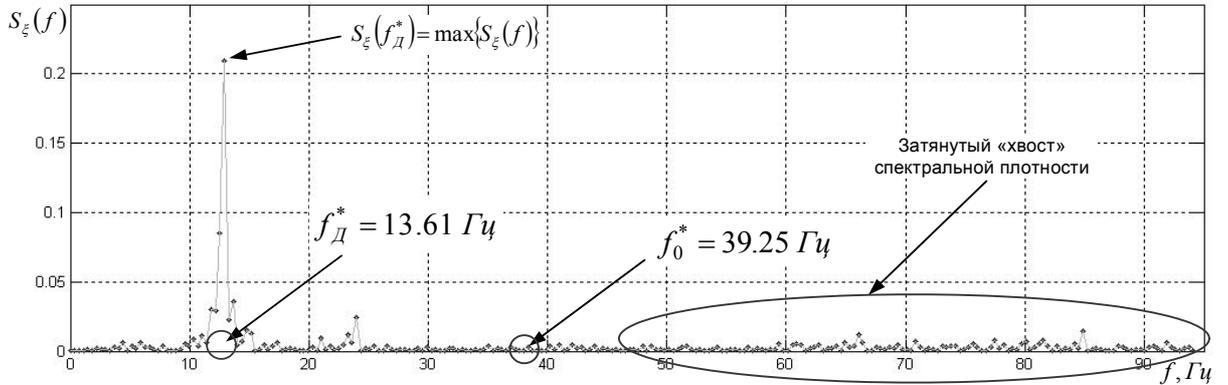


Рисунок 3.3 Оценка спектральной плотности параметра Осевой Перегрузки, получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени РН «Союз-2», и смещение оценки f_0^*

Для оценивания величины смещения $\delta(f_0^*)$ оценки f_0^* , получаемой при использовании алгоритма типа «счетчик нулей» (3.14), была использована, аналитической зависимости среднего числа пересечений $N^+(H, T_a)$ со значениями плотности вероятности $p(\xi)$ и спектрально-корреляционными характеристиками телеметрируемого процесса $\xi(t)$ [88, 100, 107].

Как было показано в гл. ГЛАВА 2, среднее число пересечений «нулевого» уровня $N^+(0, T_a)$ траекторией телеметрируемого процесса однозначно связано со значениям коэффициента эксцесса γ_2 и второго начального нормированного спектрального момента $r''(0)$ (2.54). Используя аналитическую зависимость между начальными и центральными моментами (2.64), можно показать, что второй начальный нормированный спектральный момент также может быть представлен в виде суммы квадрата первого начального $\lambda_1[S_\xi(\omega)]$ и второго центрального $\Lambda_2[S_\xi(\omega)]$ моментов нормированной спектральной плотности $S_\xi(\omega)$:

$$-r''(0) = \lambda_2[S_\xi(\omega)] = (\lambda_1[S_\xi(\omega)])^2 + \Lambda_2[S_\xi(\omega)] = (2\pi)^2 (f_0^* + (\aleph \Delta f_s^*))^2. \quad (3.15)$$

Подставляя полученное выражение (3.15) в (2.54), получаем [101, 114]:

$$n^+(0, T_a) = T_a \sqrt{f_0^{*2} + (\aleph \Delta f_s^*)^2} \left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right), \quad (3.16)$$

где f_0^* - оценка центральной частоты, Δf_s^* - оценка эффективной ширины спектра, \aleph - коэффициент формы спектра, γ_2 - коэффициент эксцесса распределения телеметрируемого процесса. Тогда, решая полученное уравнение (3.16) относительно f_0^* , получаем:

$$f_0^* = \sqrt{\left(\frac{n^+(0, T_a)}{T_a \left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)} \right)^2 - (\kappa \Delta f_s^*)^2}. \quad (3.17)$$

Таким образом, величина смещения оценки центральной частоты f_0^* полностью определяется формой плотности вероятности и формой спектра телеметрируемого процесса.

Получение оценок эффективной ширины спектра и коэффициента его формы представляет достаточно объемную, с вычислительной точки зрения, задачу. Поэтому в алгоритме оперативного оценивания коэффициента спектральной формы было использовано разделение телеметрируемых процессов по типам их спектров (см. п. 2.3.3, Таблица 2.3). Тогда оценка эффективной ширины спектра Δf_s может быть получена из выражений (2.83)-(2.85).

Из выражений (2.83)-(2.85) нетрудно заметить, что значение эффективной ширины спектра Δf_s представляет собой произведение некоторого коэффициента κ , зависящего от типа спектра телеметрируемого процесса $\xi(t)$, и отношения $N^+(0, T_a)/T_a$:

$$\Delta f_s = \kappa \frac{N^+(0, T_a)}{2\pi T_a}. \quad (3.18)$$

Подставляя полученное выражение (3.18) в (3.17), получаем:

$$f_0^* = \frac{n^+(0, T_a)}{T_a (1 + \gamma_2/8)} \sqrt{(2\pi)^2 - (\kappa)^2}. \quad (3.19)$$

Таким образом, для получения оценки центральной частоты, используя алгоритм (3.14), необходимо провести подсчет числа пересечений $n^+(0, T_a)$, числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ траектории телеметрируемого процесса и оценить величину коэффициента эксцесса γ_2^* его плотности вероятности.

Дисперсия полученной оценки f_0^* , при фиксированном типе спектра телеметрируемого процесса и малом коэффициенте эксцесса γ_2^* , зависит только от дисперсии числа пересечений $D[n^+(0, T_a)]$, характеризуется гауссовым распределением при $T_a \rightarrow \infty$ и составляет (с погрешностью 1%):

Телеметрируемые процессы с «первым» типом спектра	$D[f_0^*] \leq 0.064/T_a + 0.138/T_a^2$;
Телеметрируемые процессы со «вторым» типом спектра	$D[f_0^*] \leq 0.033/T_a$;
Телеметрируемые процессы с «третьим» типом спектра	$D[f_0^*] \leq 0.012/T_a + 0.048/T_a^2$.

Полученные выражения (3.17) - (3.19) позволили разработать алгоритм оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик (Рисунок 3.4), позволяющий

в реальном масштабе времени получать оценки центральной частоты f_0^* , эффективной полосы частот $\Delta f_{\mathcal{D}}^*$ и типа спектра \mathfrak{N}^* .

Рассмотрим основные этапы функционирования разработанного алгоритма (Рисунок 2.33):

1. На вход алгоритма подается однородный стационарный дважды дифференцируемый процесс с плотностью вероятности, аппроксимируемой рядом Эджворта (2.54).
2. Из поступающих в реальном масштабе времени, в общем случае одиночных, отсчетов $\xi(t_i)$ телеметрируемого процесса $\xi(t)$ формируется выборка $\{\xi(t_i)\}$ заранее заданного объема.
3. Производится подсчет числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ траектории процесса $\xi(t)$.
4. Вычисляется значение обобщенной характеристики V^2 и соответствующая ему (Таблица 2.3) величина коэффициента формы спектра \mathfrak{N} телеметрируемого процесса.
5. В зависимости от типа корреляционной функции производится вычисление эффективной полосы частот $\Delta f_{\mathcal{D}}^*$ (2.83)-(2.85).
6. В соответствии с (3.17) вычисляется оценка центральной частоты f_0^* телеметрируемого процесса $\xi(t)$.

На выходе алгоритма формируются оценки центральной частоты f_0^* , эффективной полосы частот $\Delta f_{\mathcal{D}}^*$ и тип спектра телеметрируемого процесса.

Результаты оценивания рассмотренного алгоритма центральной частоты f_0^* телеметрируемого процесса $\xi(t)$ в сравнении с оценкой, получаемой простым «счетчиком нулей» (3.14), представлены на Рисунок 3.5.

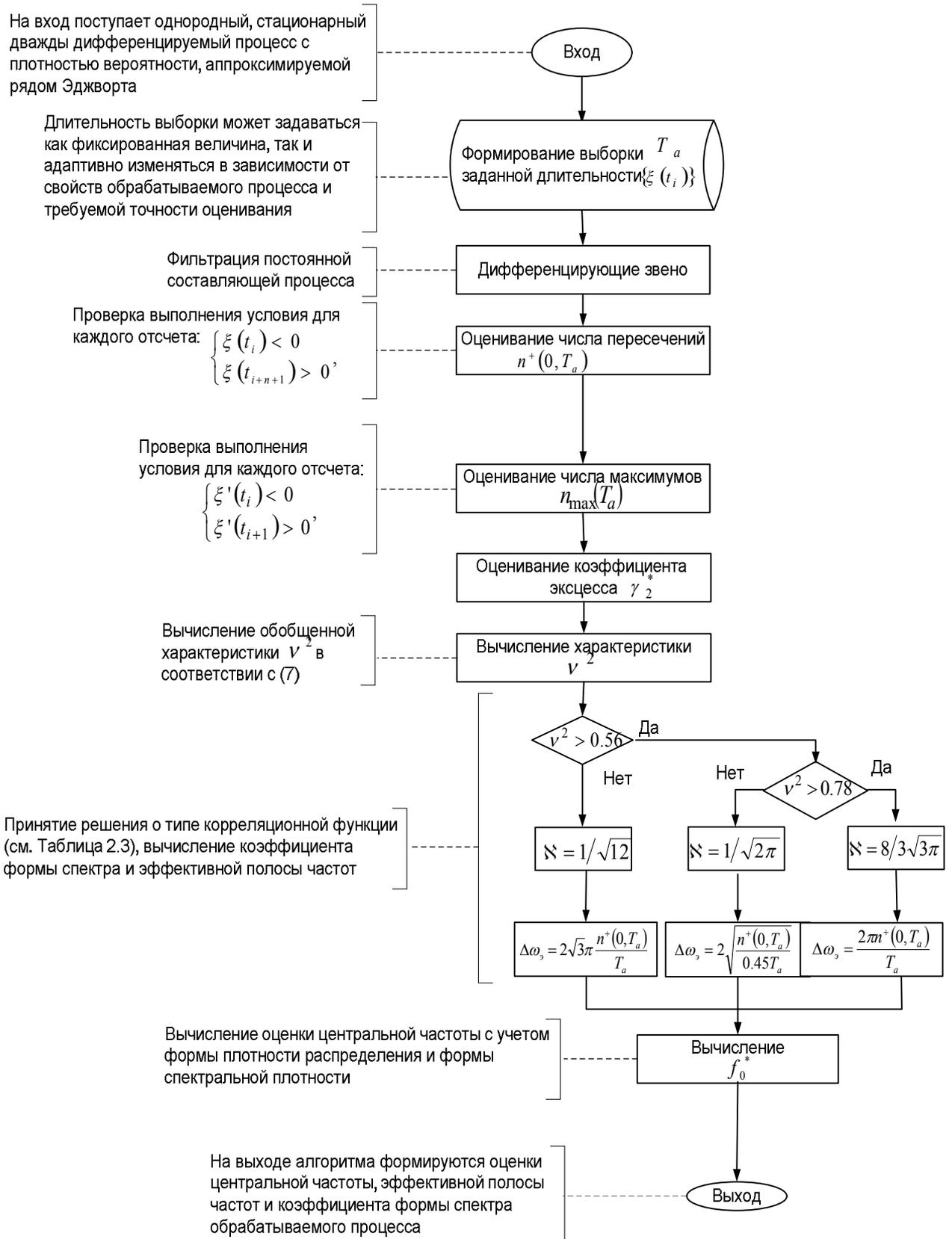


Рисунок 3.4 Блок-схема алгоритма оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик

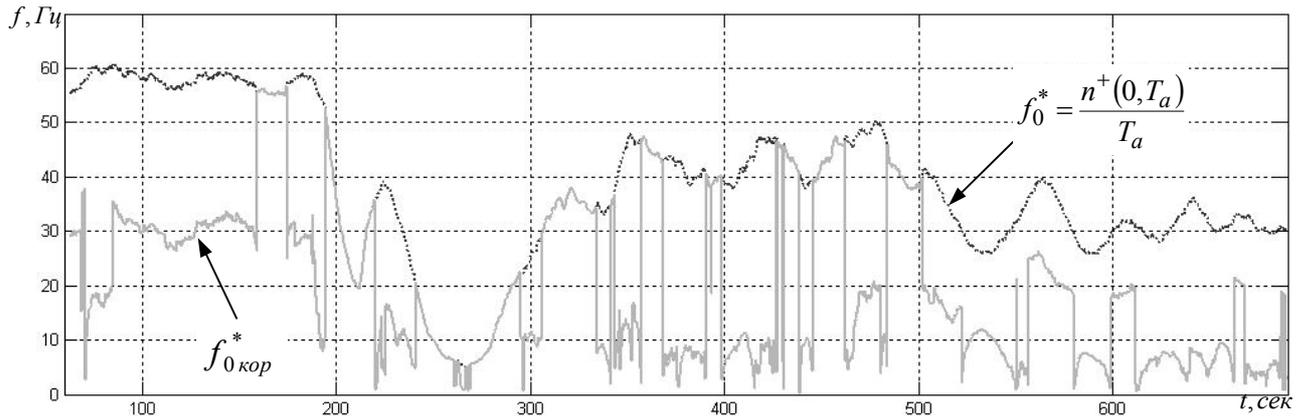


Рисунок 3.5 Графики оценки центральной частоты полученной методом «счетчик нулей» и скорректированная оценка

Практическое применение приведенного алгоритма позволяет уменьшить вычислительную нагрузку на рабочую станцию, тем самым высвободить время для выполнения алгоритмов вторичного анализа или на обработку дополнительных параметров и повысить оперативность и достоверность получения заключений о техническом состоянии ракеты-носителя.

3.3.2 Оценивание моментов одномерных распределений телеметрируемых процессов

Теоретической основой разработанного алгоритма оперативного оценивания моментов одномерных распределений с использованием характеристик «превышения уровня» является аппроксимация результирующей плотности вероятности телеметрируемого процесса $\xi(t)$ рядом Эджворта (2.54) и решения системы уравнений (2.55).

Рассмотрим основные этапы функционирования разработанного алгоритма (Рисунок 3.6):

1. На вход алгоритма подается однородный стационарный дважды дифференцируемый процесс с плотностью вероятности, аппроксимируемой рядом Эджворта, и оценки центральной частоты f_0^* и эффективной ширины спектра Δf_0^* телеметрируемого процесса.
2. Из поступающих в реальном масштабе времени, в общем случае одиночных, отсчетов $\xi(t_i)$ телеметрируемого процесса $\xi(t)$ формируется выборка $\{\xi(t_i)\}$ заранее заданного объема.
3. Производится подсчет числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ траектории процесса $\xi(t)$.
4. Вычисляется значение обобщенной характеристики v^2 и соответствующая ему (Таблица 2.3) величина коэффициента формы спектра \aleph телеметрируемого процесса.
5. Вычисляется значение обобщенной характеристика v^2 и, в зависимости от полученного значения коэффициента формы спектра \aleph телеметрируемого процесса присваивается значение (Таблица 2.3).

6. Вычисляется значение второго начального нормированного спектрального момента $r''(0)$ (2.67).

7. В соответствии с (2.57) производится вычисление значений оценок дисперсии и коэффициентов асимметрии и эксцесса телеметрируемого процесса.

Дисперсия получаемых оценок σ_{ξ}^{2*} , γ_1^* , γ_2^* при фиксированных значениях спектрально-корреляционных характеристик \aleph , f_0 , Δf зависит только от дисперсий числа пересечений $D[n^+(h, T_a)]_{h=0, H, -H}$ и для оценки коэффициента эксцесса составляет:

$$D[\gamma_2^*] \approx \frac{64D[n^+(0, T_a)]}{f_0^2 + (\aleph \Delta f_0)^2}, \quad (3.2)$$

где $D[n^+(0, T_a)]$ (с погрешностью 1%):

Телеметрируемые процессы с «первым» типом спектра	$D[n^+(0, T_a)] \leq 0.065T_a + 0.140,$
Телеметрируемые процессы со «вторым» типом спектра	$D[n^+(0, T_a)] \leq 0.034T_a,$
Телеметрируемые процессы с «третьим» типом спектра:	$D[n^+(0, T_a)] \leq 0.012T_a + 0.049.$

Использование в качестве значений средней частоты $f_0 = f_0^* = n^+(0, T_a)/T_a$ и эффективной ширины спектра $\Delta f_s = \Delta f_s^* = F_0/2$ даст верхние границы оценок характеристик дисперсии σ_{ξ}^{2*} и коэффициентов дисперсии γ_1^* и асимметрии γ_2^* телеметрируемого процесса. Таким образом, подсчет числа пересечений траектории телеметрируемого процесса на трех уровнях $n^+(0, T_a)$, $n^+(H, T_a)$, $n^+(-H, T_a)$ и числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ позволяет проводить оценивание отклонения результирующей плотности распределения процесса от гауссовой, тем самым косвенно оценивая уровень его загрязнения, и получать несмещенные оценки характеристик моментов распределения.

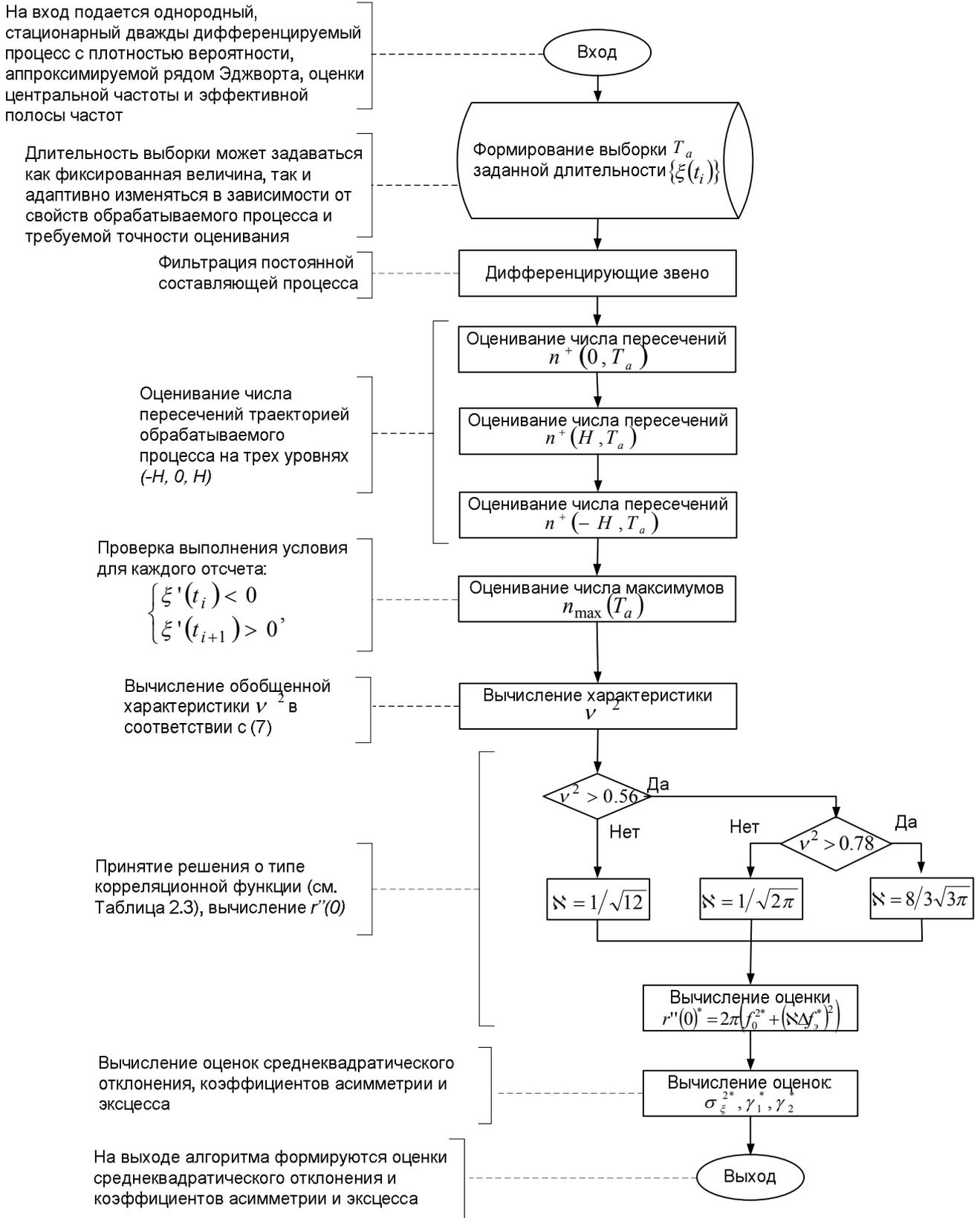


Рисунок 3.6 Блок-схема алгоритма оперативного оценивания характеристик моментов одномерных распределений

3.3.3 Совместное оценивание обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины загрязнения телеметрируемого процесса

Совместное использование разработанных алгоритмов оперативного оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемого процесса позволяет проводить оценивание величины вероятности пропуска p_{np} результатов измерений, содержащих аномальную погрешность.

Величина отклонения плотности вероятности $p^*(\xi)$ от гауссовой определяется значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса. Использование полученных соотношений позволяет получить значения γ_1^* и γ_2^* путем оценивания числа пересечений траектории телеметрируемого процесса на трех уровнях ($H = 0, H = 0.74\sigma_\xi, H = -0.74\sigma_\xi$):

$$\gamma_1^* = \frac{0.759}{0.23 - \frac{6.28n^+(0, -0.74\sigma_\xi)}{15.74n^+(0.74\sigma_\xi, T_a) - 6.91n^+(0, T_a)}}, \quad (3.21)$$

$$\gamma_1^* = 6 \left(\frac{2.63\pi n^+(0.74\sigma_\xi, 1)}{\sqrt{-r''(0)}} - 1 \right), \quad (3.22)$$

$$\gamma_2^* = 8 \left(\frac{2\pi n^+(0, 1)}{\sqrt{-r''(0)}} - 1 \right). \quad (3.23)$$

Для оперативного оценивания вероятности пропуска p_{np} в (3.13), используется (3.23) для получения оценки γ_2^* и зависимость $\alpha(\gamma_2^*)$ (см.2.2.4), полученная в ходе имитационного моделирования различных смесей. Тогда, задаваясь величиной вероятности появления аномалии на выходе $P_{ан. вых}$, $p_{np} = P_{ан. вых} / \alpha(\gamma_2^*)$.

