

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

На правах рукописи
УДК 004.434:621.398:629.786



Махалов Дмитрий Александрович

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ДЛЯ
ПИЛОТИРУЕМЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Матюшин Максим Михайлович**, доктор технических наук, первый заместитель генерального директора акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» – начальник Центра управления полетами, профессор кафедры «Системный анализ и управление» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты: **Соловьев Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ведущий конструктор публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»).

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент департамента механики и процессов управления инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН).

Ведущая организация: Акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «Российские космические системы»), 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53.

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=176513

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.327.03, д.т.н., доцент



А. В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Космическое пространство является сферой национальных интересов и приоритетных разработок Российской Федерации, что находит отражение в концептуальных документах социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности. Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года предполагает создание и запуск разнотипных группировок космических аппаратов (КА). Начинается создание Российской орбитальной станции (РОС), которая продолжит пилотируемую программу освоения космического пространства после завершения эксплуатации Международной космической станции (МКС).

Расширение и развитие орбитального сегмента предполагает разработку и создание новых технологий построения секторов управления, обеспечивающих эффективное и надёжное управление КА. Интенсивные запуски новых КА накладывают повышенные требования на время разработки и эффективность эксплуатации средств обеспечения управления КА.

Телеметрический контроль состояния КА является неотъемлемой составляющей процесса управления полётом КА. В ходе проведения сеанса связи, который, как правило, длится от 6 до 20 минут (без задействования спутникового контура управления), группе анализа телеметрической информации (ТМИ) необходимо оценить состояние бортовых систем (БС) КА, его текущую ориентацию и режимы работы, результаты выполнения запланированных вне зоны радиовидимости операций, реализацию текущего сеанса связи, закладку программы полёта на следующие витки и др. Небольшая продолжительность сеанса связи в совокупности с возрастающим с каждым годом количеством контролируемых телеметрических параметров и динамических процессов на современных и перспективных КА создаёт объективные препятствия к проведению достоверного и всеобъемлющего анализа ТМИ КА в реальном масштабе времени.

Использование в системе управления спутников-ретрансляторов позволяет реализовывать программу полёта за существенно меньшие интервалы времени. В частности, выведение транспортных кораблей «Союз МС» и «Прогресс МС» удалось сократить сначала с 2 суток до 3 часов, за которые необходимо выполнить тот же объём операций. Данные обстоятельства существенно повышают требования к времени и достоверности выполнения анализа ТМИ в реальном времени.

Получение, обработка и анализ ТМИ с КА и средств выведения имеет важное значение на всех этапах подготовки, испытаний, выведения и эксплуатации космической техники. Телеметрическая информация посредством бортовой системы телеизмерений передается с различных систем и агрегатов КА, бортовых вычислительных систем, аппаратуры медико-биологического контроля состояния жизнедеятельности космонавтов, научных приборов и других источников и используется во всех основных функциональных составляющих процесса управления КА: информационно-телеметрического, баллистико-навигационного и командно-программного обеспечения.

Основу обработки ТМИ составляют алгоритмы предварительной, первичной и вторичной обработки, а также специализированные алгоритмы, разрабатываемые для отдельных бортовых систем. При этом задача автоматизированного анализа ТМИ в реальном времени в большинстве существующих комплексов обработки ТМИ не решается вовсе, либо решается в ограниченном объёме. Методические основы для создания программных средств автоматизированного анализа ТМИ отсутствуют. Кроме того, в настоящее время активно развиваются технологии интеллектуального анализа информации, основанные на методах машинного обучения, таких как нейронные сети.

Данные методы находят всё более широкое применение в работах, посвящённых автоматизированному анализу ТМИ, и позволяют обеспечить решение задач, которые не решались классическими методами или решались на ненадлежащем уровне, в том числе задача интеллектуального анализа ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов. Таким образом, актуальной является задача разработки общих методических подходов к реализации процесса автоматизированного анализа ТМИ КА в реальном времени.

Одной из ключевых составляющих эффективного анализа ТМИ КА является представление результатов обработки и автоматизированного анализа ТМИ. При этом наиболее наглядные формы представления состояния БС КА на основе телеметрической информации обеспечивают мнемосхемы. В то же время методические основы по разработке наглядных и ёмких мнемосхем отображения состояния БС КА и контроля выполнения динамических процессов на борту КА в настоящее время практически отсутствуют. Таким образом, существуют объективные препятствия к массовой разработке эффективных форм представления телеметрической информации, которые приводят при подготовке средств наземных комплексов управления к компромиссным решениям между количеством разрабатываемых мнемосхем, их сложностью и временем, затраченным на разработку.