Рассмотрим основные этапы функционирования разработанного алгоритма совместного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины α - загрязнения телеметрируемого процесса (3.6):

1. На вход алгоритма подается однородный стационарный дважды дифференцируемый процесс с плотностью вероятности, аппроксимируемой рядом Эджворта, и оценки центральной частоты f_0^* и эффективной ширины спектра Δf_0^* телеметрируемого процесса.
2. Из поступающих в реальном масштабе времени, в общем случае одиночных, отсчетов $\xi(t_i)$ телеметрируемого процесса $\xi(t)$ формируется выборка $\{\xi(t_i)\}$ заранее заданного объема.

3. По сформированной выборке $\{\xi(t_i)\}$ производится оценивание математического ожидания $m_\xi^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_\xi^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - m_\xi^*)^2}$.
4. Производится подсчет числа пересечений траектории телеметрируемого процесса на трех уровнях: $n^+(0, T_a)$, $n^+(0.74\sigma_\xi, T_a)$, $n^+(-0.74\sigma_\xi, T_a)$.
5. В соответствии с выражениями (3.22) и (3.23) производится вычисление оценок коэффициентов асимметрии γ_1^* и эксцесса γ_2^* .
6. В соответствии с полученными значениями оценок коэффициентов асимметрии γ_1^* и эксцесса γ_2^* вычисляется оценка величины α -загрязнения телеметрируемого процесса и вероятности пропуска p_{np} результата измерения, содержащего аномальную погрешность.
7. Производится подсчет числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ траектории телеметрируемого процесса.
8. Вычисляется значение обобщенной характеристики V^2 и соответствующая ему (Таблица 2.3) величина коэффициента формы спектра \aleph телеметрируемого процесса.
9. В зависимости от типа корреляционной функции производится вычисление эффективной полосы частот $\Delta f_{\text{эф}}^*$ (2.83)-(2.85).
10. В соответствии с (3.17) вычисляется оценка центральной частоты f_0^* телеметрируемого процесса $\xi(t)$.

Использование специфики модели (2.41) и метрики V^2 для классификации телеметрируемых процессов по форме спектра (Таблица 2.3) позволило реализовать алгоритм оперативного обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, в реальном масштабе времени. Подсчет числа пересечений траектории телеметрируемого процесса трех уровней $n^+(0, T_a)$, $n^+(H, T_a)$, $n^+(-H, T_a)$ и числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ дает возможность проводить оперативное оценивание его спектрально-корреляционных характеристик и величины α -загрязнения. Таким образом, значение порога обнаружения $H_{\text{нор}}$ (3.13) результатов измерений, содержащих аномальные погрешности, адаптивно изменяется в зависимости не только от спектрально-корреляционных свойств телеметрируемого процесса, но и от уровня его α -загрязнения.

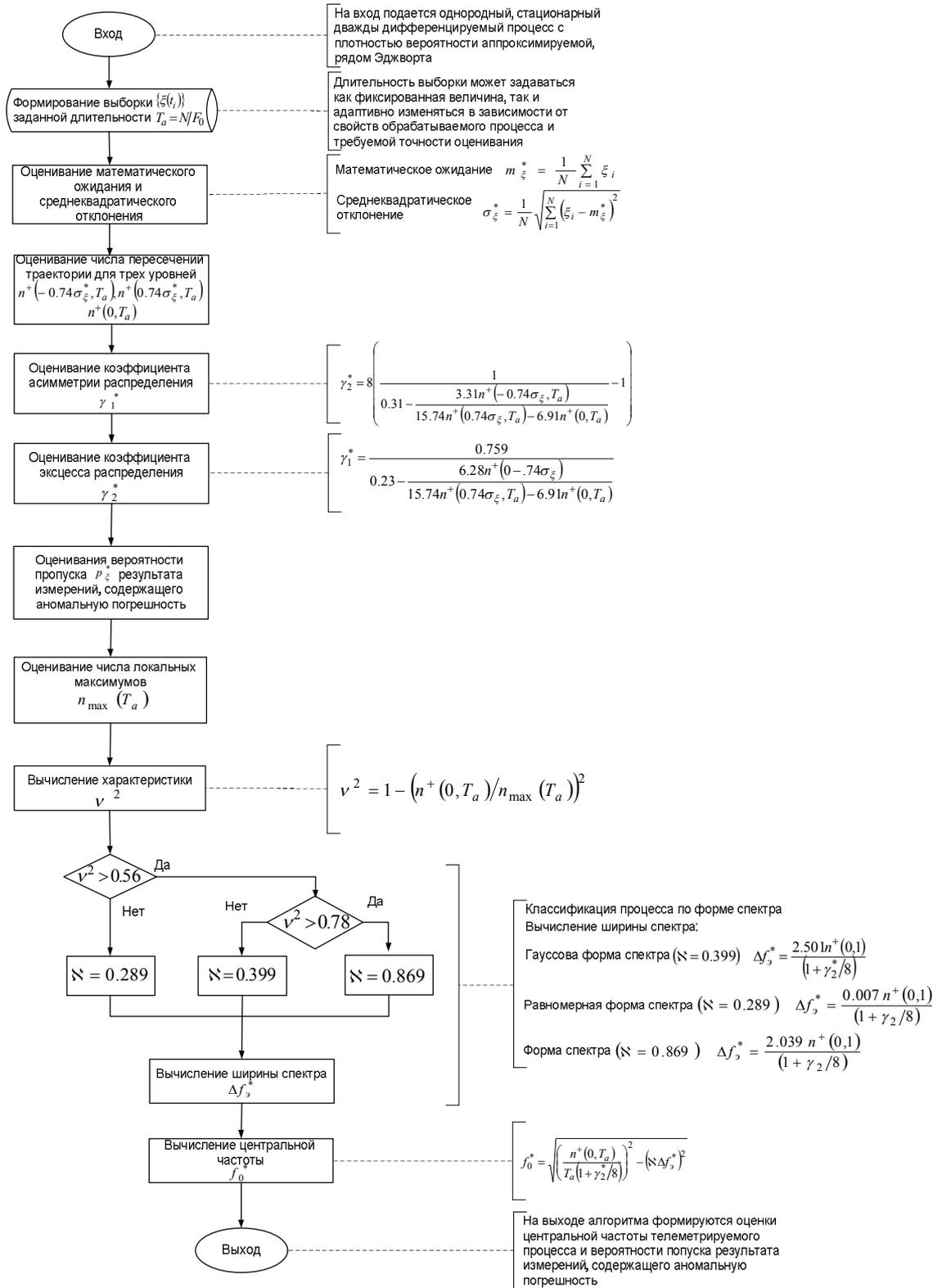


Рисунок 3.7 Блок-схема алгоритма оперативного оценивания величины загрязнения телеметрируемого процесса

Выводы по главе 3

1. Разработанная модель информационных процессов на входе комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств совместно с использованием математического аппарата теории выбросов позволили разработать алгоритм оперативного обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальные погрешности, алгоритмы оперативного оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов.

2. Разработанный алгоритм обнаружения и исключения измерений, содержащих аномальные погрешности, позволяет оперативно разделять флуктуационную и аномальную компоненты результирующей смеси распределений с использованием критерия Неймана-Пирсона с заданным значением вероятности пропуска аномального результата измерений. При этом обеспечивается квазиоптимальность исключения результатов измерений, содержащих аномальные погрешности.

3. Алгоритмическая реализация процедуры классификации телеметрируемого процесса по форме спектра позволяет получить аппроксимацию его спектральной плотности и корреляционной функции, используя характеристики превышения уровня.

4. Алгоритм оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик позволяет учитывать смещение оценки центральной частоты, получаемой «счетчиком нулей» в зависимости от формы плотности распределения и формы спектра телеметрируемого процесса. Оценки дисперсии позволяют оценить точность получаемой оценки центральной частоты в зависимости от формы спектра телеметрируемого процесса.

5. Алгоритм оперативного оценивания моментов одномерных распределений позволяет, путем подсчета числа пересечений и числа его локальных максимумов, получать несмещенные оценки дисперсии и коэффициентов асимметрии и эксцесса, при этом оценивая уровень загрязнения телеметрируемого процесса.

6. Совместное использование структурно-параметрического алгоритма обнаружения и исключения измерений, содержащих аномальные погрешности, и оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик позволяет проводить структурно-параметрическую оперативную подготовку поступающей телеметрической информации путем уменьшения ее неоднородности. При этом величина динамического порога обнаружения аномалий определяется спектрально-корреляционными характеристиками и уровнем загрязнения телеметрируемого процесса.

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В главе разрабатывается макет специального программного обеспечения оперативной обработки телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз»; производится настройка специального программного обеспечения и обработка экспериментальных данных, полученных по результатам летных испытаний ракета-носителя «Союз-2»; проводится оценивание показателей качества обработки телеметрируемых процессов.

4.1 Описание специального программного обеспечения для оперативной обработки телеметрической информации

Разнообразие алгоритмов, методов, программ повышения достоверности и качества телеметрической информации для последующего автоматизированного анализа велико, однако в каждом таком алгоритме могут быть выделены некоторые общие примитивы. Поэтому возникает задача представления программы подготовки телеметрической информации в виде некоторой обобщенной модели - схемы программы.

Использование обобщенной модели позволяет с различной степенью детализации описывать структурные свойства программ. Схема программы сохраняет ее структуру, но, в отличие от самой программы, не является записью алгоритма. Задавая различные интерпретации, можно получать совершенно разные программы, однако эти программы будут иметь одну и ту же структуру. Иными словами, используя некоторый набор базовых примитивов, можно конструировать различные алгоритмы подготовки телеметрической информации. Таким образом, схема позволяет моделировать целый класс программ с одинаковыми структурными свойствами [25, 77].

Любая программа обладает всеми общими свойствами алгоритмов: она является конструктивным объектом, работает конечное время для тех наборов исходных данных, на которых определена реализуемая вычисляемая функция, для программы характерна массовость и однозначность. Разрабатываемая схема программы должна удовлетворять следующим требованиям [78]:

- модель должна позволять создавать достаточно широкий класс алгоритмов;
- модель должна позволять игнорировать несущественные для решения данной проблемы свойства (например, синтаксические детали и др.);
- модель должна давать возможность фиксировать и разделять разрешимые и неразрешимые свойства программ или классов программ;
- модель должна иметь изобразительную возможность ее представления, подобную структуре самой программы.

Проведенный анализ существующих подходов к формализации схем программ позволяет сделать заключение, что в общем случае алгоритм подготовки телеметрической информации для автоматизированного анализа может быть представлен в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют атомарным (элементарным) модулям-алгоритмам, а дуги – управляющим или информационным связям между ними.

Предложенная обобщенная схема алгоритмов предварительной подготовки поступающей телеметрической информации для автоматизированного анализа в реальном масштабе времени позволяет формализовать подход к проектированию и разработке алгоритмов.

Для разработки алгоритмов предварительной подготовки поступающей телеметрической информации, по предложенной обобщенной схеме алгоритма, сотрудниками ЗАО «СКБ Орион» был разработан «Конструктор алгоритмов».

Разработанный программный комплекс позволяет в дружественной пользователю графической среде осуществлять создание и редактирование, «привязку» к телеметрируемым параметрам и дополнительную, «тонкую», настройку алгоритмов обработки (Рисунок 4.1).

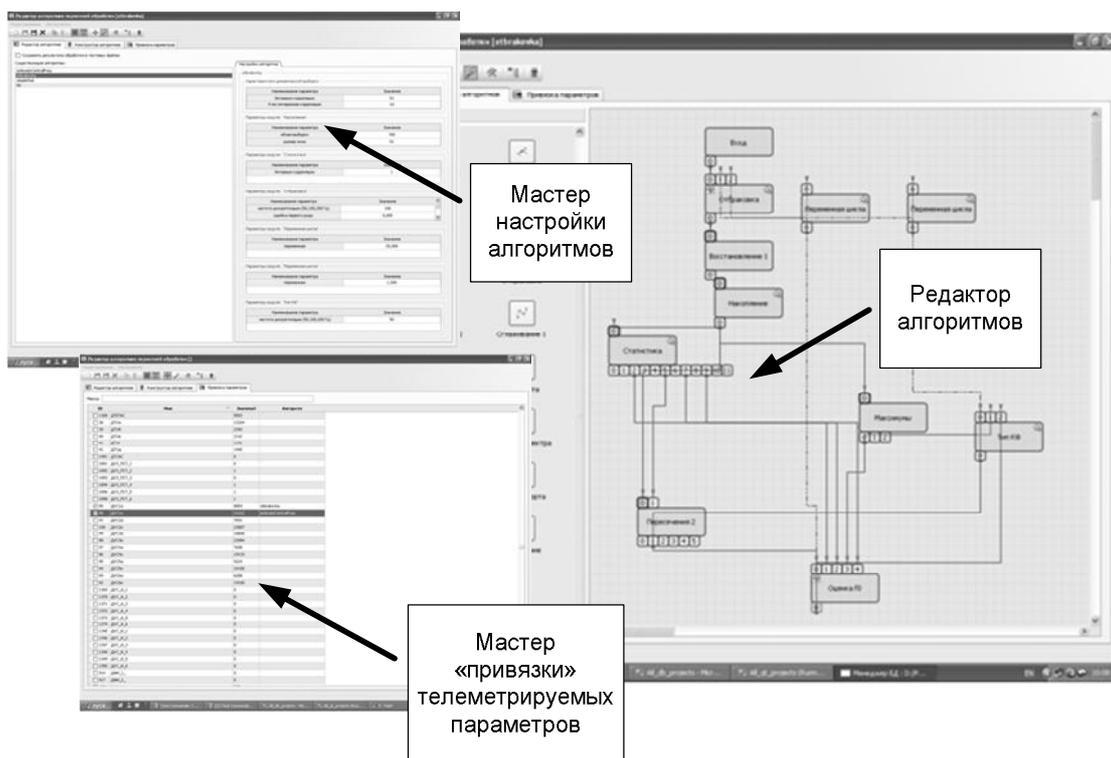


Рисунок 4.1 Общий вид «Конструктор алгоритмов» оперативной подготовки телеметрической информации

Использование Конструктора алгоритмов позволяет вести разработку алгоритмов предварительной подготовки телеметрической информации конечным пользователям, специалистам в области обработки, не знакомым с каким-либо низко или высокоуровневым языком программирования.

Согласно предложенной обобщенной схеме, алгоритм оперативной подготовки телеметрической информации представляет собой ориентированный граф, состоящий из вершин модулей-алгоритмов, связанных между собой информационными дугами.

Каждый модуль представляет собой реализацию некоторого алгоритма например, подсчета числа пересечений $n(H, T_a)$, оценивания моментных характеристик и т.д. Можно выделить ряд вершин-модулей:

- вершины, не имеющие входа: «Начало алгоритма» (инициализирует работу алгоритма), «Модули-константы»;

- вершины, из которых не исходит ни одна дуга: «Выходы» алгоритма.

На Рисунок 4.2 представлен внешний вид типичного модуля, применяемого для разработки алгоритмов предварительной подготовки телеметрической информации.

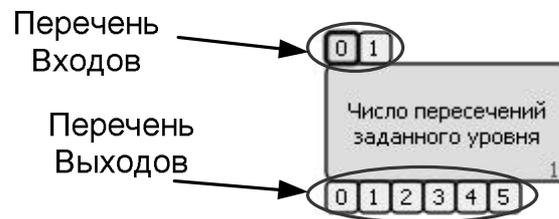


Рисунок 4.2 Типовой внешний вид модуля

Существуют два типа входов и выходов модуля:

- «Значение» - единичное значение, характеризующее некоторое свойство телеметрируемого процесса: математическое ожидание $m = M[\xi(t)]$, центральная частота f_0 , число пересечений $n(H, T_a)$ и т.д.

- «Массив» - некоторый вектор данных, длина которого может быть и нулевой: гистограмма плотности вероятности $p(\xi)$, спектральная плотность $S_\xi(\omega)$, и т.д.

На вход определенного типа может быть подан выход с иного модуля только того же типа.

Помимо входов и выходов, модуль может так же иметь некоторые дополнительные настройки, формируемые пользователем перед началом работы алгоритма, исходя из эмпирических сведений об обрабатываемом процессе и задач, решаемых алгоритмом в целом. К устанавливаемым свойствам можно отнести характеристики, такие как, например, число интервалов группировки и способ их расчета для гистограммы и т.д.

При выборе программных средств для реализации «Конструктора алгоритмов» были приняты во внимание следующие соображения [66]:

- операционная система, под управлением которой функционирует проектируемый комплекс автоматизированного анализа, должна быть реального времени;

- уровень мобильности должен позволять перенос с одной платформы на другую с минимальными временными затратами;

- интегрируемость с другими смежными (как в горизонтальном, так и вертикальном направлении) системами;

- основные тенденции развития рынка программного обеспечения, которые позволяют обеспечить жизнеспособность и развитие разрабатываемой системы.

Главным среди всех перечисленных требований является, безусловно, требование реального времени. В настоящее время на рынке присутствует довольно много разнообразных операционных систем жесткого реального времени, в первую очередь из них хотелось бы выделить [30, 44, 104]:

- QNX, разработка Quantum Software Systems (Канада), в настоящее время доступна версия 6.5.0, выпущенная 01 июля 2010 года;

- VxWorks, разработка Wind River Systems (США), последняя версия 6.7 февраль 2009 года;

- WindowsCE, разработка Microsoft (США), последняя версия 6.0 R3 22 сентября 2009;

- RTLinux, семейство операционных систем, основанных на ядре Linux.

Поэтому при выборе языка программирования и дополнительных библиотек необходимо учитывать возможность их безболезненного переноса в большинство перечисленных операционных систем [10].

В тоже время необходимо отметить, что при использовании операционных систем реального времени возникают следующие трудности:

- подавляющее большинство конечных пользователей, как правило, не имеет опыта и навыков работы с какой-либо операционной системой жесткого реального времени;

- отсутствие в этих системах общеупотребительного программного обеспечения, предназначенного для работы с тем или иным видом документации.

Поэтому необходимо учесть то, что разработка и сопровождение непосредственно алгоритмов обработки телеметрической информации будет осуществляться в какой-либо из распространенных desktop систем, таких как:

- разработанных Microsoft (США): Windows XP, Windows Vista и Windows 7;

- разработанных в рамках проекта GNU, на базе ядра Linux: Red Hat Enterprise Linux, Fedora, Debian, Ubuntu и т. д.

Исходя из выше перечисленных требований, в качестве языка программирования был выбран язык C/C++ (ISO/IEC Standard C++). Компиляторы данного языка присутствуют во всех перечисленных системах, причем во всех них можно использовать единый некоммерческий компилятор разработанный в рамках проекта GNU, GNU Compiler Collection (GCC), распро-

страняемый фондом свободного программного обеспечения (FSF) на условиях GNU GPL и GNU LGPL.

В качестве дополнительных библиотек для работы с графовыми структурами была использована библиотека Boost (последняя версия 1.45.0 19 ноября 2010 года), свободно распространяемая по лицензии Boost Software License вместе с исходным кодом. Библиотека Boost написана на ISO/IEC Standard C++ и компилируется большинством современных компиляторов [90].

Для создания пользовательского графического интерфейса использовалась кросс-платформенная библиотека Qt (последняя версия 4.7.2 01 марта 2011 года), распространяемая как под коммерческой, так и под свободными лицензиями GNU GPL и GNU LGPL. Использование Qt библиотеки позволяет безболезненно переносить разработанный «Конструктор алгоритмов» из MS Windows в Linux [6, 7, 120, 123].

4.2 Настройка основных процедур специального программного обеспечения

4.2.1 Процедура динамического формирования выборки

Практика разработки алгоритмов оперативной обработки телеметрической информации показывает, что для оценивания характеристик телеметрируемых процессов $\xi(t)$ предварительно необходимо сформировать выборку заранее заданного объема N или длительности T_a . Если время поступления значений постоянно и равно $\Delta t = 1/F_0$, где F_0 - частота дискретизации, то длительность выборки равна $T_a = N/F_0$. Таким образом, задание объема или длительности выборки приводит к эквивалентным результатам. Длительность интервала анализа T_a телеметрируемого процесса определяется исходя из требуемой точности оценивания его характеристик (2.12).

Для отражения изменяющихся свойств телеметрируемого процесса следующая выборка получается из предыдущей путем ее сдвига на заранее определенное число значений ΔN или время ΔT_a . Для получения некоррелированных результатов величину смещения необходимо выбирать не меньше интервала корреляции (Рисунок 4.3).