Все вышеописанное определяет важность и **актуальность решаемой в диссертации научной задачи** – разработки методического аппарата автоматизированного анализа ТМИ в реальном масштабе времени.

Степень разработанности темы диссертации

Совершенствованию методов автоматизированного анализа ТМИ посвящены работы Микрина Е. А., Кравца В. Г., Соловьёва В. А., Соловьёва С. В., Любинского В. Е., Беляева М. Ю. (ПАО «РКК «Энергия»), Майдановича О. В., Мальцева В. Б., Охтилева М. Ю., Николаева А. Ю. (ВКА им. А.Ф. Можайского), Матюшина М. М., Титова А. М., Ронкина А. А., Тачёнова С. А. (АО «ЦНИИмаш», г. Королёв), Некрасова М. В., Пакмана Д. Н., Талалаева А. А., Абрамова Н. С. (ОАО «ИСС им. М.Ф. Решетнёва»), Смирнова С. В., Ватутина В. М., Круглова А. В. (АО «РКС», г. Москва), Емельяновой Ю. Г. (ИПУ РАН), Тихомирова С. А. (РГРТУ), Скобцова В. Ю., Архипова В. И. (ОИПИ НАН Беларуси) и других.

Целью диссертационной работы является повышение оперативности определения состояния бортовых систем контролируемого КА, своевременного выявления аномалий в их работе, автоматизация работы группы управления КА посредством разработки и реализации методических подходов к созданию программных средств автоматизированного анализа ТМИ в реальном времени.

Объектом исследования является система автоматизированного анализа (САА) ТМИ, а также телеметрический информационно-вычислительный комплекс (ТМИВК) ЦУП АО «ЦНИИмаш», использующийся для информационно-телеметрического обеспечения полёта российского сегмента МКС, грузовых и пилотируемых космических кораблей, различных автоматических космических аппаратов, а также разгонных блоков и ракет-носителей, осуществляющих выведение указанных КА.

Предметом исследования являются модели, методики и алгоритмы автоматизированного анализа ТМИ, формы отображения ТМИ, язык описания алгоритмов обработки, анализа и отображения ТМИ.

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

Выполнение задачи исследования сводится к решению следующих **частных задач**:

1. системный анализ существующих подходов реализации автоматизированного анализа ТМИ в реальном времени;
2. формализация задачи синтеза комплекса моделей и методик анализа ТМИ;
3. разработка лингвистической модели языка описания алгоритмов анализа ТМИ (язык анализа ТМИ) на основе современных языков программирования;
4. разработка различных, в том числе нейросетевых, алгоритмов автоматизированного анализа ТМИ, записанных на языке анализа ТМИ;
5. разработка методики формирования мнемосхем анализа ТМИ различных КА с использованием подпрограмм на языке анализа ТМИ, предназначенных для управления мнемосхемой на основе ТМИ;
6. оценка полученных результатов и работоспособности разработанного методического аппарата и программного обеспечения, обоснование рекомендаций по использованию языка анализа ТМИ в составе информационно-телеметрического обеспечения ЦУП.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались общие методы системного анализа, теории алгоритмов, теории формальных грамматик, обработки информации, искусственного интеллекта, теории вероятностей и обработки экспериментальных данных, а также объектно-ориентированного проектирования и программирования.

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

1. лингвистическая модель языка описания алгоритмов анализа ТМИ, задающая предметно-ориентированный язык программирования, который основан на синтаксисе современных языков программирования и позволяет в наглядной форме задавать алгоритмы обработки и анализа ТМИ;
2. методика формирования мнемосхем визуализации результатов анализа ТМИ БС КА с использованием программ на языке анализа ТМИ, основанная на разработанной модели системы отображения мнемосхем, включающая в себя набор графических элементов, транслятор подпрограмм на языке анализа ТМИ и интерпретатор подпрограмм анализа, исполняющий скрипт для управления поведением мнемосхемы;
3. методика нейросетевого анализа ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов, учитывающая неравномерное поступление информации по нескольким каналам связи, наличие переменного уровня сигнала, наличие зашумленностей.