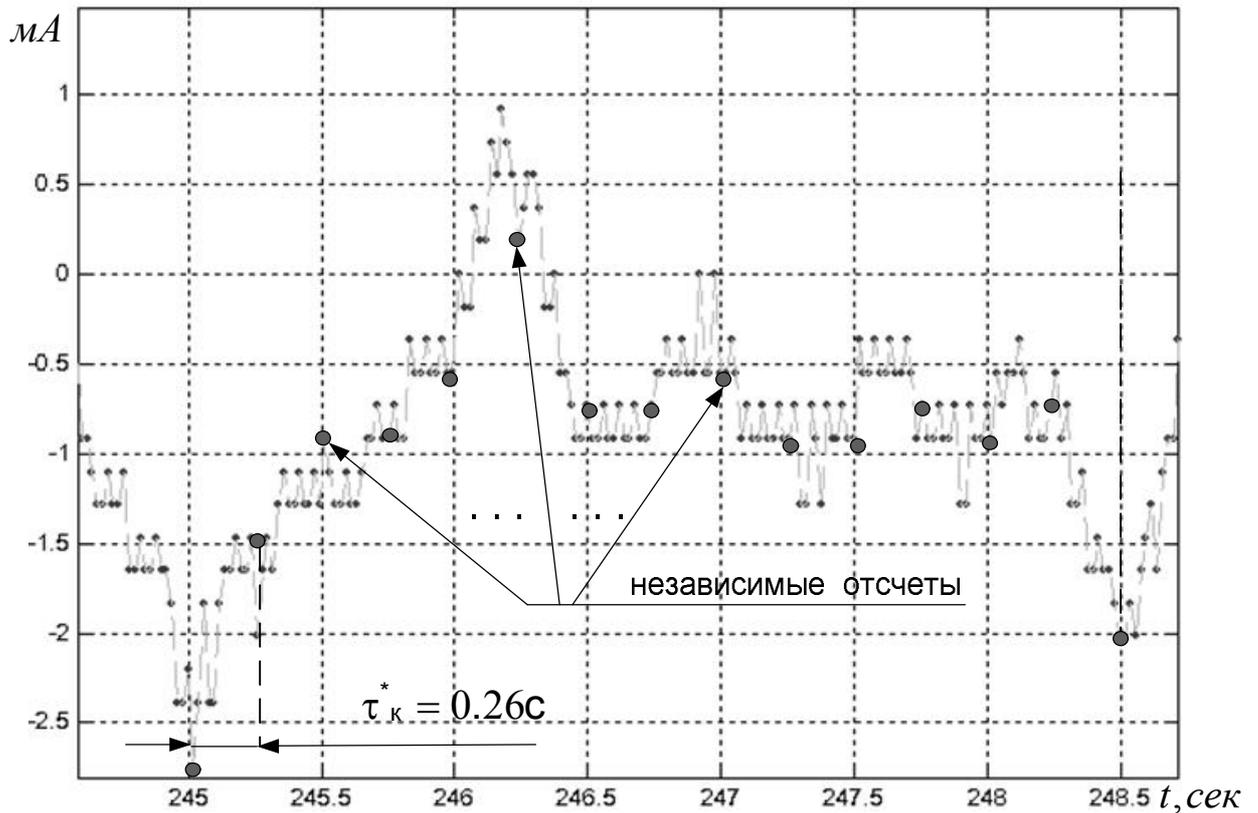


Рисунок 4.3 Графическая интерпретация формирования выборки по независимым отсчетам, полученной с датчика тока управления рулевыми машинами первой ступени; частота опроса 100 Гц.

На выходе процедуры динамического формирования выборки могут быть получены также и вспомогательные сведения о ней:

- время формирования выборки, соответствующее времени последнего отсчета;
- длительность выборки T_a , разница по времени между последним и первым значениями;
- количество отсчетов N .

4.2.2 Процедура оценивания характеристик превышения уровня

Процедура оценивания характеристик превышения уровня предназначена для получения характеристик временной структуры траектории телеметрируемого процесса, таких как:

- число пересечений $n(H, T_a)$;
- число положительных пересечений $n^+(H, T_a)$;
- число отрицательных пересечений $n^-(H, T_a)$;
- общее, суммарное, время превышения уровня t_H ;
- среднее время превышения уровня $t_{\text{сред } H}$;
- оценка средней частоты f_0^* (3.14), если в качестве уровня H взята оценка математи-

ческого ожидания $H = m_{\xi}^*$ (Рисунок 4.4);

- количество локальных максимумов n_{\max} ;
- количество положительных локальных максимумов, n_{\max} при $\xi(t) \geq 0$;
- количество отрицательных локальных максимумов, n_{\max} при $\xi(t) < 0$;
- количество локальных минимумов n_{\min} ;
- количество положительных локальных минимумов, n_{\min} при $\xi(t) \geq 0$;
- количество отрицательных локальных минимумов, n_{\min} при $\xi(t) < 0$;
- количество перегибов $n_{\max} + n_{\min}$;
- оценка второго нормированного спектрального момента $\lambda_2^*[S_{\xi}(f)]$.

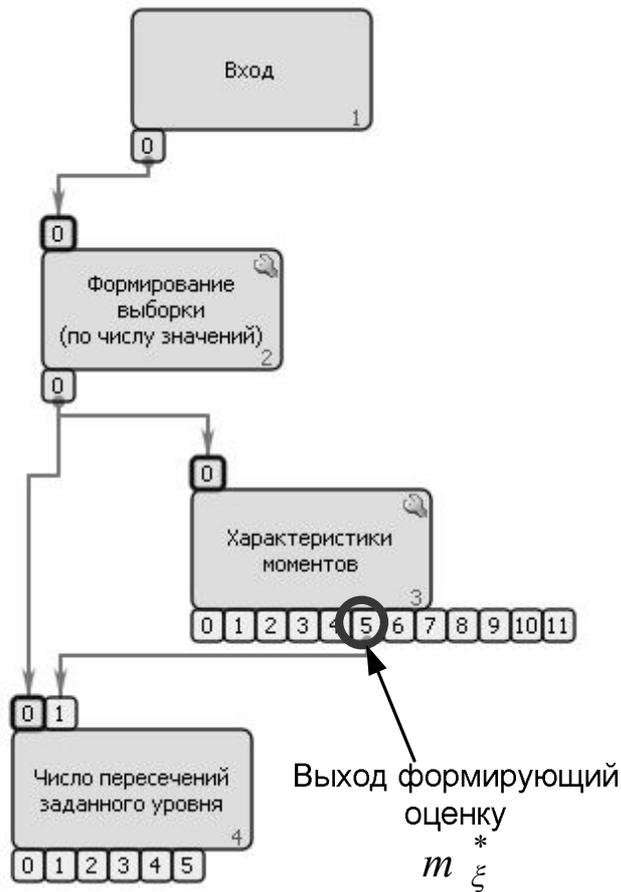


Рисунок 4.4 Реализация алгоритма оценивания средней частоты телеметрируемого процесса «счетчиком нулей»

Поскольку на вход процедуры поступает непрерывный случайный процесс $\xi(t)$, представленный множеством дискретных во времени и квантованных по уровню отсчетов $\{\xi_i\}$, то может возникать неоднозначность в трактовке пересечения траекторией $\xi(t)$ заданного уровня

H .

Действительно, для непрерывного процесса вероятность того, что $\xi(t)$ в заданный момент времени t_i примет значение H равна нулю $p\{\xi(t_i) = H\} = 0$. Однако опыт обработки телеметрической информации показывает, что ситуация, когда поступающие значения $\{\xi_i\}$ на протяжении длительного времени могут иметь постоянное значение $\xi(t_i) = \xi(t_{i+1}) + \dots + \xi(t_{i+n}) = H = const$, достаточно распространена. Поэтому необходимо рассмотреть все возможные случаи поведения значений $\{\xi_i\}$ в окрестностях H .

Всего может быть выделено четыре различных типа поведения траектории телеметрируемого процесса в окрестностях заданного уровня H :

$$\begin{cases} \xi(t_i) < H \\ \xi(t_{i+n+1}) > H \end{cases}, \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \xi(t_i) > H \\ \xi(t_{i+n+1}) < H \end{cases}, \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} \xi(t_i) > H \\ \xi(t_{i+n+1}) > H \end{cases}, \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \xi(t_i) < H \\ \xi(t_{i+n+1}) < H \end{cases}. \quad (4.4)$$

При выполнении условия (4.1) можно сказать, что траектория телеметрируемого процесса $\xi(t)$ пересекает заданный уровень H с $\xi'(t) > 0$ (Рисунок 4.5 А), т.е. имеется положительное пересечение. Аналогично, при выполнении условия (4.2) можно сказать, что траектория $\xi(t)$ пересекает заданный уровень H с $\xi'(t) < 0$ (Рисунок 4.5 Б), т.е. имеется отрицательное пересечение. При выполнении условий (4.3) или (4.4) пересечение траекторией $\xi(t)$ заданного уровня H не происходит (Рисунок 4.5 В, Г). Таким образом, алгоритм подсчета числа пересечений сводится к подсчету числа выполнений условий (4.1) и (4.2).

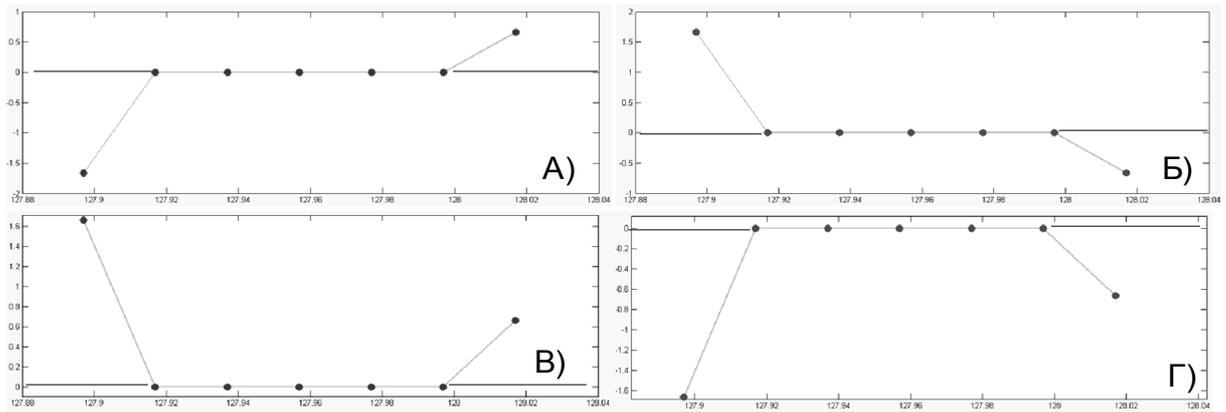


Рисунок 4.5 Варианты поведения траектории телеметрируемого процесса в «окрестностях» заданного уровня

Реализованный алгоритм подсчета числа пересечений отличается от алгоритма, предложенного Б. Кедемом [41], тем, что при выполнении условия (4.4), количество пересечений по Б. Кедему будет равно единице при $n = 1$ и двум если $n > 1$.

Процедура оценивания числа экстремальных значений траектории телеметрируемого процесса может быть реализована точно таким же образом, как и процедура подсчета числа пересечений, только вместо значений самого процесса на вход необходимо подавать значения его первой производной. Но в целях, упрощения структуры реализации был разработан отдельный модуль, реализующий одновременно дифференцирование и подсчет числа локальных максимумов. На вход процедуры должна подаваться выборка $\{\xi_i\}$ объемом не меньше трех значений.

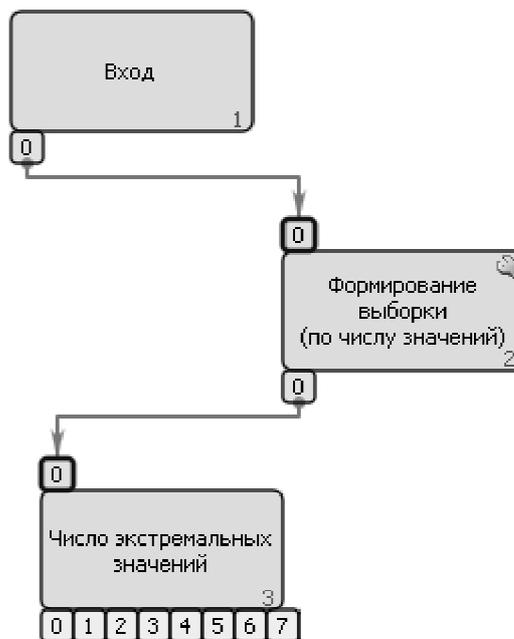


Рисунок 4.6 Реализация процедуры подсчета числа экстремальных значений телеметрируемого процесса

4.2.3 Процедура оценивания спектрально-корреляционных характеристик

Процедура оценивания спектрально-корреляционных характеристик предназначена для получения оценок средней частоты, эффективной ширины и формы (типа) спектра, а также длительности интервала корреляции.

В разработанном макете специализированного программного обеспечения процедура оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов может быть реализована двумя способами: традиционным, с использованием быстрых преобразований Фурье, и с использованием характеристик превышения уровня.

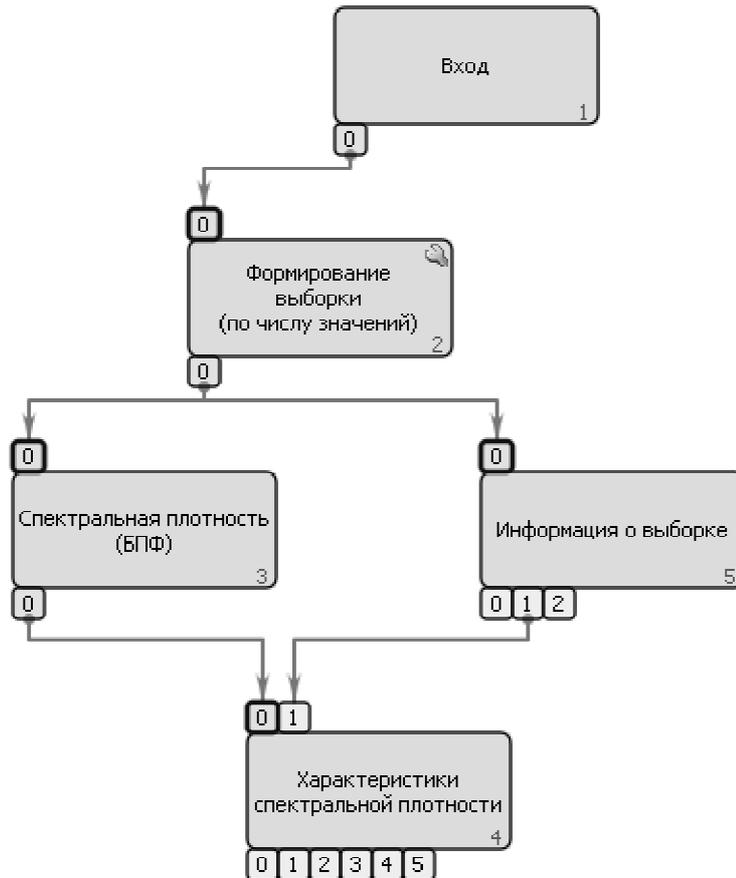


Рисунок 4.7 Реализация процедуры оценивания обобщённых спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов с использованием быстрых преобразований Фурье

При использовании быстрых преобразований Фурье процедура оценивания обобщённых спектрально корреляционных характеристик состоит из трёх этапов (Рисунок 4.7): формирование выборки заданного объёма или длительности, оценивание спектральной плотности, оценивание нормированных спектральных моментов (2.67) и (2.68). В качестве оценок центральной частоты и эффективной полосы частот принимаются оценки нормированных спектральных мо-

$$\text{ментов: } f_0^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i S_{\xi}(f_i) \text{ и } \Delta f_{\sigma}^{2*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - f_0^*)^2 S_{\xi}(f_i).$$

К достоинствам данной реализации можно отнести то, что никаких ограничений на класс обрабатываемых телеметрируемых процессов не накладывается.

С целью уменьшения дополнительных погрешностей, объём выборки, подаваемой на вход процедуры, должен выбираться кратным 2^n , тогда количество отсчётов при длительности анализа не менее $15\tau_k$ для процессов с частотой дискретизации 50, 100 и 200 Гц должно быть не меньше: 256, 512 и 1024.

Практическое применение процедуры оценивания обобщённых спектрально-корреляционных характеристик с использованием быстрых преобразований Фурье для оперативной обработки одновременно множества телеметрируемых параметров предъявляет высокие требования к вычислительной мощности рабочих станций, на которых осуществляется эта обработка. Поэтому для преодоления указанного недостатка вместо быстрых преобразований Фурье предлагается воспользоваться характеристиками превышения уровня.

Реализация процедуры оценивания обобщённых спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемого процесса состоит из следующих этапов (Рисунок 4.14):

- формирование выборки по числу отсчётов или длительности;
- оценивание характеристик моментов: математического ожидания и коэффициента эксцесса;
- подсчет числа пересечений «нулевого» уровня;
- оценивание числа локальных максимумов;
- вычисление характеристики и классификация процесса по типу спектра;
- оценивание центральной частоты (3.17), эффективной полосы частот (2.83)-(2.85) и длительности интервала корреляции.

Анализ результатов работы процедуры оперативного оценивания спектрально-корреляционных характеристик показывает, что получаемые оценки центральной частоты f_0^* с использованием (3.17), в отличие от оценки получаемой «счетчиком нулей» $f_{сн}^*$, достаточно близка к оценке $f_{БПФ}^*$, получаемой с использованием быстрых преобразований Фурье.

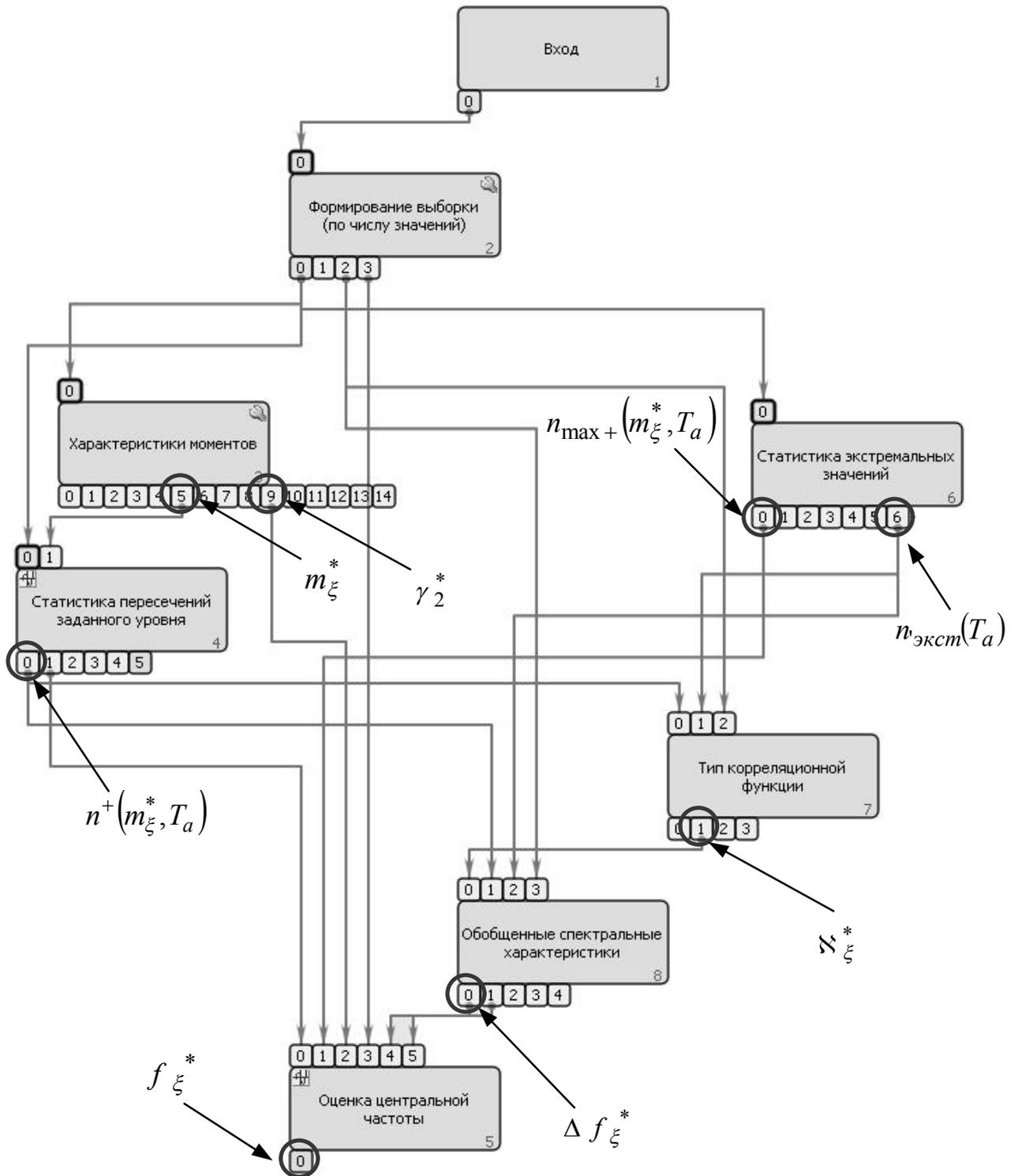


Рисунок 4.8 Реализация процедуры оперативного оценивания обобщённых спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов с использованием характеристик превышения уровня

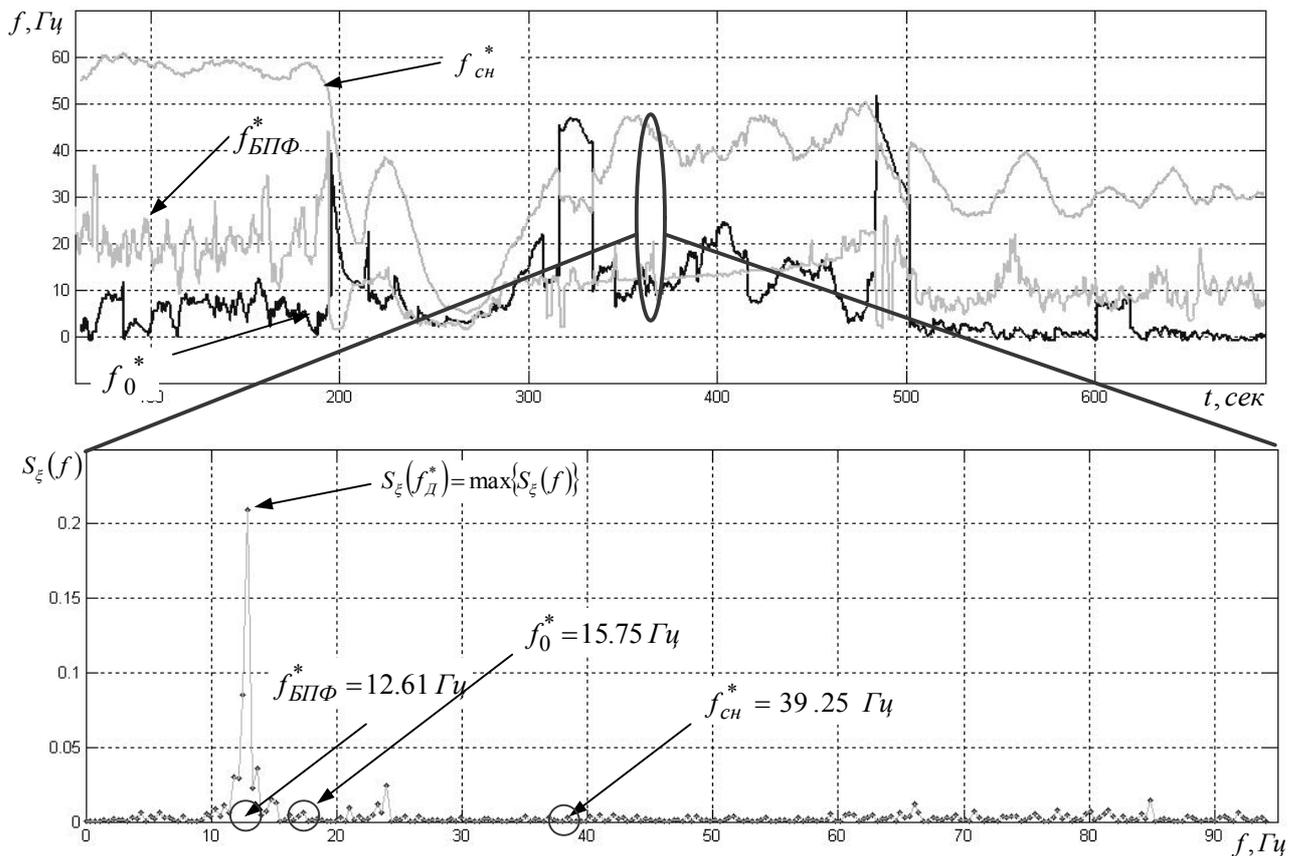


Рисунок 4.9 Результаты работы процедуры оперативного оценивания спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов

4.2.4 Процедура оценивания характеристик распределений телеметрируемых процессов

Процедура оценивания характеристик распределений телеметрируемых процессов предназначена для получения оценок начальных, центральных моментов распределения и оценок результирующей плотности вероятности по заданной выборке.

В процессе выполнения процедуры могут быть получены следующие характеристики телеметрируемого процесса:

- оценка математического ожидания m_{ξ}^* ;
- оценка дисперсии D_{ξ}^* ;
- оценка среднеквадратического отклонения $\sigma_{\xi}^* = \sqrt{D_{\xi}^*}$;
- оценка коэффициента асимметрии γ_1^* ;
- оценка коэффициента эксцесса γ_2^* ;
- оценка коэффициента контрэксцесса χ_{ξ}^* ;
- оценка коэффициента вариаций $v_{\xi}^* = \sigma_{\xi}^* / m_{\xi}^*$;

- оценка плотности вероятности $p^*(\xi)$.

Все характеристики моментов распределения по заданной выборке могут быть получены двумя способами: традиционным суммированием и с использованием характеристик превышения уровня.

Оценки математического ожидания $m_\xi^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i$, m_ξ^* , среднеквадратического отклонения $\sigma_\xi^{2*} = D_\xi^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - m_\xi^*)^2$, коэффициентов асимметрии $\gamma_1^* = \mu_3^*/\sigma_\xi^{3*}$, и эксцесса $\gamma_2^* = \mu_4^*/\sigma_\xi^{4*} - 3$, получаемые традиционным методом суммирования, являются смещёнными. Для компенсации этого смещения должны вводиться поправочные коэффициенты, зависящие от объема выборки. Величина дисперсии получаемых оценок γ_1^* и γ_2^* от объема выборки N составляет:

$$D[\gamma_1^*] = \frac{6(N-1)}{(N+1)(N+3)} \quad D[\gamma_2^*] = \frac{24N(N-2)(N-3)}{(N+1)^2(N+3)(N+5)}.$$

Реализация процедуры оценивания моментов одномерных распределений телеметрируемого процесса в разработанном макете специального программного обеспечения традиционными методами состоит из двух этапов (Рисунок 4.10): формирование выборки и, собственно, оценивание характеристик моментов суммированием.

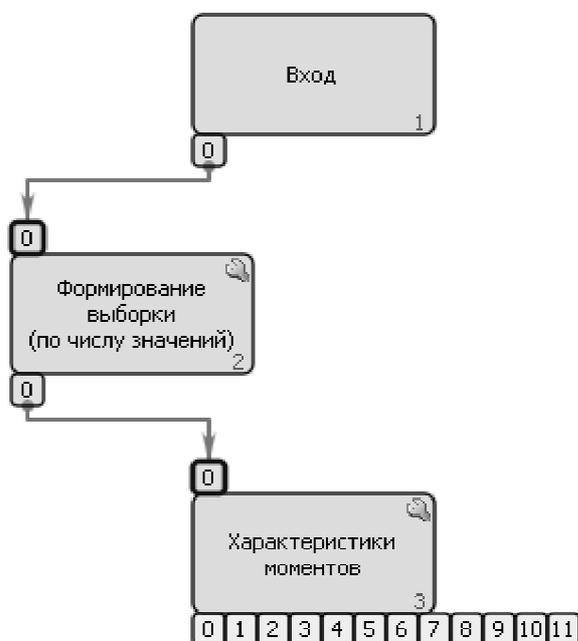


Рисунок 4.10 Реализация процедуры оценивания моментов одномерных распределений телеметрируемого процесса традиционным способом суммирования

Использование характеристик превышения уровня позволяет получать несмещенные оценки дисперсии, коэффициентов эксцесса и асимметрии в соответствии с (2.56), (2.57) и дис-

персии, получаемых оценок, зависит только от дисперсии числа пересечений $D[n^+(0, T_a)]$ (3.20). На вход процедуры необходимо подавать значения центральной частоты и эффективной ширины спектра телеметрируемого процесса. При этом ее реализация в разработанном макете специального программного обеспечения выглядит сложнее (Рисунок 4.11), чем при использовании алгоритма традиционного суммирования, и состоит из следующих этапов:

- формирования выборки;
- оценивания математического ожидания;
- подсчёта числа превышений на трёх уровнях и числа локальных максимумов;
- классификации телеметрируемого процесса по форме спектра;
- вычисление оценок γ_1^* и γ_2^* в соответствии с (2.56), (2.57).

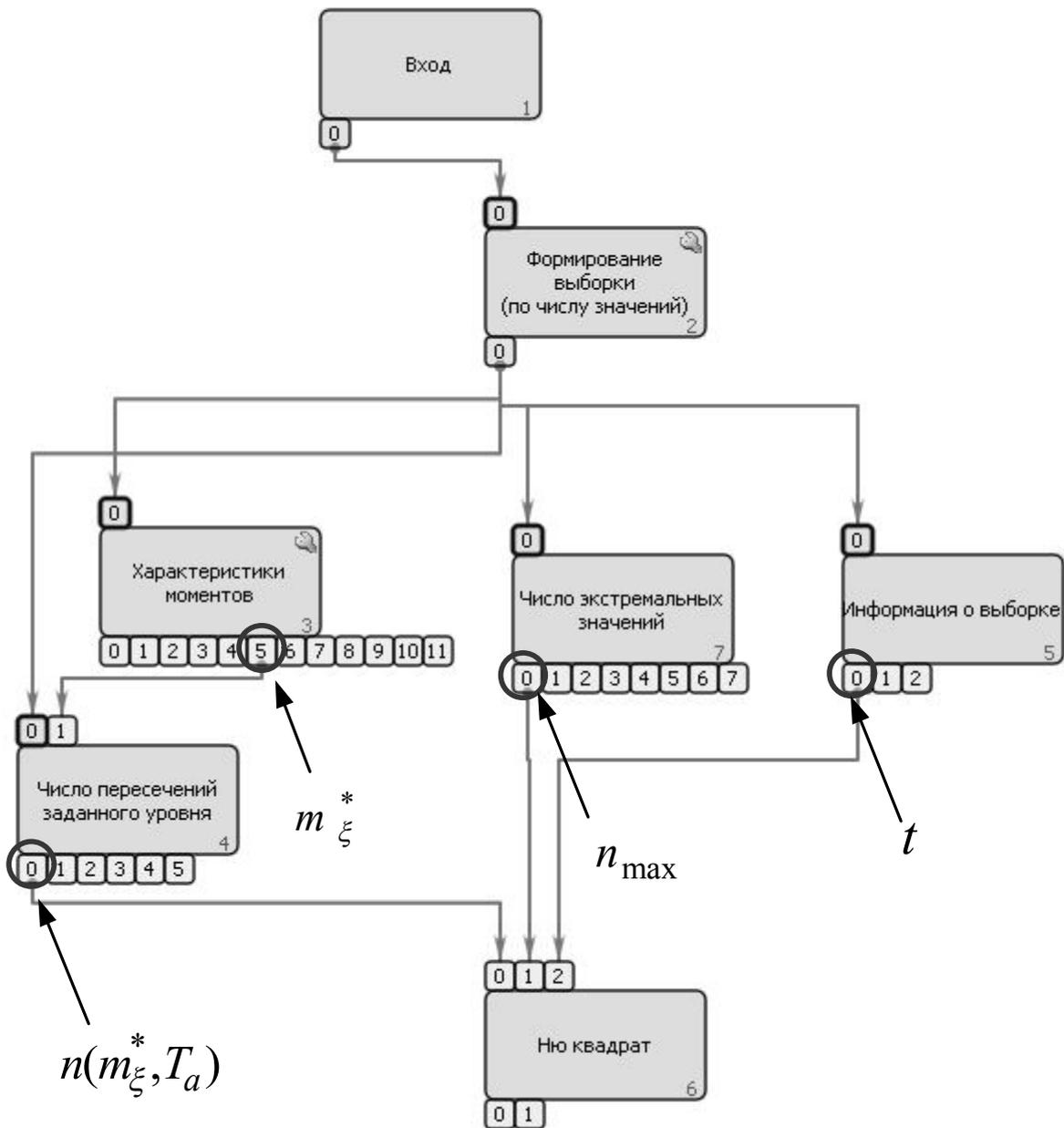


Рисунок 4.11 Реализация процедуры оценивания моментов одномерных распределений телеметрируемого процесса с использованием характеристик превышения уровня

Если в качестве оценок центральной частоты и эффективной ширины спектра на вход процедуры подать $f_0 = f_0^* = n^+(0, T_a)/T_a$ и $\Delta f_s = \Delta f_s^* = F_0/2$, то на выходе процедуры будут сформированы верхние оценки дисперсии, коэффициентов асимметрии и эксцесса, и тем самым косвенно можно оценить верхний уровень загрязнения телеметрируемого процесса.

Длительность или объём выборки, подаваемой на вход процедуры оценивания моментов одномерных распределений, целесообразно выбирать исходя из требуемой точности оценивания и спектрально-корреляционных свойств телеметрируемого процесса (2.12). При этом размер скользящего окна для получения независимых оценок необходимо выбирать не меньшим, чем длительность интервала корреляции. Дисперсия оценки эксцесса, в зависимости от типа спектра и объема выборки, составит:

Телеметрируемые процессы с «первым» типом спектра:	$D[\gamma_2^*] \approx \frac{4.16 N/F_0 + 8.96}{f_0^2 + (\Delta f_s)^2}$
Телеметрируемые процессы со «вторым» типом спектра:	$D[\gamma_2^*] \approx \frac{2.176 N/F_0}{f_0^2 + (\Delta f_s)^2}$
Телеметрируемые процессы с «третьим» типом спектра:	$D[\gamma_2^*] \approx \frac{7.68 N/F_0 + 3.136}{f_0^2 + (\Delta f_s)^2}$

Сравнение дисперсии оценок коэффициента эксцесса $D[\gamma_2^*]$ (Рисунок 4.12), полученных различными методами, показывает, что на интервале анализа $T_a = 15\tau_k = 3.9 \text{сек}$ дисперсия оценки γ_2^* , полученной с использованием характеристик превышений уровня, заметно меньше, чем при использовании традиционного метода суммирования.

Для оценивания результирующей плотности вероятности телеметрируемого процесса в разработанном макете специального программного обеспечения можно воспользоваться как традиционным методом гистограмм, так и методом с использованием характеристик превышения уровня (Рисунок 4.13).

Объём выборки, подаваемой на вход процедуры оценивания плотности распределения, должен составлять 2500-3000 отсчетов или иметь длительность не меньше 50, 25, 12 секунд для параметров с частотами опроса 50, 100 и 200 Гц соответственно.

Число интервалов группировки для метода гистограмм и число уровней подсчета числа превышений рекомендуется выбирать по критерию Новицкого (2.25) и всегда нечётным.

Оценка результирующей плотности вероятности, получаемая с использованием характеристик превышения является, несмещённой, более сглаженной и для её получения требуется меньшее число операций, чем при использовании традиционного метода гистограмм.

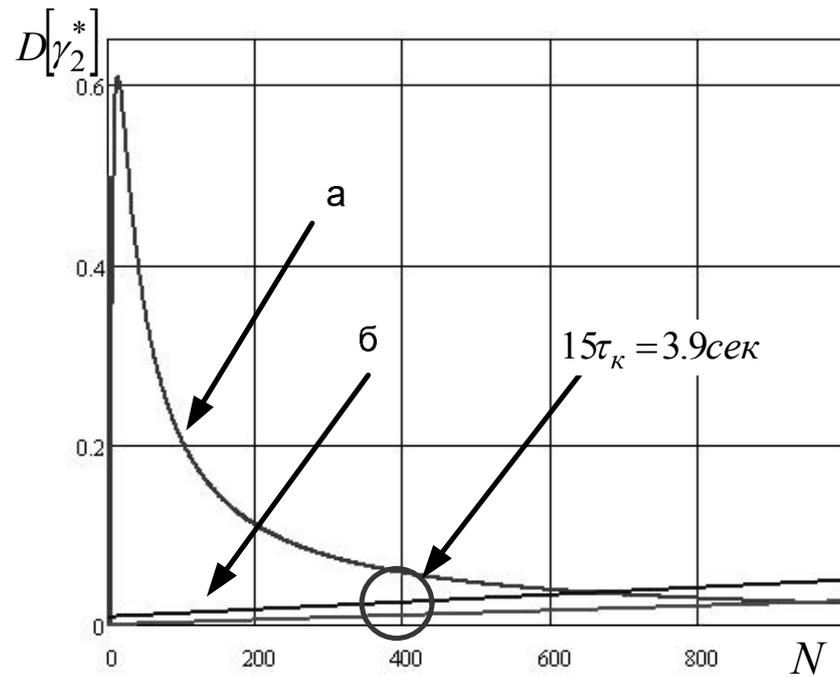


Рисунок 4.12 График изменения дисперсии оценки эксцесса в зависимости от объема выборки для параметра с частотой опроса 100 Гц а) традиционные методы б) с использованием характеристик превышения уровня (для процессов с различной формой спектра)

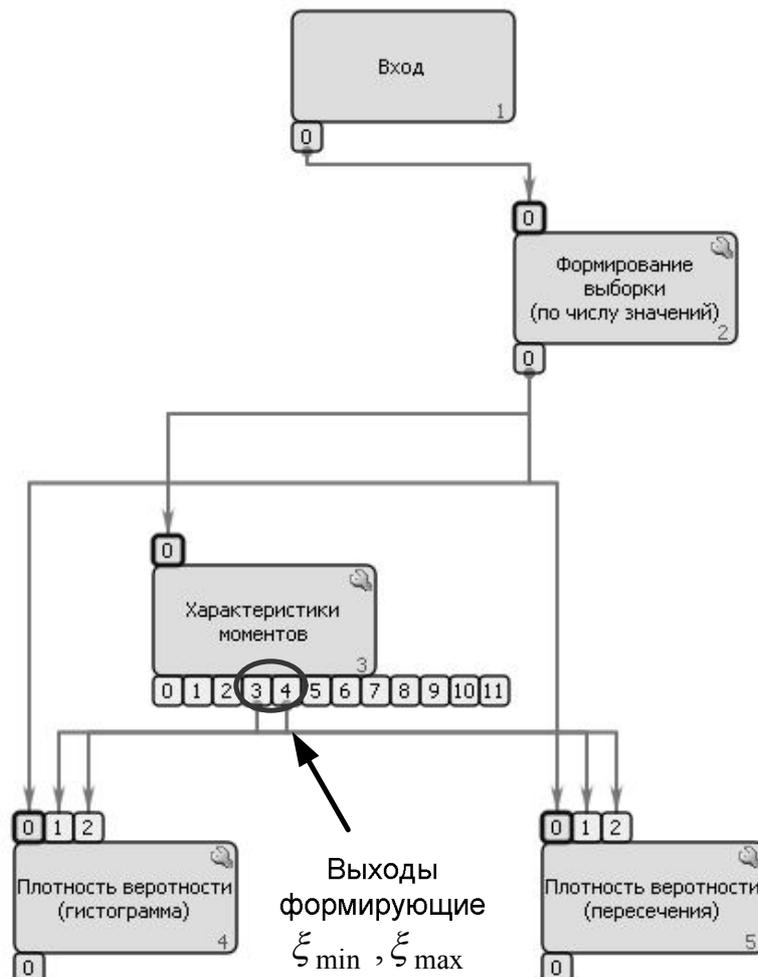


Рисунок 4.13 Реализация процедуры оценивания плотности по методу гистограмм и с использованием характеристик превышения уровня

4.3 Проверка функционирования макета специального программного обеспечения по телеметрической информации летных испытаний ракеты-носителя «Союз-2»

4.3.1 Достоверность результатов работы

Экспериментальная проверка достоверности результатов работы реализации алгоритма оперативного обнаружения и исключения результатов измерений (Рисунок 3.1), содержащих аномальную погрешность, осуществлялась путем обработки телеметрической информации, полученной при летных испытаниях ракеты-носителя «Союз-2» с космическими аппаратами «Cotot» и «Персона». В качестве источника информации использовались двигательные установки блоков «А» и «И», а также системы стабилизации углового движения ракеты-носителя.

В реализации алгоритма обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность (Рисунок 4.14), можно выделить три основных этапа:

- по поступающим значениям вычисляется конечная разность; полученное значение сравнивается с динамически формируемым порогом, величина которого зависит от спектрально-корреляционных свойств процесса; по результату сравнения принимается решение: является ли текущий результат аномальным, либо нет;

- обнаруженные результаты измерений, содержащие аномальную погрешность, исключаются из дальнейшей обработки, либо могут быть восстановлены по ранее полученным «хорошим» значениям различными методами;

- после получения выборки заранее определенной длительности производится оценивание моментов и спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемого процесса, рассчитывается новое значение порога обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность.

Анализ экспериментальных результатов показал, что предложенный подход позволяет оперативно проводить оценивание моментных и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик в двухкомпонентном сигнале даже при малых соотношениях сигнал/шум.

На основе проведенных экспериментальных исследований по обработке функциональных и функционально-диапазонных телеметрируемых параметров с частотами опроса 50, 100 и 200 Гц были выработаны следующие предложения по этапам подготовки исходной информации для автоматизированного анализа в реальном масштабе времени:

- оценивание калибровочных уровней локальных коммутаторов, в составе которых передаются аналоговые параметры, что позволяет удалять мультипликативную компоненту результирующей погрешности;

- автоматическое оценивание моментных и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов и их классификация по типу спектра;

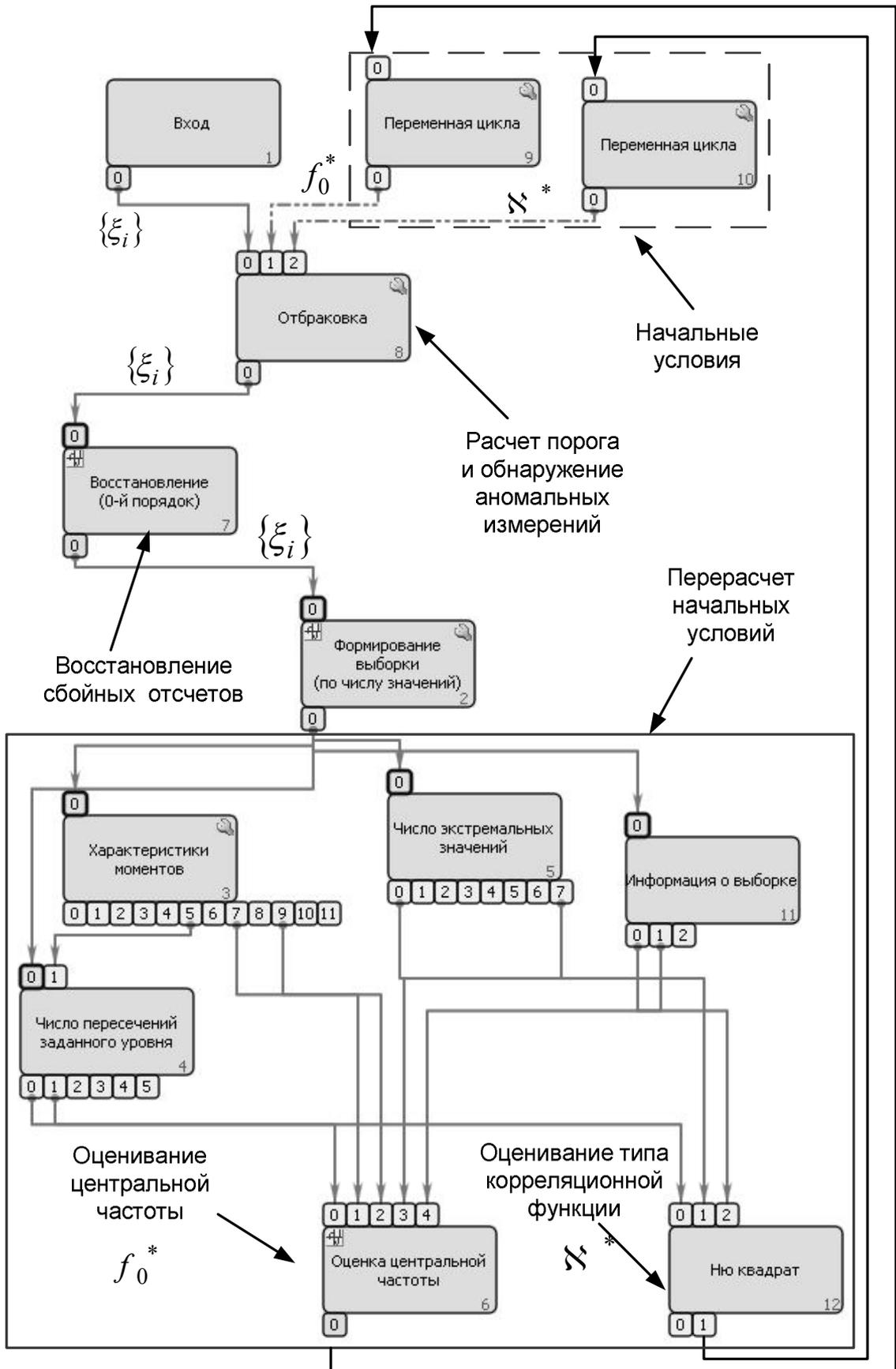


Рисунок 4.14 Реализация алгоритма обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность

- автоматический расчет решающего правила по отбраковке результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, с использованием конечно-разностной фильтрации, что позволяет оценивать достоверность отбраковки.