Научная новизна

1. В результате системного анализа САА ТМИ сформирована система критериев и показателей, характеризующих эффективность выполнения анализа ТМИ КА в реальном времени, разработан новый частный показатель качества языка программирования: степень унификации языка программирования, позволяющий оценивать трудоёмкость изучения и применения языка программирования.
2. Формализована задача обработки и анализа ТМИ, разработана модель описания задач обработки телеметрической информации: лингвистическая модель языка описания алгоритмов анализа ТМИ (язык анализа ТМИ), отличающаяся от существующих возможностью в наглядной форме на высокоуровневом предметно-ориентированном языке описывать алгоритмы анализа ТМИ с использованием базовых и специализированных алгоритмов, а также близостью по синтаксису к наиболее популярным языкам программирования.

3. Разработана методика визуализации и анализа телеметрической информации на основе компьютерных методов обработки информации с применением мнемосхем визуализации результатов анализа ТМИ, отличающаяся использованием исходных данных на языке анализа ТМИ, что позволяет формировать интерактивные динамические формы отображения в реальном времени.

4. Впервые разработана методика решения задачи обработки и автоматизированного анализа телеметрической информации, содержащей медицинские показания космонавтов, с использованием методов искусственного интеллекта, что в отличие от существующих методик позволяет в реальном времени проводить фильтрацию сбойных значений и адаптироваться к индивидуальным особенностям космонавта.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии прикладных элементов системного анализа, теории формальных языков программирования и методов искусственного интеллекта применительно к задачам анализа ТМИ в реальном времени.

Практическая значимость полученных результатов состоит в:

– Повышении оперативности, полноты охвата контролем и достоверности проведения анализа состояния бортовых систем КА.

– Сокращении времени и трудоёмкости подготовки средств информационно-телеметрического обеспечения к новым КА в части подготовки исходных данных на обработку, анализ и отображение ТМИ КА. В частности, использование разработанного языка описания алгоритмов анализа ТМИ позволяет готовить не только статические, но и динамические, интерактивные мнемосхемы состояния КА и контроля динамических процессов. Причём время подготовки мнемосхем уменьшено в 2-3 раза в сравнении с существующими комплексами.

– Применимости полученных результатов для решения практических задач обработки и анализа ТМИ современных автоматических и пилотируемых КА, орбитальных станций и средств их выведения на существующих информационно-телеметрических комплексах.

Степень достоверности результатов. Обоснованность разработанного методического аппарата обеспечивается использованием методов исследований, не противоречащих основным положениям системного анализа и исследования операций, корректным использованием методов теории информации. Достоверность полученных результатов подтверждается результатами экспериментальных проверок и опытной отработки в составе действующих ЦУП.

Основные результаты диссертации прошли апробацию на семинаре кафедры «Системный анализ и управление» МАИ, в рамках докладов на научно-технических советах АО «ЦНИИмаш», а также на российских конференциях: V Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ЦУП ФГУП ЦНИИмаш (2015 г.), «Лётные испытания, эксплуатация и целевое использование космических аппаратов и разгонных блоков» (2016 г.), VI Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ЦУП ФГУП ЦНИИмаш (2016 г.), VIII Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ЦУП (2018 г.), XXII Международная научно-практическая конференция, посвящённая памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Фёдоровича Решетнёва (2018 г.), IX Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ЦУП (2019 г.), XXIII Межведомственная научно-практическая конференция «Космические системы и комплексы: испытания, управление, применение» (2019 г.).

Полученные в диссертации результаты внедрены в АО «Российские космические системы» (акт № 9-АК-79 от 02.02.2023 г.), ПАО «РКК «Энергия» (акт № ГК-ВС/8 от 27.01.2023 г.), АО «НИИ ТП» (акт № 19/64 от 01.03.2023), АО «ЦНИИмаш» (акт № 08103-59 от 27.02.2023).

Личный вклад автора. Основные научные положения сформулированы и изложены автором самостоятельно. Теоретические выводы и практические решения, алгоритмы и результаты тестирования принадлежат автору. Программная реализация предложенных подходов и алгоритмов выполнена как автором лично, так и совместно с другими разработчиками ТМИВК ЦУП российского сегмента МКС.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 208 листов машинописного текста и содержит: рисунков 54, таблиц 27, список литературы включает 94 наименований на 9 листах, приложение (свидетельства о регистрации программ и акты внедрения) на 8 листах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертации, краткий обзор степени разработанности темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, перечислены основные результаты работы, теоретическая и практическая значимость, дается общая характеристика работы.

В первой главе проводится системный анализ современного состояния системы информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) управления КА. Показано, что процесс обработки и анализа ТМИ удобно декомпозировать на 4 этапа и 23 подэтапа. Определены проблемные аспекты выполнения автоматизированного анализа ТМИ КА в реальном времени. На каждой стадии выявлены типовые задачи, которые решаются универсальными, базовыми алгоритмами, и уникальные задачи, для которых требуется разработка специализированных алгоритмов анализа.