Результаты экспериментальных исследований показали возможность повышения достоверности исходной телеметрической информации по дисперсии в 10^3 - 10^6 раз, при этом результирующая плотность распределения случайной составляющей телеметрируемого параметра является Гауссовой [35, 36, 39].

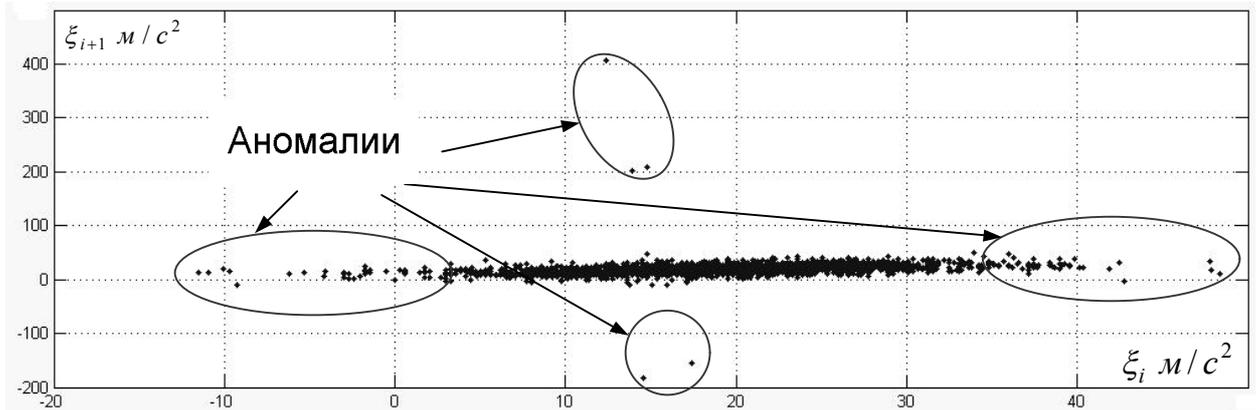


Рисунок 4.15 Псевдофазовый портрет телеметрируемого процесса с датчика осевого ускорения блока «И» ракеты-носителя «Союз-2» до применения алгоритма обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность

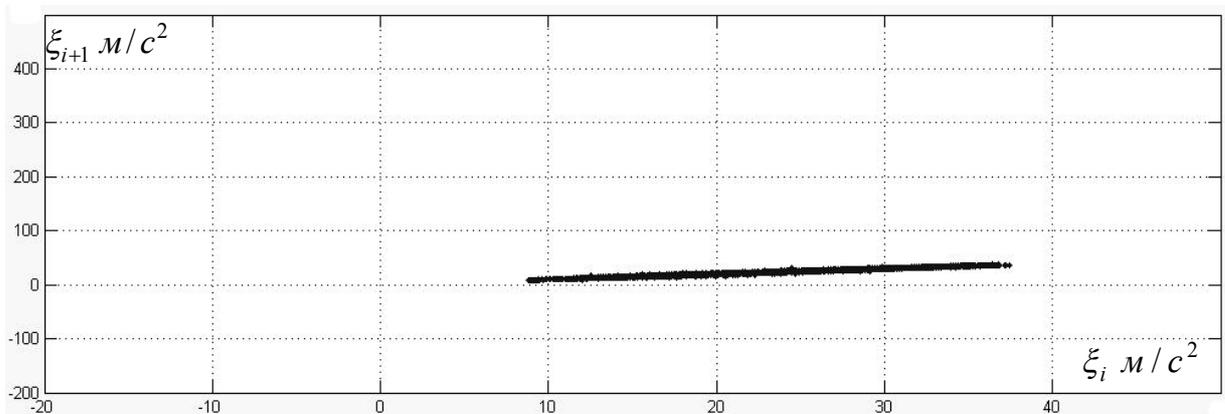


Рисунок 4.16 Псевдофазовый портрет телеметрируемого процесса с датчика осевого ускорения блока «И» ракеты-носителя «Союз-2» после применения алгоритма обнаружения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность

4.3.2 Робастность результатов работы

Экспериментальная проверка устойчивости результатов, получаемых при использовании разработанного алгоритма совместного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины α -загрязнения телеметрируемого процесса (Рисунок 3.7), осуществлялась путем обработки телеметрической информации, полученной при летных испытаниях ра-

кеты-носителя «Союз-2» с космическими аппаратами «Corot» и «Персона». В качестве источника информации использовались двигательные установки блоков «А» и «И», а также системы стабилизации углового движения ракеты-носителя.

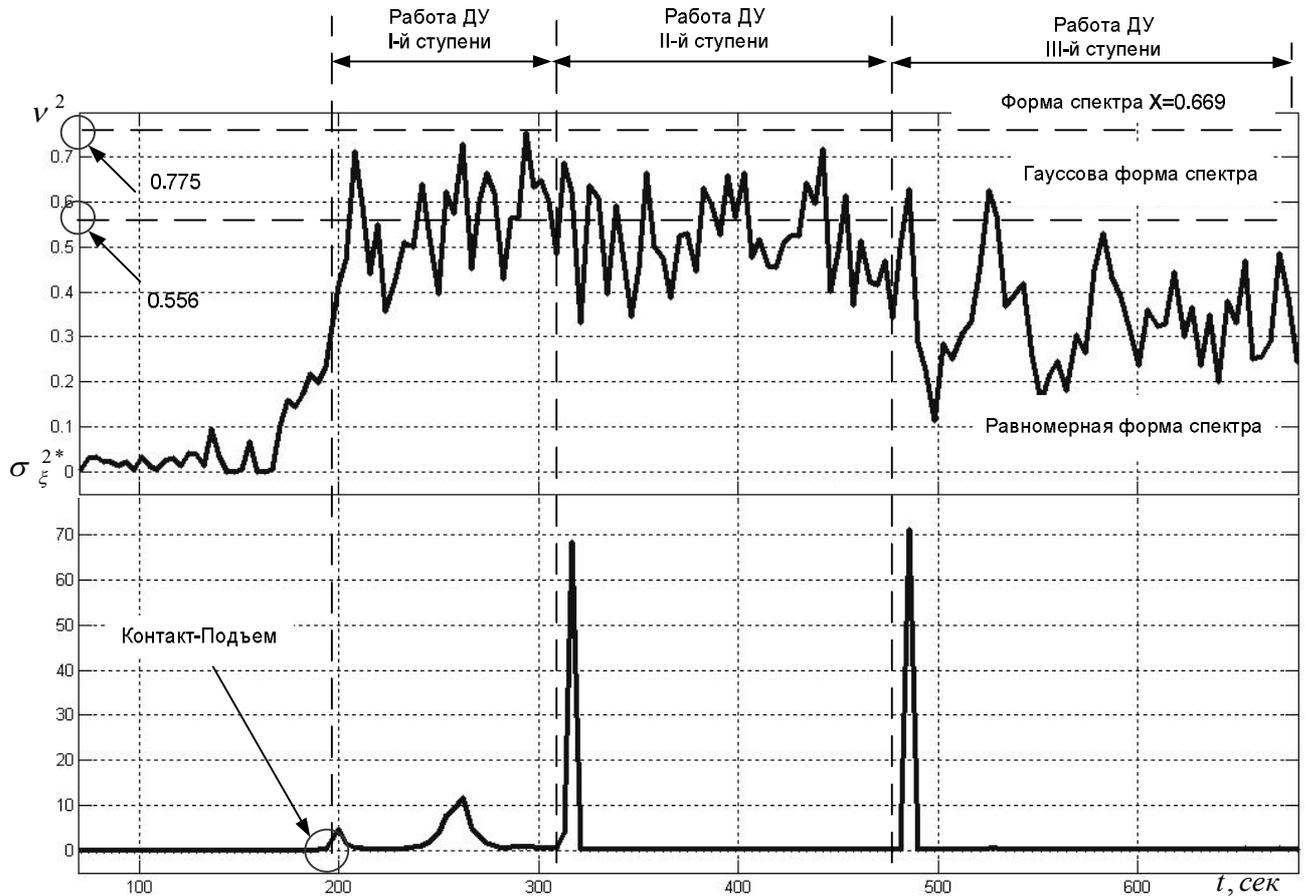


Рисунок 4.17 Сравнение графиков значения метрики (вверху) и дисперсии (внизу) телеметрируемого процесса с датчика осевого ускорения блока «И» ракеты-носителя «Союз-2»

Анализ результатов (Рисунок 4.17) показывает, что получаемые оценки, за счет использования характеристик превышения уровня, инвариантны к дисперсии телеметрируемого процесса.

4.3.3 Временная сложность разработанного математического обеспечения

Показатель оперативности разработанных алгоритмов выражается численно через отношение времени набора выборки к времени ее обработки и характеризует возможности алгоритма по обработке телеметрируемых параметров в потоковых вычислительных системах реального времени:

$$W_{on} = \frac{t_{нв}}{t_{об}} = K_{on} \frac{F_{выч}}{F_{оп}}, \quad (4.5)$$

где $t_{нв}$ - время, необходимое для поступления выборки, $t_{об}$ - время, необходимое для обработки выборки, K_{on} - коэффициент оперативности, $F_{выч}$ - быстродействие вычислительной системы, $F_{оп}$ - частота поступления данных.

Первым этапом функционирования как традиционных, так и разработанных алгоритмов будет этап формирования выборки, по которой производится оценивание характеристик телеметрируемого процесса. Процедура формирования выборки сводится к элементарным операциям работы с памятью, поэтому можно считать, что время на формирование выборки заданного объема зависит исключительно от темпа поступления входной информации. Если время формирования выборки достаточно велико ($t_{не} \gg t_{об}$), то изменение показателя оперативности при применении различных алгоритмов будет незаметно, поэтому будем считать, что время формирования выборки много меньше времени обработки ($t_{не} \ll t_{об}$). Таким образом, сравнение показателей оперативности $W_{он} \in W$ разработанных алгоритмов оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик, использующих характеристики превышения уровня с традиционными, можно осуществить путем сравнения числа элементарных операций, требующихся для получения результатов на выборках одинакового объема N .

При оценивании обобщенных спектрально-корреляционных характеристик с помощью традиционных алгоритмов, использующих быстрые преобразования Фурье, основные временные затраты приходится на проведение большого количества операций комплексного сложения и умножения и составляют:

- оценивание спектра: $N \log_2(N)$;
- оценивание центральной частоты (первого спектрального момента): $\frac{N}{2}$ операций сложения и одна операция деления;
- оценивание эффективной полосы частот (второго спектрального центрального момента): $\frac{N}{2}$ операций сложения, вычитания и возведения в квадрат, плюс одна операции деления.

Таким образом, общее число операций требующихся для оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик для выборки объемом N составляет (единичные операции опущены):

$$N_{\text{опф}} = N(2 + \log_2(N)). \quad (4.6)$$

При оценивании характеристик моментов одномерных распределений с помощью традиционных алгоритмов временные затраты приходится на проведение большого количества операций сложения и умножения и составляют:

- оценивание математического ожидания: N операций сложения и одна деления;
- оценивание дисперсии: N операций сложения, вычитания и возведения в квадрат плюс одна операция деления;

- оценивание коэффициента асимметрии: N операций сложения и умножения плюс одна операция деления;

- оценивание коэффициента эксцесса: N операций сложения и умножения плюс одна операция деления;

Таким образом, общее число операций, требующихся для оценивания характеристик моментов для выборки объемом N , составляет (единичные операции опущены):

$$N_{\text{мом}} = 8N. \quad (4.7)$$

Подсчет числа пересечений заданного уровня требует при использовании функторов и указателей на функции N логических проверок условия смены знака значениями производной телеметрируемого процесса. Расчет числа локальных максимумов требует $2N$ логических проверок смены знака первой разности. Вычисление характеристики V^2 сводится к одной операции деления, одной операции умножения и одной операции сложения. Таким образом, для вычисления обобщенных спектральных характеристик с использованием характеристик превышения уровня количество операций составляет (единичные операции опущены):

$$N_{\text{скпу}} = 7N, \quad (4.8)$$

а для алгоритма оценивания моментных характеристик:

$$N_{\text{мту}} = 6N. \quad (4.9)$$

Анализ реализаций разработанного алгоритма совместного оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины загрязнения телеметрируемого процесса показывает (**Ошибка! Неверная ссылка закладки.**), что использование характеристик превышения уровня позволяет в 1.95 сократить число элементарных операций при выполнении алгоритма по сравнению с использованием традиционных методов (суммирования и быстрых преобразований Фурье).

Таблица 4.1 Перечень телеметрируемых параметров двигательной установки 1-й и 2-й ступеней ракеты-носителя

Алгоритм	Количество операций	Количество операций на интервале анализа $T_a = 15 \tau_k = 3.9$ сек Частота опроса 200 Гц
Спектральный анализ с использованием БПФ	$N(2 + \log_2 N)$	4590
Оценивание моментных характеристик одномерных распределений способом суммирования	$8N$	6120
Совместное оценивание обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины загрязнения	$N(8 + \log_2 N)$	13180
Оценивание спектрально-корреляционных характеристик с использованием характеристик превышения	$7N$	5355
Оценивание моментных характеристик с использованием статистики выбросов на трех уровнях	$6N$	8858
Совместное оценивание спектрально-корреляционных характеристик и величины загрязнения с использованием характеристик превышения	$9N$	6759

Выводы по главе 4

1. Использование математического аппарата теории выбросов позволяет выделять регулярные изменения и оценивать моментные и спектрально-корреляционные характеристики телеметрируемых процессов в реальном масштабе времени, что позволяет делать предварительные заключения о характере информационных процессов на стадии сбора данных.

2. Экспериментальная проверка качества работы структурно-параметрического алгоритма оперативного обнаружения и исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, осуществлялась путём обработки телеметрической информации, полученной в ходе испытаний ракеты-носителя «Союз-2» с космическим аппаратом «Corot» и «Персона». В качестве объекта информации использовались двигательные установки блоков «А», «И», а также системы стабилизации углового движения ракеты-носителя. Как показал предварительный анализ именно эта информация, особенно телеметрическая информация канала не-

посредственной передачи с космическим аппаратом «Персона» в качестве полезной нагрузки ракеты-носителя, обладала длительными участками с содержанием аномальных погрешностей.

3. При проведении экспериментальных исследований по обработке функциональных и функционально-динамических телеметрических параметров с частотой опроса 50, 100 и 200 Гц было установлено, что процесс их обработки должен включать следующие этапы:

- оценивание калибровочных уровней локальных коммутаторов, в составе которых передаются аналоговые параметры, позволяет удалять измерительную информацию, подвергшуюся нелинейным искажениям в канале передачи;

- автоматического оценивания характеристик уровня α — загрязнения и спектрально-корреляционных характеристик функциональных параметров, с использованием характеристик превышения уровня и формирования метрического пространства для их классификации по форме спектра;

- формирования решающего правила по обнаружению и исключению результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, с использованием многоуровневой конечно-разностной фильтрации, позволяет оценивать достоверность результатов первичной обработки поступающей телеметрической информации.

4. Результаты экспериментальных исследований показали возможность повышения достоверности и оперативности заключений о контролируемых событиях, протекающих на борту ракеты-носителя «Союз-2», оцененными введенными в работу показателями качества:

- уменьшением приведенной дисперсии аномальной погрешности в выборке на выходе по сравнению со входом порядка в $10^3 - 10^6$ раз;

- увеличением оперативности обработки телеметрической информации разработанным алгоритмом совместного оперативного оценивания обобщенных спектрально-корреляционных характеристик и величины α — загрязнения телеметрируемого процесса за счет использования математического аппарата теории выбросов в 1.95 по сравнению с традиционными алгоритмами.

5. Проведенный анализ существующих методов повышения достоверности и качества позволил сформировать обобщенную схему программы оперативной подготовки телеметрической информации, позволившую формализовать подход к проектированию и разработке алгоритмов повышения ее достоверности и качества. Ее использование позволило реализовать специализированное программное обеспечение в составе программного комплекса автоматизированной подготовки исходных данных, разработанного ЗАО «СКБ Орион», апробация которого была проведена в рамках выполнения ОКР «Плесецк», «Русь-М» и НИР «Телеприбор».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложены решения актуальной научно-технической задачи по разработке моделей и алгоритмов структурно-параметрической обработки телеметрической информации космических средств, позволяющих на основе учета влияния формы плотности распределений и формы спектра телеметрируемого процесса для оценивания обобщенных спектральных корреляционных характеристик повысить оперативность обработки телеметрической информации и устойчивость алгоритмов обработки на фоне флуктуационных помех. В процессе решения данной задачи были получены следующие результаты:

1. Исследованы условия формирования и систематизированы основные особенности телеметрируемых процессов в комплексах автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств.

2. Проведен системный анализ результатов исследований наиболее информативных телеметрируемых процессов, протекающих на борту ракеты-носителя «Союз-2». Выделены особенности описания и анализа информационных процессов, телеметрируемых с бортовых систем ракеты-носителя.

3. Разработана и адаптирована модель телеметрируемых процессов для комплексов автоматизированного анализа телеметрической информации космических средств.

4. Разработан алгоритм совместного оперативного оценивания моментов распределения, спектрально-корреляционных характеристик и уровня загрязнения телеметрируемых процессов с использованием характеристик «превышения уровня».

5. Разработан структурно-параметрический алгоритм исключения результатов измерений, содержащих аномальную погрешность, с адаптивно изменяемым порогом обнаружения, зависящим от формы плотности вероятности, спектрально-корреляционных характеристик и уровня загрязнения и телеметрируемого процесса.

6. Повышена устойчивость алгоритмов обработки телеметрической информации за счет использования характеристик временной структуры траектории телеметрируемого процесса, инвариантных к величине дисперсии флуктуационных помех, присутствующих в реальной помеховой обстановке.

7. Разработан макет специального программного обеспечения структурно-параметрической оперативной обработки телеметрической информации ракет-носителей типа «Союз-2».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абезгауз Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам / Абезгауз Г.Г., Тронь А.П. Копенкин Ю.Н., Коровина И.А. – М: Воениздат, 1970. - 536 с.
2. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям: Пер. с англ. / Абрамовиц М., Стиган И. – М:Наука, 1979. - 832 с.
3. Авдеев Б.Я Адаптивные телеизмерительные системы / Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М. под ред. Фремке А.В. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
4. Айвазян С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / Айвазян С.А. Мхитарян В.С. – М: Юнити, 1998. - 1022 с.
5. Анго А. Математика для электро и радиоинженеров / Анго А. – М.:Наука, 1964. - 722 с.
6. Бланшет Ж. Qt3 программирование GUI на C++ / Бланшет Ж., Саммерфилд М.- М.: Кудиц-образ, 2005. - 448 с.
7. Бланшет Ж. Qt4 программирование GUI на C++ / Бланшет Ж., Саммерфилд М.- М.: Кудиц-образ, 2008. - 736 с.
8. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: Пер с англ. / Бендат Дж., Пирсол А. - М: Мир, 1989. - 540 с.
9. Боровков А.А. Теория вероятностей / Боровков А.А. – М: Наука, 1976. - 352 с.
10. Брэдфорд Э. Кроссплатформенные приложения для Linux и Windows. Для профессионалов / Брэдфорд Э. Може Л. – СПб: Питер, 2003. - 672 с.
11. Булинский А.В., Теория случайных процессов / Булинский А.В., Ширяев А.Н. – М: Физматлит, 2004. - 408 с.
12. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика / Ван дер Варден Б.Л. – М:Ин. Лит., 1960. - 436 с.
13. Ванник В.Н., Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения) / Ванник В.Н., Червоненкис А.Я – М: Наука, 1974. - 416 стр.
14. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов / Вентцель А.Д. – М: Наука. Физматлит, 1996. - 400 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука, 1969. - 576 с.
16. Волгин В.В. Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления. Б-ка по автоматике вып. 600 / Волгин В.В., Каримов Р.Н. – М.: Энергия 1979. - 80 с.
17. Володин И.Н. Лекции по теории вероятности и математической статистике / Володин И.Н. – Казань, 2004. - 286 с.
18. Гихман И.И. Введение в теорию случайных процессов / Гихман И.И., Сокороход А.В. – М: Наука, 1977. - 568 с.

19. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов. Справочник / Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. – М: Радио и связь, 1985 - 312 с.
20. Грибанов Ю.И. Спектральный анализ случайных процессов / Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. – М: Энергия, 1974. - 240 с.
21. Деменков Н.П. Методика сравнительного анализа SCADA-систем / Деменков Н.П. // Приборы и системы управления. – 1998. - № 10. – С. 39-42.
22. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложение: Пер. англ. / Дженкинс Г., Ваттс Д. – М: Мир 1971, 318 с.
23. Дмитриев А.К. Идентификация и техническая диагностика / Дмитриев А.К. Юсупов Р.М. – М: Из-во МО СССР, 1987. - 522 с.
24. Довбета Л.И. Основы теоретической метрологии: Учеб. пособие / Довбета Л.И. Лянчев В.В. Сирая Т.Н. под. Ред. Лячнев В.В. – Спб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. - 292 с.
25. Евгеньев Г.Б. Модели вместо алгоритмов. Смена парадигмы разработки прикладных систем / Евгеньев Г.Б. // Информационные технологии. – 1999. - № 3. – С. 38-44.
26. Евтихеев Н.Н. Измерения электрических и не электрических величин: Учеб. Пособие для вузов / Евтихеев Н.Н., Купершмидт Я.А., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. под общ. ред. Евтихеев Н.Н. – М: Энергоатомиздат 1990. - 352 с.
27. Жданов А.А. Современный взгляд на ОС реального времени / Жданов А.А. // Мир компьютерной автоматизации. – 1999. - № 1, С. 54-60.
28. Жуков В.П. Систематические погрешности электронно-счетного частотомера / Жуков В.П. // Известия вузов, Радиотехника. – 1964 - № 6, С. 732-738.
29. Золотарев В.М. Современная теория суммирования независимых случайных величин / Золотарев В.М. – М: Наука, 1986. - 416 с.
30. Зыль С. QNX Momentics: основы применения / Зыль С. – Спб: БХВ-Петербург, 2005. - 256 с.
31. Калинин В.Н. Теория систем и оптимального управления. Часть 2. / Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. – М: Изд-во МО СССР, 1988. - 590 с.
32. Каргин В.А. Обобщенная модель измерительной информации в системах телеметрии реального времени / Каргин В.А., Майданович О.В., Николаев Д.А., Россиев А.Ю. // Труды Международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях», АІТА-2011, Москва, 4-8 апреля 2011 г. ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 2011. - С. 781-789.
33. Каргин В.А. Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном времени состояния ракетно-космической техники / Каргин В.А.,

- Майданович О.В., Охтилев М.Ю. // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2010. - №11. - С. 20-23.
34. Каргин В.А. Автоматизированная система управления подготовкой и пуском ракет космического назначения как корпоративная информационная система / Каргин В.А., Майданович О.В., Охтилев М.Ю., Россиев А.Ю. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010 - №7. С. 78-83 с.
35. Каргин В.А. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном времени / Каргин В.А., Нездоровин Н.В., Николаев Д.А., Самойлов Е.Б. // Информация и космос. – 2009. - №4. – С. 77-82.
36. Каргин В.А. Фильтрация аномальных измерений при подготовке исходных данных для экспресс-анализа по ракете-носителю «Союз-2» / Каргин В.А., Николаев Д.А., // Труды Всероссийской НТК «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» под ред. Ю.М. Урличича, А.А. Романова. М: Физматлит, 2009 - С. 215-220.
37. Каргин В.А. Алгоритм многокритериального обнаружения и отбраковки выбросов по критерию Неймана-Пирсона с применением разностных фильтров / Каргин В.А., Николаев Д.А. // Труды всеармейской НТК «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», С-Петербург, 28-30 апреля 2008. - С. 252-253.
38. Каргин В.А. Модель измерительной информации в системах мониторинга космических средств / Николаев Д.А., Россиев А.Ю, Бородько Д.Н. // Информационно-управляющие системы. – 2012. - №1. – С. 39-43.
39. Каргин В.А., Николаев Д.А., Самойлов Е.Б., Обнаружение и отбраковка аномальных результатов измерений для формирования исходной измерительной информации по ракете-носителю типа «Союз» / Каргин В.А., Николаев Д.А., Самойлов Е.Б. // Информация и космос. 2008. - №4. – С. 83-87.
40. Каргин В.А. Анализ основных проблем при создании автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения / Каргин В.А., Россиев А.Ю. // Научная сессия ГУАП: Сб. докл.: в 3 ч., ч. II, Технические науки, СПб.:ГУАП, 2010. – С.173-175.
41. Кедем Б., Спектральный анализ и различие сигналов по пересечениям нуля / Кедем Б. // ТИЭР – 1986. - № 11 т. 74. – С. 6-23.
42. Кендалл М. Статистические выводы и связи: Пер. с англ. / Кендалл М., Стьюарт А. – М: Наука, 1973, 466 с.
43. Кендалл М. Теория распределений: Пер. с англ. / Кендалл М., Стьюарт А. – М: Наука 1966, 588 с.

44. Кертен Р. Введение в Qnx Neutrino 2. Руководство по программированию приложений реального времени в QNX Realtime Platform / Кертен Р. - Петрополис, 2001. - 480 с.
45. Коваленко И.Н. QNX – золушка в семье UNIX / . Коваленко И.Н. // Открытые системы. - 1995. - № 2. – С. 58-65.
46. Коваленко И.Н. Проект «Neutrino». В поисках святого Грааля / . Коваленко И.Н. // Открытые системы. – 1997. - № 5. – С. 39-47.
47. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятности / Колмогоров А.Н. – М: 1974, 120 с.
48. Корн Г. Справочник по математике / Корн Г., Корн Т. - М., 1968. - 720 с.
49. Королев В.Ю Математические основы теории риска / Королев В.Ю., Беинг В.Е., Шоргин С.Я., - М: Физматлит, 2007. - 544 с.
50. Королюк В.С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. – М.: Наука, 1985. - 640 с.
51. Котельников В.А., О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи / Котельников В.А. // Успехи физических наук. – 2006. - № 7. – С. 762-770.
52. Котов В.Е Теория схем программ / Котов В.Е., Сабельфельд В.К. – М.: Наука, 1991. - 248 с.
53. Крамер Г. Математические методы статистики / Крамер Г. – М: Мир, 1975. - 648 с.
54. Крамер Г. Стационарные случайные процессы. Свойства выборочных функций и их приложения. Пер. с англ. / Лидбеттер М. - М: Мир 1969.- 398 с.
55. Крянев А.В. Математические методы обработки неопределенных данных / Крянев А.В., Лукин Г.В. – М: Физматлит, 2003. - 216 с.
56. Кузнецов А. SCADA-система: программистом можешь ты не быть / Кузнецов А. // Современные технологии автоматизации. – 1996. - № 1. – С. 32-35.
57. Куцевич Н.А. SCADA-системы и муки выбора / Куцевич Н.А. // Мир компьютерной автоматизации. – 1999. - № 1. – С. 72-78.
58. Локотков А. Что должна уметь система SCADA / Локотков А. // Современные технологии автоматизации. – 1998 № 3. – С. 44-46.
59. Манжиров А.В., Полянин А.Д Справочник по интегральным уравнениям: Методы решения / Манжиров А.В., Полянин А.Д. - М: Факториал Пресс, 2000. — 384с.
60. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ негауссовых процессов и их преобразований / Малахов А.Н. – М: Советское радио, 1978. - 376 с.
61. Математический энциклопедический словарь. / Гл. ред. Ю.В.Прохоров; Ред. кол.: С.И.Адян, Н.С.Бахвалов, В.И.Битюцков и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – 847 с.
62. Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи: Пер. с англ. / Мидлтон Д. под ред. Левина Б.Р. - М.: Советское радио.- 1961.- Т.1.- 784 с.

63. Миленький А.В. Классификация сигналов в условиях неопределенности. / Миленький А.В. М: Сов. Радио, 1975 - 328 с.
64. Надежность и эффективность в технике: Справочник / Ред. совет. Авдуевский В.С. и др. Том. 3 – М: Машиностроение, 1988. - 328 с.
65. Назаров А.В. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс / Козырев Г.Н., Шитов И.В., Обрученков В.П. – СПб: Наука и техника, 2007. - 672 с.
66. № 754-0327/07-1-016-2007-012 отчет НИР «Телеприбор» ФГУП «РНТМИ КП» 2007 г.
67. № 754-0327/07-2-016-2008-1 отчет НИР «Телеприбор» ФГУП «РНТМИ КП» 2008 г.
68. Николаев Д.А. Разработка средств повышения достоверности и уменьшения избыточности измерительной информации / Николаев Д.А. // Научная сессия ГУАП: Сб. докладов: В 4ч. – Ч. II. Технические науки – СПб: Изд-во СПб ГУАП, 2009. – С. 207 – 210.
69. Николаев Д.А. Оценивание и аппроксимация вероятностных характеристик флуктуационных процессов в системах телеметрии реального времени / Николаев Д.А. // Научная сессия ГУАП: Сб. докладов: В 4ч. – Ч. II. Технические науки – СПб: Изд-во СПб ГУАП, 2010. - С. 160-163.
70. Николаев А.Ф. Проблемы повышения достоверности в информационных системах / Николаев А.Ф. Фомин В.И. Хохлов Л.М. – Л: Энергоиздат 1982, 144 с.
71. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств / Новицкий П.В. – Л: Энергия 1968. - 248 с.
72. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / Новицкий П.В. Зограф И.А. – Л.: Электроатомиздат, 1991. - 304 с.
73. Новицкий П.В. Сравнение оценок погрешности измерения / Новицкий П.В., Назаров И.А., Иванова В.Я. // Измерительная техника – 1966. - №9. – С. 20-24.
74. Норенков И.П. Подходы к проектированию автоматизированных систем / Норенков И.П. // Информационные технологии. – 1998. - № 2. – С. 2-9.
75. Орлов А.И. Эконометрика. Учебник / Орлов А.И. – М.: Экзамен, 2002. - 412 с.
76. Охтилев М.Ю. Анализ особенностей телеметрической информации ракет космического назначения / Охтилев М.Ю., Каргин В.А., Николаев Д.А., Россиев А.Ю., Чуприков А.Ю. // Аэрокосмические технологии: Научные материалы Второй международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея Под ред. Симоньянца Р.П. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 189-190.
77. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов / Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. – М.: Наука, 2006. - 410 с.

78. Охтилев М.Ю. Теоретические основы и методы автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени и их приложение к задачам мониторинга состояний объектов ракетно-космического вооружения: дис. ... док. техн. наук: 05.13.11 / Охтилев Михаил Юрьевич. - СПб 2000. - 445 с.
79. Охтилев М.Ю. Унифицированная информационная технология мониторинга динамически изменяющихся состояний космических средств и средств НКУ на основе измерительной информации и представления его результатов на индивидуальных и коллективных средствах отображения / Охтилев М.Ю., Ничипорович О.П., Николаев Д.А., Чуприков А.Ю. // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. - №5. - С. 20-24.
80. Охтилев М.Ю. Интеллектуальный интерфейс и его использование в системах и его использование в системах мониторинга состояния ракеты-носителя на активном участке траектории / Охтилев М.Ю., Россиев А.Ю., Заозерский С.А Чуприков А.Ю. // Труды Всероссийской НТК «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» под ред. Урлича, Ю.М. Романова А.А.. - М: Физматлит, 2009. - 221-227 с.
81. Охтилев М.Ю. Проблемы создания и применения автоматизированных систем мониторинга состояния сложных технических комплексов / Охтилев М.Ю., Соколов Б.В // Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 17 - 21 июня 2003 г.: Сборник трудов Самарский научный центр РАН 2003 г. – С. 500 – 505.
82. Охтилев М.Ю. Перспективные направления развития информационных технологий мониторинга состояния сложных космических объектов в реальном масштабе времени / Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Ничипорович О.П. Николаев Д.А., Чуприков А.Ю. и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. - № 11. – С. 50-59.
83. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. // Информационные технологии. – 2011. - №10 приложение. – С. 14-20.
84. Партридж Г. Электронные измерительные приборы / Партридж Г. - М.: Госэнергоиздат, 1961 .- 439 с.
85. Патрик Э. Основы теории распознавания образов / Патрик Э.– М.:Сов. Радио, 1980. - 408 с.
86. Петров В.В. Суммы независимых случайных величин / Петров В.В. – М: Наука, 1972. – 416 с.
87. Программа телеметрических измерений. Часть первая Программа телеметрических измерений системой РТСЦ - АДИС 372182.007 – 2002. - 128 с.

88. Райс С.О. Математический анализ случайного шума / Райс С.О. // Теория передачи электрических сигналов при наличии помех. - М: Иностранная литература 1953. – С. 88-238.
89. Ростовцев Ю.Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации / Ростовцев Ю.Г. – СПб, 1992, 712 с.
90. Сик Д. С++ Boost Graph Library. Библиотека программиста / Сик Д., Л. Ли, Э. Ламедэйн – СПб.: Питер, 2006. - 304 с.
91. Соболев В.С. Программное обеспечение современных систем сбора и обработки измерительной информации / Соболев В.С. – Приборы и системы управления. – 1998. - № 1. – С. 55-63.
92. Сорокин С. Системы реального времени / Сорокин С. // Современные технологии автоматизации. – 1997. - № 2. – С. 22-29.
93. Степкин В.С., Автоматизированная обработка и анализ телеметрической информации / Степкин В.С., Шмыголь С.С. – М: Изд-во МО СССР – 1980. - 511 с.
94. Статистические методы обработки результатов измерений / под ред. Юсупова Р.М, - М: Из-во МО СССР, 1984. - 564 с.
95. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Тихонов А.Н., Самарский А.А. - М.: Наука, 1977. - 735 с.
96. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов / Тихонов В.И. // Успехи физических наук. – 1962. - т. 77 вып. 3. – С. 449-480.
97. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / Тихонов В.И. – М.: Радио и Связь. - 1983, 320 с.
98. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / Тихонов В.И. – М: Советское радио, 1966. - 680 с.
99. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / Тихонов В.И. Харисов В.Н. – М: Радио и связь 1991. - 608 с.
100. Тихонов В.И. Выбросы траекторий случайных процессов / Тихонов В.И. Хименко В.И. – М: Наука, 1987. - 305 с.
101. Тихонов В.И. Хименко В.И. Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения – Радиотехника и электроника, 1998 т. 43, № 5, 501-523 с.
102. Туманова А.В. Вероятностная структура сигналов и помех в лазерных системах передачи и обработки информации: автореф. дис. на соиск. степ. к.т.н.: 05.13.01 / Туманова Алена Валерьевна – СПб., 2008. - 30 с.
103. Тюрин Ю.Н. Анализ данных на компьютере / Тюрин Ю.Н. Макаров А.А. под ред. Фигурнова В.Э. – М: Инфра-М 2003. - 544 с.

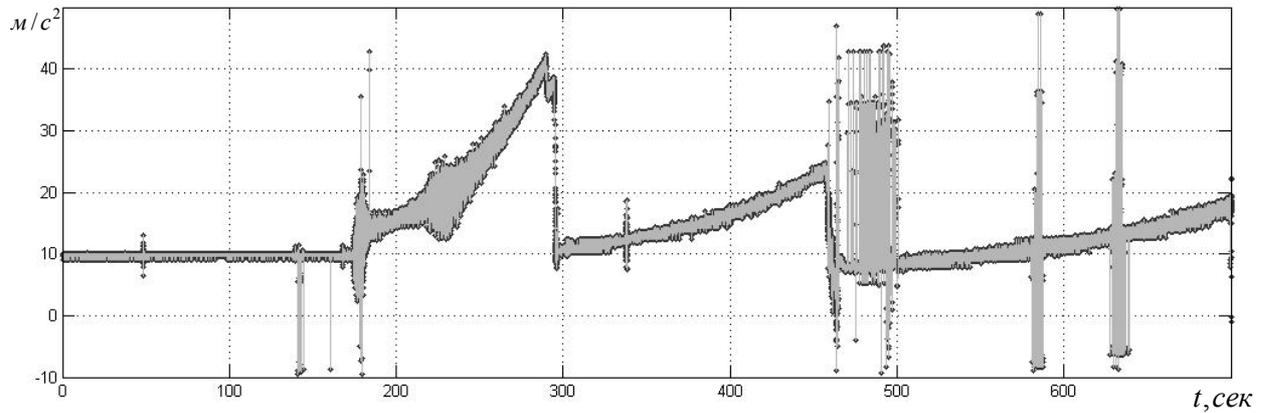
104. Уэлш М. Запускаем Linux / Уэлш М., Далхаймер М. Кауфман Л. – СПб: Символ-Плюс, 2000. - 832 с.
105. Федоров М.В. Метод идентификации форм распределений малых выборок / Федоров М.В. // Рос. хим. ж. (Ж. рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2002. - т. 46, № 3. – С. 9-11.
106. Фомин А.Ф. Отбраковка аномальных результатов измерений / Фомин А.Ф., Новоселов О.Н., Плющев А.В.- М: Энергоатомиздат, 1985. - 200 с.
107. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов / Фомин Я.А. – М.: Связь 1980. - 216 с.
108. Фремке А.В. Телеизмерения. / Фремке А.В. - М.: Высшая школа, 1968. - 262 с.
109. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями / Хальд А.- М: Иностранная литература, 1956. - 664 с.
110. Харкевич А.А. Борьба с помехами / Харкевич А.А. – М: Наука 1965. - 276 с.
111. Харкевич А.А. Спектры и шум. / Харкевич А.А.- М.: ГИТТЛ, 1957. - 236 с.
112. Хеннан Э. Анализ временных рядов Пер.с англ. / Хеннан Э. - М. : Наука, 1964. - 215 с.
113. Хименко В.И. О нормированных спектральных моментах стационарных случайных процессов / Хименко В.И. // Изв. вузов: Радиофизика. – 1976. - т. 19 № 8. – С. 1188-1192.
114. Хименко В.И. О среднем числе выбросов траектории негауссова случайного порцесса над заданным уровнем / Хименко В.И. // Изв. вузов: Радиофизика. – 1976. - т. 21 № 8. – С. 1170-1176.
115. Хименко В.И. Проблемы речевых технологий. Вероятностная структура и обобщенная математическая модель речевых сигналов / Хименко В.И. // Вестник молодых ученых. – 2005. - № 8.- С. 5-17.
116. Хименко В.И. Статистические характеристики выбросов гауссова процесса / Хименко В.И. // Изв. вузов: Радиофизика. – 1984. - т. 27 № 3. –С. 306-313.
117. Хименко В.И. Характеристика типа «превышений уровней» для простых моделей случайных последовательностей / Хименко В.И. // Радиотехника и электроника. - 1994, т.39. - № 11. С. 1791-1801.
118. Хименко В.И. Характеристики типа «превышений уровней» для случайных точечных процессов // Радиотехника и электроника, 2000, т.45, № 4, 436-443 с.
119. Хименко В.И. Характеристики выбросов траекторий стационарных случайных процессов / Хименко В.И. // Зарубежная Радиоэлектроника. – 1981. - № 4. С. 3-34.
120. Чеботарев А.В. Библиотека Qt4. Создание прикладных приложений в среде Linux / Чеботарев А.В. – М.: Вильямс, 2006. - 256 с.
121. Чернявский Е.А. Анализ информационных процессов измерительно-вычислительных средств / Чернявский Е.А. – СПб: Электроатомиздат, 1999. - 192 с.

122. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики / Шеннон К. – М: Издательство «Издательство», 1963. - 830 с.
123. Шлее М. Qt4.5. Профессиональное программирование на C++ / Шлее М. – СПб.: БХВ, 2010 - 896 с.
124. Электрические измерения: Учебник для вузов / под ред. Фремке А.В., Душина Е.М. – Л: Энергия 1980. - 392 с.
125. Янг С. Алгоритмические языки реального времени. Конструирование и разработка. Пер. с англ. / Янг С. – М: Мир, 1985. - 400 с.

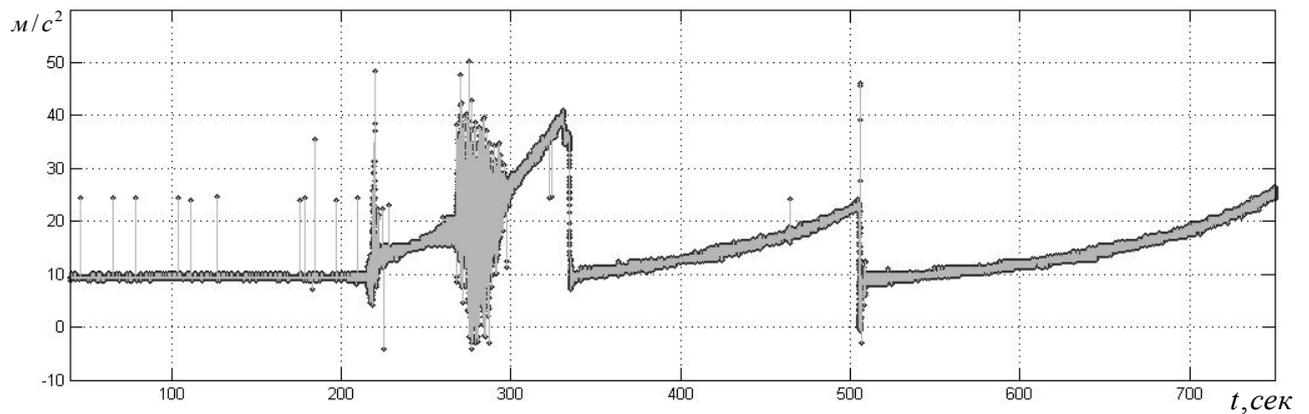
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРА ОСЕВОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

Представлено поведение телеметрируемого параметра «Осевая Перегрузка», получаемого с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2», в ходе различных запусков ракеты-носителя.

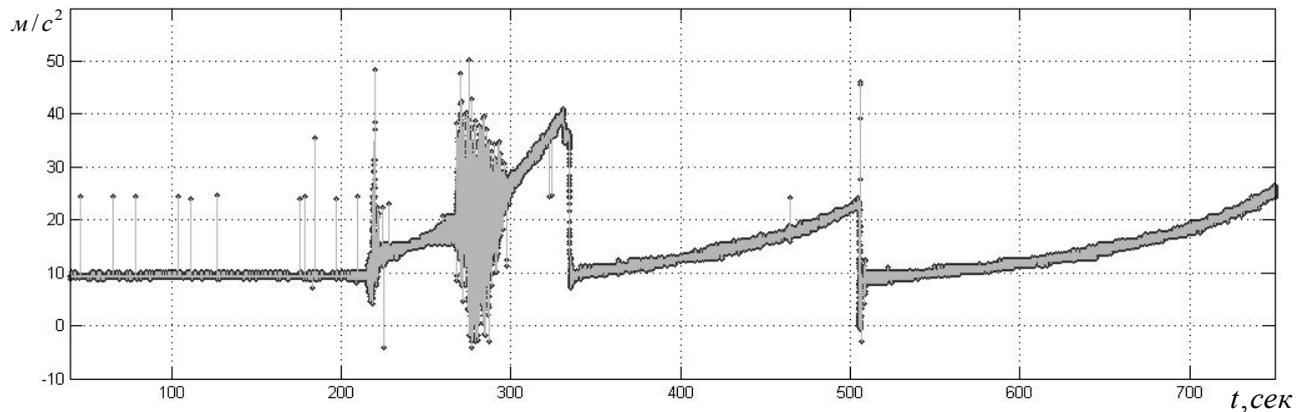
2004.11.08 - 21:29:57 Облик (макет)



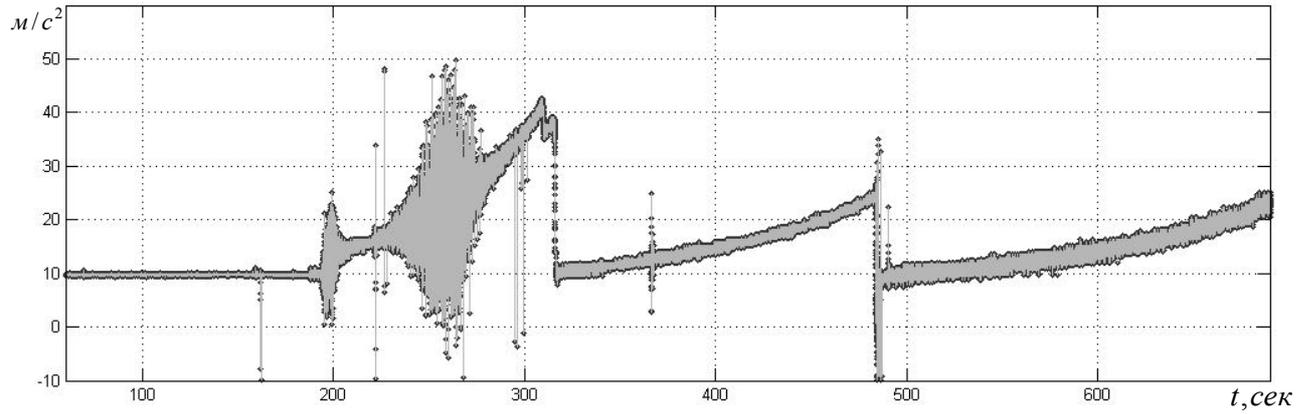
19.10.2006 - 19:28:13 РБ «Фрегат» КА «MetOp-A»



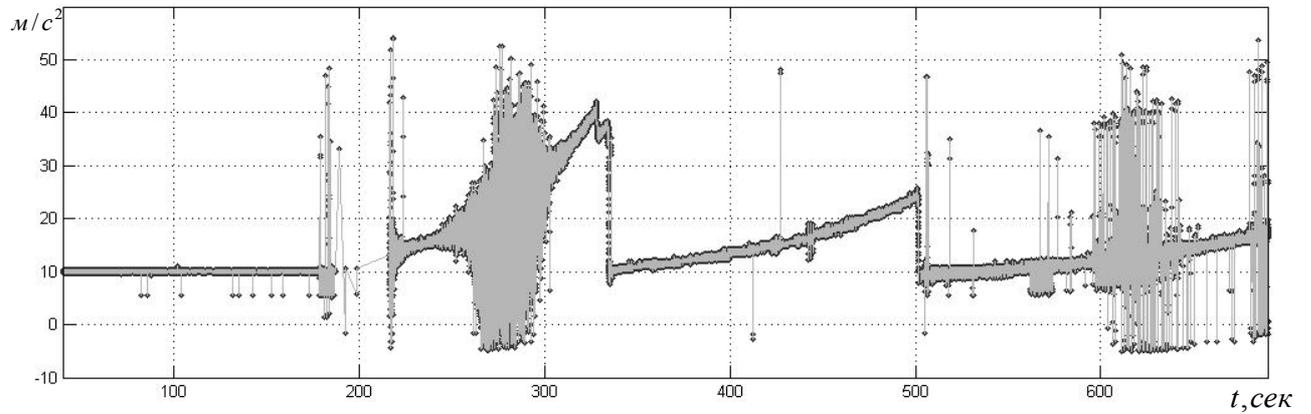
27.12.2006 - 17:23:38 РБ «Фрегат» КА «Corot»



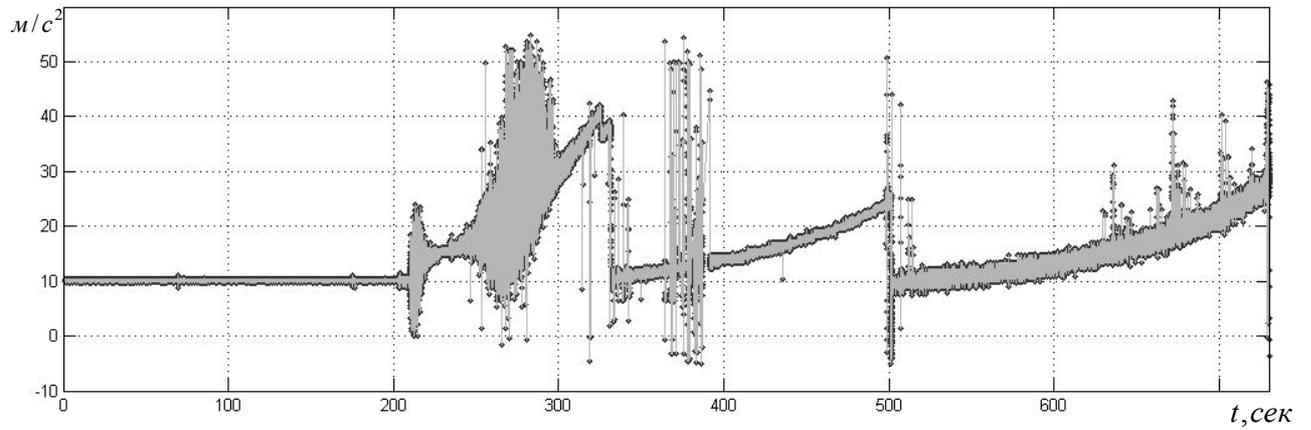
24.12.2006 11:34:44 РБ «Фрегат» КА «Меридиан-1»



26.07.2008 21:31:35 РБ «Фрегат» КА «Космос-2441»



23.05.2009 00:53:33 РБ «Фрегат» КА «Меридиан-2»



**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНО-
МЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ**

Результаты приведены для параметра Осевой Перегрузки, получаемой с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2», полученной в ходе запуска ракеты-носителя с разгонным блоком «Фрегат» и космическим аппаратом «Corot» 27.12.2006 - 17:23:38

Оценка характеристики		Режим работы ДУ 1-й ступени	Режим работы ДУ 2-й ступени	Режим работы ДУ 3-й ступени
Математическое ожидание	$m_{\xi}^* \min$	17.324	10.902	9.761
	$m_{\xi}^* \max$	23.958	15.408	16.101
	$M[m_{\xi}^*]$	19.784	12.912	12.414
	$\sigma[m_{\xi}^*]$	1.835	1.317	1.891
	$\nu[m_{\xi}^*]$	0.092	0.102	0.147
Среднеквадратическое отклонение	$\sigma_{\xi}^* \min$	1.206	0.289	0.409
	$\sigma_{\xi}^* \max$	4.993	1.231	0.775
	$M[\sigma_{\xi}^*]$	3.057	0.473	0.681
	$\sigma[\sigma_{\xi}^*]$	1.981	0.183	0.059
	$\nu[\sigma_{\xi}^*]$	0.648	0.386	0.088
Коэффициент вариации	$\nu_{\xi}^* \min$	0.069	0.025	0.039
	$\nu_{\xi}^* \max$	0.351	0.098	0.072
	$M[\nu_{\xi}^*]$	0.236	0.037	0.056
	$\sigma[\nu_{\xi}^*]$	0.091	0.015	0.009
	$\nu[\nu_{\xi}^*]$	0.385	0.399	0.161

Коэффициент асимметрии	$\gamma_{1 \min}^*$	-0.758	-1.471.	-0.821
	$\gamma_{1 \max}^*$	0.959	0.774	0.934
	$M[\gamma_1^*]$	-0.046	-0.053	0.015
	$\sigma[\gamma_{1 \min}^*]$	0.582	0.578	0.405
	$\nu[\gamma_1^*]$	12.655	10.867	26.863
Коэффициент эксцесса	$\gamma_{2 \min}^*$	-0.215	-0.372	-1.238
	$\gamma_{2 \max}^*$	2.945	2.381	2.425
	$M[\gamma_2^*]$	1.739	0.765	0.551
	$\sigma[\gamma_2^*]$	0.814	0.483	0.0611
	$\nu[\sigma_\xi^*]$	0.468	0.632	13.341

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНТРОПИИ И КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ

Результаты приведены для параметра Осевой Перегрузки, получаемой с датчика АЛЕ048 третьей ступени ракеты-носителя «Союз-2», полученной в ходе запуска ракеты-носителя с разгонным блоком «Фрегат» и космическим аппаратом «Corot» 27.12.2006 - 17:23:38

Оценка характеристики		Режим работы ДУ 1-й ступени	Режим работы ДУ 2-й ступени	Режим работы ДУ 3-й ступени
Значение энтропии K_{ξ}^*	$K_{\xi \min}^*$	1.699	1.464	1.781
	$K_{\xi \max}^*$	1.969	1.965	1.991
	$M[K_{\xi}^*]$	1.868	1.882	1.904
	$\sigma[K_{\xi}^*]$	0.069	0.107	0.043
	$\nu[K_{\xi}^*]$	0.037	0.057	0.022
Коэффициент формы χ	$\chi_{\xi \min}^*$	0.411	0.431	0.429
	$\chi_{\xi \max}^*$	0.599	0.617	0.753
	$M[\chi_{\xi}^*]$	0.459	0.515	0.639
	$\sigma[\chi_{\xi}^*]$	0.512	0.535	0.572
	$\nu[\chi_{\xi}^*]$	0.536	0.524	0.248

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ЗАПУСКУ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2» С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ «COROT»

Результаты исследования обработки телеметрической информации, полученной входе запуска ракеты-носителя «Союз-2» с разгонным блоком «Фрегат» и космическим аппаратом «Corot» 27.12.2006 - 17:23:38. Обработке подвергались параметры системы давления и системы управления. Обрабатываемы параметры были получены при частотах опроса 100 Гц и 200 Гц

Название параметра	Част оп-роса [Гц]	Д И	МА С	Кол-во знач в исх. ф	Кол-во значений после применения калибровки	После отбраковки	% откалиброванных	% отбракованных
УПТ1и	100	25	1	8008 0	79419	79416	0.825	0.003
УПР1и	100	25	1	8007 7	79419	79416	0.821	0.003
ДОДНи	100	25	1	8004 4	79413	79410	0.788	0.003
УП-СЭА1и	100	25	1	8007 0	79419	79393	0.813	0.032
УПР2и	100	35	1	8005 5	79419	79415	0.794	0.005
УПТ2и	100	35	1	8006 3	79420	79404	0.803	0.021
УП-СЭА2и	100	35	1	8005 1	79418	79394	0.797	0.032
НХИТи	100	35	1	8011 9	79420	79416	0.872	0.005
ДАРи	100	25 0	1	8011 9	79420	79417	0.872	0.003
ДГФК1и	100	25 0	1	8013 5	79420	79417	0.892	0.003
ДГФК2и	100	25 0	1	8013 0	79420	79417	0.886	0.003
ДБГи	100	6	1	8014 3	79420	79417	0.902	0.003
ДБОи	100	6	1	8014 9	79420	79417	0.909	0.003
УПВ1и	100	10	1	8007 6	79419	79416	0.824	0.003
УПВ2и	100	10	1	8005 1	79418	79414	0.797	0.005
ТХИТ1и	100	90	1	8011 5	79420	79417	0.867	0.003
ТХИТ2и	100	90	1	8010 7	79420	79417	0.857	0.003

Название параметра	Част оп-рота [Гц]	Д И	МА С	Кол-во знач в исх. ф	Кол-во значений после применения калибровки	После отбраковки	% откалиброванных	% отбракованных
ДУС1а	200	15	4	1600 27	99653	99648	37.727	0.005
ДУС2а	200	15	4	1600 24	99686	99682	37.705	0.004
ДУС3а	200	15	4	1600 17	99682	99656	37.705	0.026
ДУС4а	200	15	4	1600 06	99680	99670	37.702	0.012
ДУС5а	200	15	4	1599 96	99680	99667	37.698	0.013
ДУС6а	200	15	4	1599 90	99680	99655	37.696	0.025
УПРА1а	100	35	4	8004 6	49846	49843	37.728	0.006
УПРА2а	100	35	4	8004 3	49841	49832	37.732	0.018
УПРА3а	100	35	4	8003 8	49841	49838	37.728	0.006
УПРА4а	100	35	4	8003 3	49841	49838	37.724	0.006
НХИТа	100	35	5	8015 3	49849	49844	37.807	0.013
ТХИТ1а	100	90	5	8014 7	49849	49846	37.803	0.006
ТХИТ2а	100	90	5	8014 3	49849	49840	37.799	0.018
ТУРМ1а	100	60	5	8001 3	49849	49845	37.698	0.008
ТУРМ2а	100	60	5	8001 1	49849	49844	37.697	0.013
ТУРМ3а	100	60	5	8000 8	49849	49846	37.694	0.006
БП1	100	11	3	8014 3	79420	79394	0.902	0.032
БП3	100	11	3	8013 7	79420	79417	0.894	0.003
НП	100	11	3	8014 5	79420	79416	0.904	0.005
НХИТВ	50	35	72	1650 6	16371	16363	0.817	0.048
НХИТГ	50	35	81	1650 6	16366	16358	0.848	0.048
НХИТД	50	35	82	1650 6	16369	16366	0.831	0.0183

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Запуск программы осуществляется посредством файла *Viewer_US0.bat*.

Сразу после запуска системы пользователю становится доступна главная форма системы «Менеджер данных» (Рисунок 0.1), в строке горизонтального меню активным является только раздел «Данные», а так же кнопки «» - выбора файла с данными и кнопка для открытия профиля настроек - «».

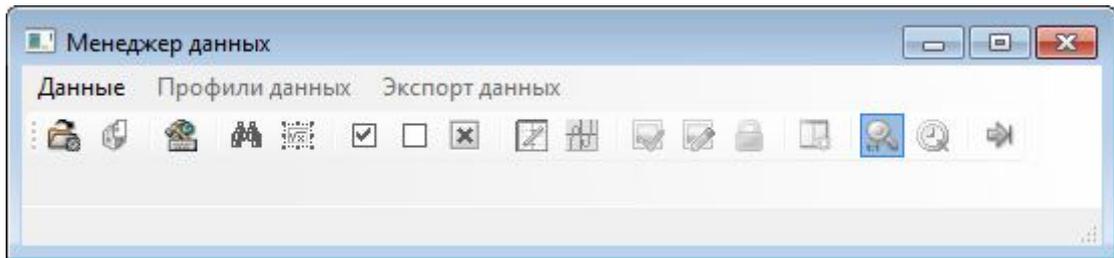


Рисунок 0.1 Внешний вид формы «Менеджер данных».

Для работы в программе необходимо выбрать файл исходных данных, анализ которых будет производиться. При выборе пункта меню «Выбор файла с данными» (Рисунок 0.2) или же нажатии на соответствующую кнопку на панели задач появляется диалоговое окно.

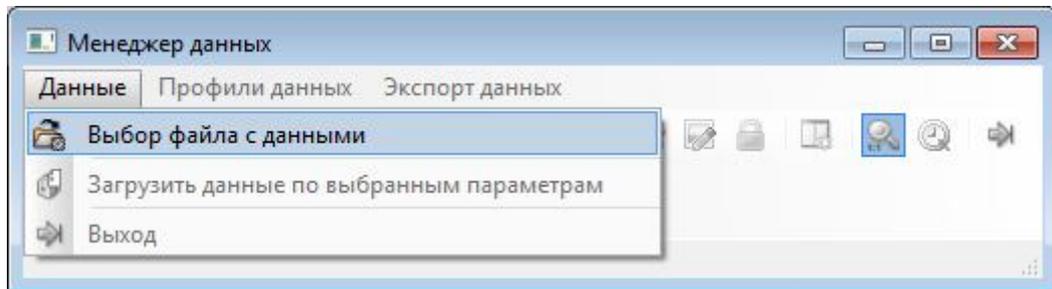


Рисунок 0.2 Выбор файла с данными из контекстного меню.

После выбора файла в «Менеджере данных» отобразится загруженная таблица (Рисунок 0.3). Каждая строка таблицы соответствует определенному параметру. В соответствии с названиями, в столбцах отображаются данные по следующим значениям: имя, индекс, тип, размерность, минимум, максимум, мин.время, макс.время, кол-во значений. При двойном нажатии на заголовок все данные будут отсортированы по возрастанию/убыванию значений в данном столбце.

Имя	Индекс	Тип	Размерность	Минимум	Максимум	Мин. время	Макс. время	К-во значений
ЦРД2	273	f4		0	0	0	0	0
ФГМ3и	465	i4	разомкн	0	0	0	0	0
ФГМ3а	485	i4	замкнут	0	0	0	0	0
ФГМ2и	464	i4	разомкн	0	0	0	0	0
ФГМ2а	484	i4	замкнут	0	0	0	0	0

Рисунок 0.3 Окно «Менеджера данных» после загрузки данных.

Для того чтобы выбрать параметры, над которыми в дальнейшем будут производиться действия необходимо отметить их галочкой. Но при больших объемах обрабатываемых данных бывает сложно найти их в списке. При помощи функции поиска по индексу или же по имени легко найти нужный параметр (Рисунок 0.4).

Имя	Индекс	Тип	Размерность	Минимум	Максимум	Мин. время	Макс. время	К-во значений
БАВи	473	i4	замкнут	0	0	0	0	0
БИ	432	i4	разомкн	0	0	0	0	0
БП1	352	f4	м/с2	-11	11	0	0	0
БП3	353	f4	м/с2	-11	11	0	0	0
Борт_Т								
ВВРа								
ВВРб								
ВВРв								
ВВРг								
ВВРд								
ВЗВ1и								
ВЗВ2и								
ВЗВ3и								
ВЗВДП...								
ВЗВДП...	659	i4		0	0	0	0	0
ВЗВДП...	660	i4		0	0	0	0	0
ВК1а	547	i4	разомкн	0	0	0	0	0
ВК1б	565	i4	разомкн	0	0	0	0	0
ВК1в	569	i4	разомкн	0	0	0	0	0

Количество объектов : 816. Количество значений : 0

Рисунок 0.4 Работа с таблицей. Поиск данных.

Когда все необходимые параметры выбраны, необходимо загрузить данные из файла (Рисунок 0.5) используя соответствующую кнопку. В результате отобразится обновленная таблица, в которой все столбцы по выбранным параметрам содержат загруженные значения.

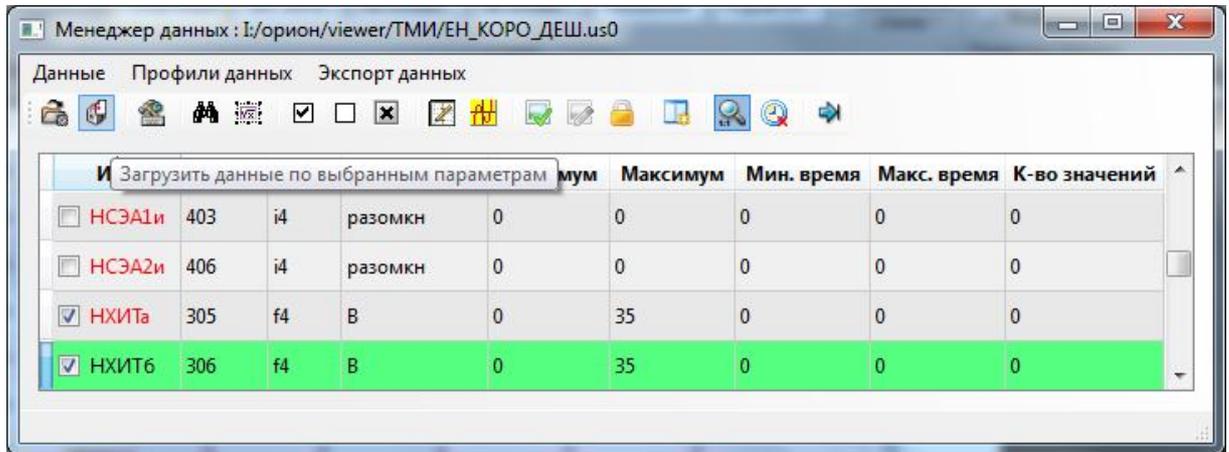


Рисунок 0.5 Загрузка данных по выбранным параметрам.

Для анализа данных необходимо перейти к «Редактору алгоритмов первичной обработки», доступ к которому осуществляется по нажатию кнопки «». Перед открытием окна редактора предлагается выбрать файл, в котором будут храниться алгоритмы (Рисунок 0.6).

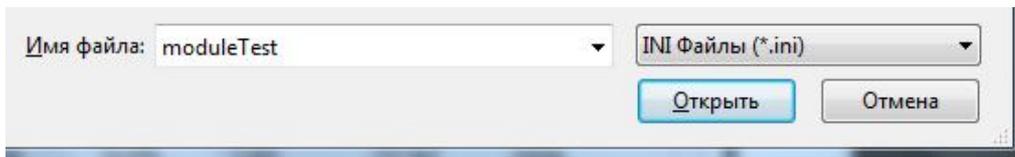


Рисунок 0.6 Выбор файла для хранения алгоритмов.

Окно «Редактора» выглядит следующим образом - Рисунок 0.7.

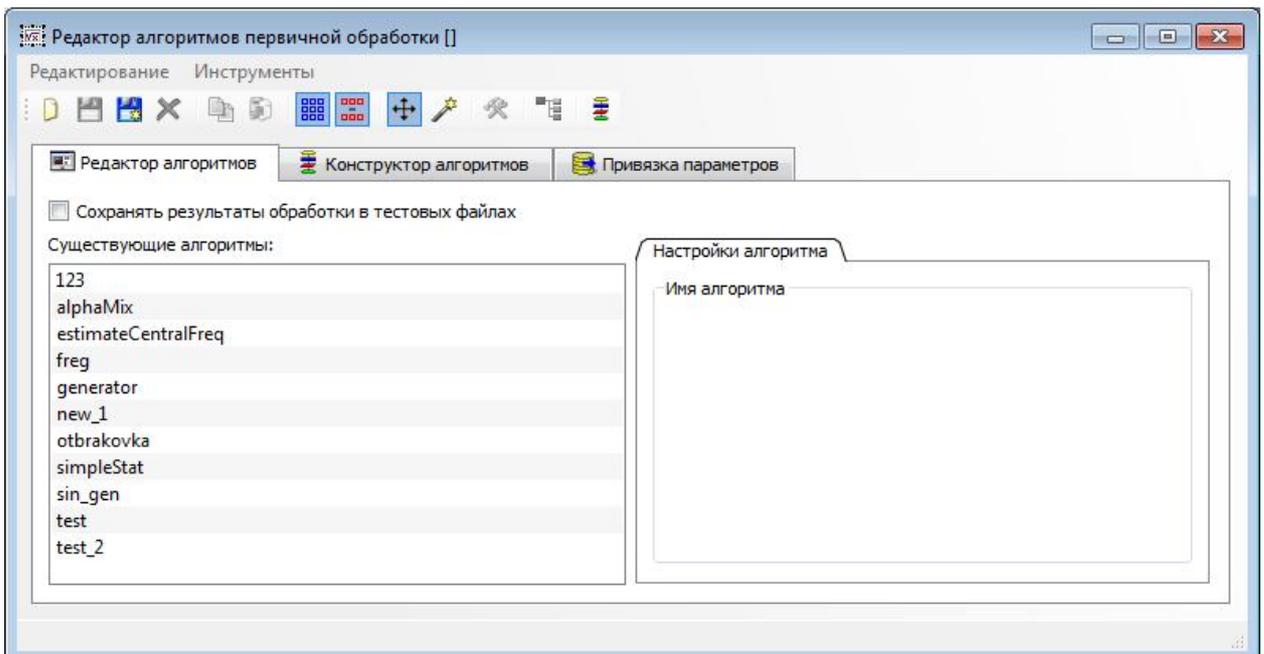


Рисунок 0.7 Редактор алгоритмов первичной обработки.

Для создания нового алгоритма достаточно нажать на кнопку «» на панели задач. В появившемся диалоговом окне необходимо ввести желаемое название. Новый алгоритм отобразится в списке «Существующих алгоритмов». Выбрав алгоритм, нажав на его названии один раз, в правой части окна, на вкладке «Настройки алгоритма» отобразятся настройки соответствующие данному алгоритму (Рисунок 0.8).

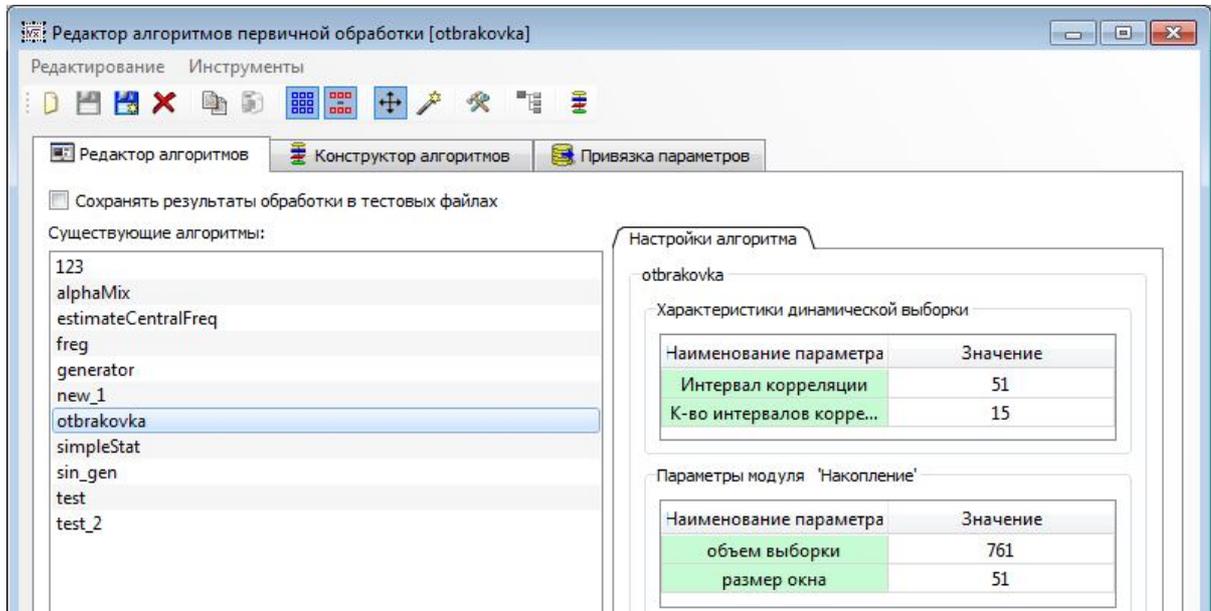


Рисунок 0.8 Отображение настроек выбранного алгоритма.

Для построения/изменения алгоритма необходимо перейти на вкладку «Конструктор алгоритмов». Например, выбрав желаемый алгоритм одиночным нажатием на его название и далее просто перейдя на вкладку конструктора, или же двойным щелчком мыши на названии алгоритма, в результате чего вкладка конструктора откроется автоматически (Рисунок 0.9).

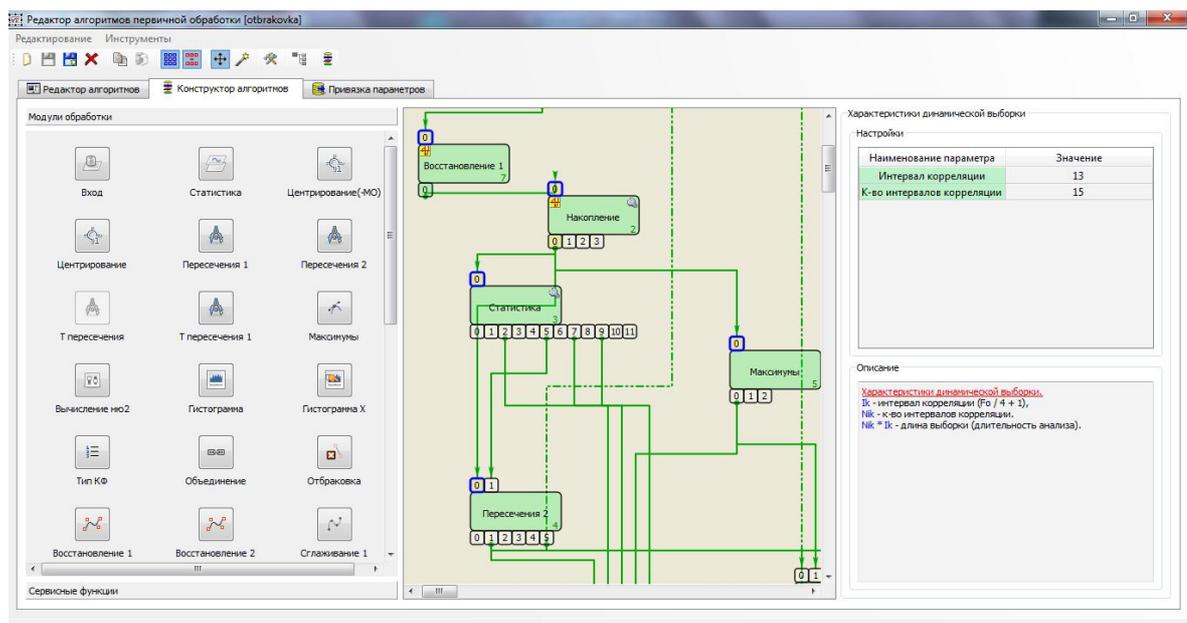


Рисунок 0.9 Вкладка «Конструктор алгоритмов»
«Редактора алгоритмов первичной обработки данных».

Вкладка «Конструктор алгоритмов» включает в себя:

Модули обработки;

Сервисные функции;

Область построения алгоритма;

Параметры модуля/характеристики выборки (включающие в себя настройки и описание выбранного модуля/выборки).

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

На данном этапе подготовки измерительной информации в качестве способа отбраковки аномальных измерений использовался алгоритм, описанный в п. 4.2

Для работы алгоритма необходимо выбрать данные, которые будут подвержены анализу, это осуществляется путем привязки параметра к определенному алгоритму. Как говорилось ранее, процесс отбраковки является сложным и трудоемким. Он связан с множеством факторов, реализованных в алгоритме, что делает необходимым производить отбраковку каждого параметра отдельно.

Для того чтобы привязать параметр к определенному алгоритму необходимо на вкладке «Привязка параметра» в столбце «Алгоритм» выбрать в выпадающем списке желаемый. Для отбраковки использовался алгоритм –Otbrakovka (Рисунок 0.1).

Для корректной работы алгоритма необходимо настроить все его характеристики и параметры в соответствии с анализируемыми данными.

В настоящей работе процесс отбраковки производился над параметрами, характеризующими работу двигательных установок блоков А, Б, И.

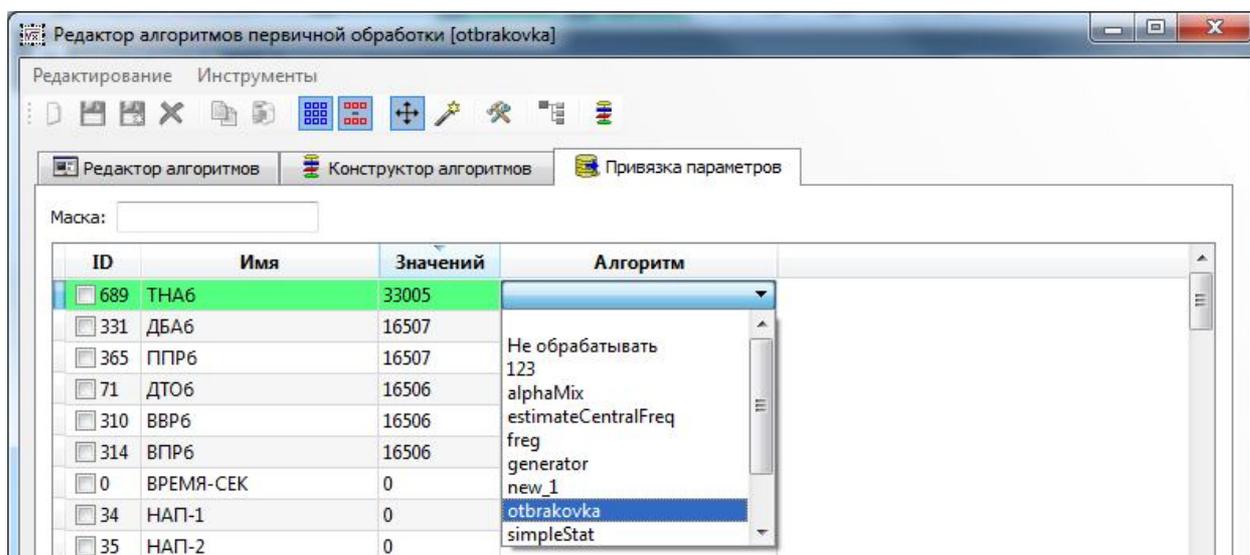


Рисунок 0.1 Привязка параметра ТНАб к алгоритму «Otbrakovka».

В начале данной главы было сказано, что влияние мультипликативной помехи на радиотелеметрическую систему устраняется или почти полностью уменьшается с помощью калибровки канала

Калибровка канала производится посредством программно настраиваемых калибровочных уровней. Каждый параметр содержащий информацию для калибровки соответствует определенному локальному коммутатору. Выбор того или иного калибровочного уровня определяется в зависимости от самих анализируемых данных. В основном, каждой из двигательных установок соответствуют несколько локальных коммутаторов. Например, блоку А соответствуют

4 и 5 локальные коммутаторы. На вкладке «Параметры модуля» указывается частота опроса параметра, выбирается файл калибровочного уровня, а так же указываются границы диапазона его максимумов и минимумов (Рисунок 0.2).

Дальнейшая настройка алгоритма производится во вкладке редактора алгоритмов (Рисунок 0.3), в которой в соответствии с выбранным анализируемым параметром определяются характеристики каждого из модулей алгоритма, таких как «Накопление», «Статистика», «Отбраковка» и т.д., описание которых было дано в пп. 4.2.1

Параметры модуля 'Вход'

Настройки

Наименование параметра	Значений
<input checked="" type="checkbox"/> ППР6	16507

Калибровочные уровни

минимум:

имя параметра: ...

Частота опроса:

Границы диапазона: мин. = макс. =

максимум:

имя параметра: ...

Частота опроса:

Границы диапазона: мин. = макс. =

Описание

Входная последовательность данных.
Выходы : выборка.

Рисунок 0.2 Настройка параметров модуля «Вход».

Настройки алгоритма

otbrakovka

Характеристики динамической выборки

Наименование параметра	Значение
Интервал корреляции	26
К-во интервалов корреляции	15

Параметры модуля 'Накопление'

Наименование параметра	Значение
объем выборки	390
размер окна	26

Параметры модуля 'Статистика'

Наименование параметра	Значение
Интервал корреляции	26

Параметры модуля 'Отбраковка'

Наименование параметра	Значение
частота дискретизации (50,1...	100
ошибка первого рода	0,001
	15 000

Рисунок 0.3 Настройки алгоритма.

После того, как все подготовительные этапы настройки алгоритма окончены можно непосредственно к процессу отбраковки, нажав на кнопку «Применить алгоритм». В результате работы алгоритма на вкладке «Привязка параметров» отобразятся графики параметра до и после отбраковки (Рисунок 0.4). На Рисунок 0.4 наглядно изображен результат отбраковки – график параметра ППРб с отсутствием всех видов погрешностей.

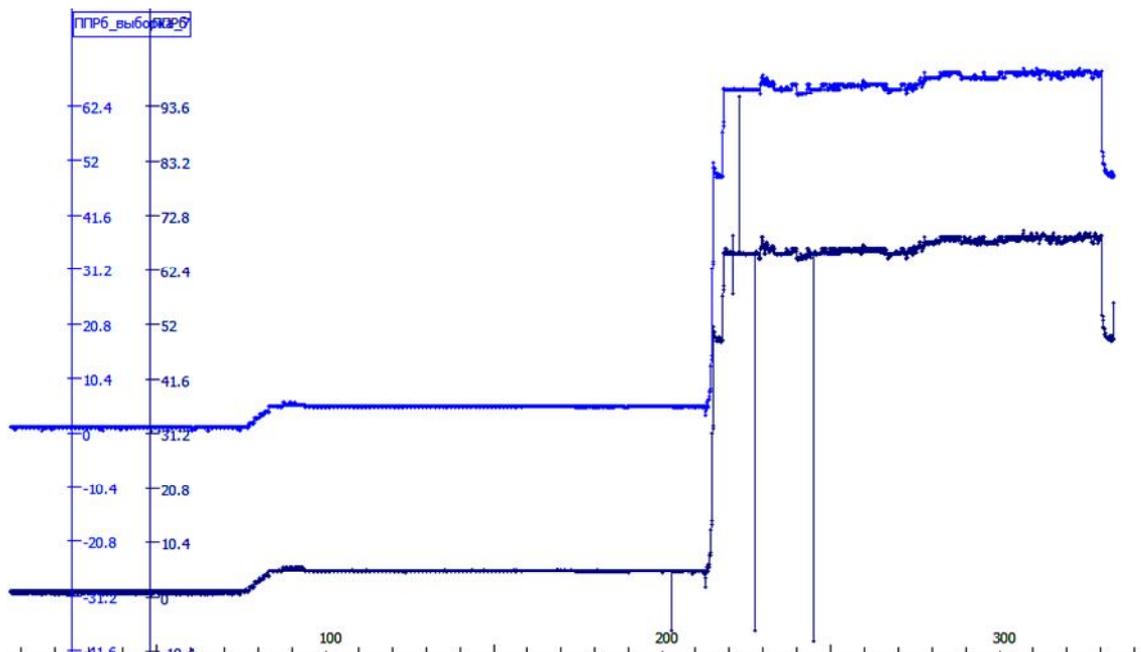


Рисунок 0.4 Результат работы алгоритма отбраковки. Графики параметра ППРб до и после обработки.

Для последующей работы с измерительной информацией целесообразно сохранить результаты отбраковки в виде пригодном для дальнейшего анализа, например текстовом. При нажатии на кнопку «Отображение значений группы графиков - » на горизонтальной панели задач появляется окно – «Информационный срез анализируемых параметров» (Рисунок 0.5), в котором указан список параметров, присутствующих на данном экране отображения. Перед нажатием на кнопку «Сохранение выбранных трендов в текстовых файлах» необходимо пометить «галочкой» параметры для сохранения.

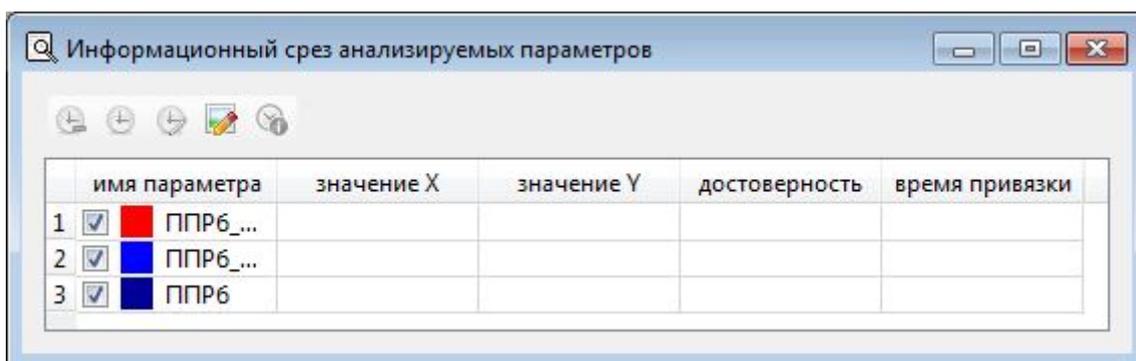


Рисунок 0.5 Окно отображения - Информационный срез анализируемых параметров.

В появившемся окне «Экспорт данных в текстовые файлы» (Рисунок 0.6) определяются варианты сохранения данных, форматы, опции, кодировку и по нажатию кнопки «Применить» выбранные ранее файлы сохраняются под заданным именем в указанной директории.

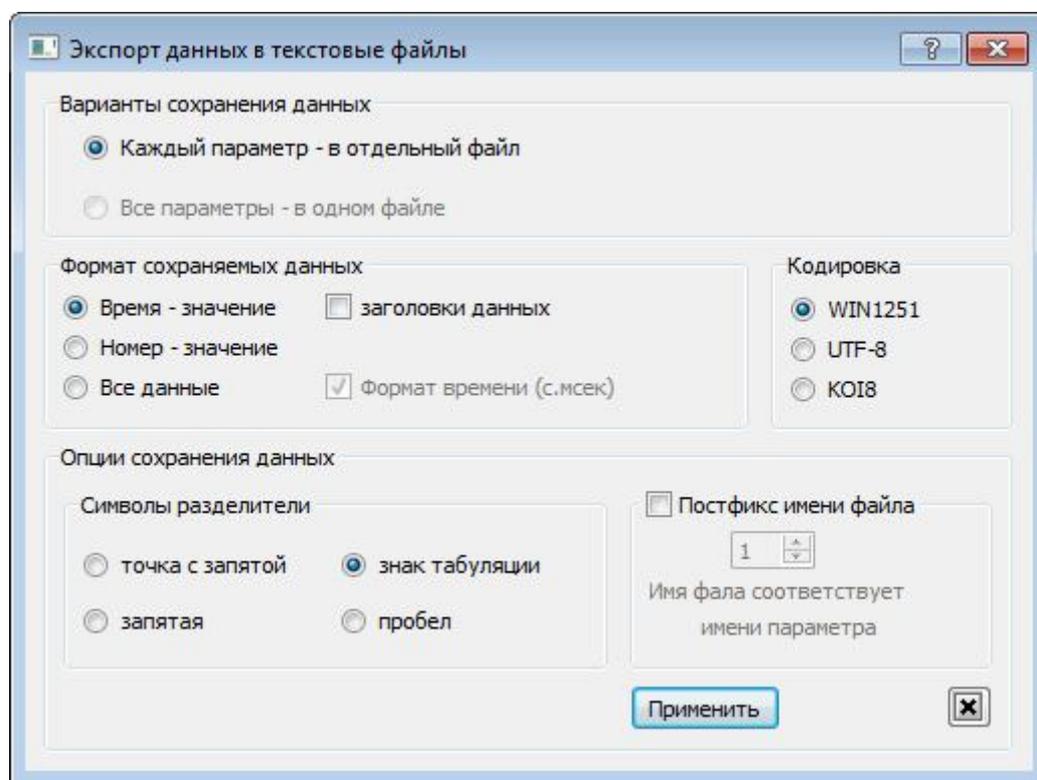


Рисунок 0.6 Окно «Экспорт данных в текстовые файлы»