Далее проводится анализ методических подходов к реализации процесса анализа ТМИ в реальном времени. Обосновано проведение исследования на базе методических подходов, реализованных в телеметрическом информационно-вычислительном комплексе (ТМИВК) ЦУП российского сегмента МКС. Важным вопросом при организации обработки и анализа ТМИ является организация исходных данных (ИД), содержащих задание на обработку ТМИ каждого КА. В ТМИВК модель организации обработки основана на использовании языка подготовки исходных данных. ИД для модуля обработки ТМИ содержат задание на обработку ТМ-параметров базовыми (типовыми) алгоритмами, а специализированная обработка задаётся в ИД для модуля анализа ТМИ. Оба этих модуля работают независимо, что существенно ограничивает возможности по их сопряжению. Кроме того, существующий язык задания алгоритмов анализа чрезвычайно сложный, имеет мало сходств с современными языками программирования. Ещё одним существенным фактором являются идентификаторы телеметрических параметров, которые могут содержать в себе цифры, арифметические операторы и другие печатные символы, что является недопустимым в современных языках программирования.

Таким образом, в работе предлагается разработать язык описания алгоритмов анализа ТМИ на основе современных языков программирования, внедрить его в используемый язык задания исходных данных на обработку ТМИ и реализовать в

программных модулях ТМИВК. Разработанный язык должен иметь высокую степень унификации

$$U = \frac{|E_u|}{|E|} = \frac{|E| - |E_n|}{|E|} \rightarrow \max,$$

а уникальные элементы $E_n \subset E$, вводимые в язык для задач обработки и анализа ТМИ, не должны существенно увеличивать объём кода алгоритмов анализа:

$$L(\text{code}) \rightarrow \min.$$

Другой не менее важной задачей автоматизированного анализа ТМИ является задача наглядного представления результатов обработки и анализа ТМИ на мнемосхемах. В современных телеметрических комплексах формирование мнемосхем реализуется двумя способами. В первом случае мнемосхемы непосредственно реализуются в программном комплексе. Данный подход позволяет сравнительно быстро создать одну мнемосхему, но теряет свою эффективность при подготовке набора мнемосхем. Во втором случае для описания мнемосхем используются исходные данные, формируемые вручную в текстовом виде или с использованием некоторой среды подготовки форм отображения. К недостаткам последнего подхода можно отнести весьма ограниченные возможности по представлению информации. Оба подхода обладают достаточно высокой трудоёмкостью создания мнемосхем, что всегда является ограничивающим фактором при разработке телеметрического обеспечения полёта КА.

Требуется разработать методический аппарат, позволяющий сравнительно низкими трудовыми затратами создавать **динамические, интерактивные** мнемосхемы отображения состояния БС КА с использованием визуального конструктора и подпрограмм управления мнемосхемами, написанных на языке анализа ТМИ. То есть, критерием является среднее время $T_{cm}(R_{(i)}^{komp})$ создания мнемосхемы, контролирующей состояние КА на основе значений ТМ-параметров $R_{(i)}^{komp}$:

$$T_{cm}(R_{(i)}^{komp}) \rightarrow \min$$

Проведён подробный анализ особенностей передачи ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов, контроль которых осуществляется на участках выведения, автономного полёта, стыковки и посадки транспортных пилотируемых кораблей (ТПК) «Союз МС», в процессе проведения медицинских обследований и экспериментов на борту МКС, а также при выполнении космонавтами внекорабельной деятельности. Выявлены недостатки используемого в ЦУП комплекса обработки медицинской информации, который способен одновременно обрабатывать только один из поступающих потоков медицинской информации, а его работа основана на процедурных методах, которые обрабатывают данные, содержащие радиопомехи и наводки, вызванные мышечной активностью космонавтов, на ненадлежащем уровне. Требуется разработать методику анализа ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов, с максимально высокой вероятностью распознавания сигнала ЭКГ.

$$p(A^{ЭКГ}) \rightarrow \max$$

Таким образом, задача исследования по совершенствованию средств автоматизированного анализа ТМИ для пилотируемых орбитальных станций сводится к разработке:

– языка описания алгоритмов анализа ТМИ в составе языка подготовки исходных данных на обработку ТМИ с высоким показателем унификации и компактным синтаксисом;

- методики подготовки и отображения мнемосхем анализа состояния БС КА, управление которыми осуществляется подпрограммами, записанными на языке анализа ТМИ;
- методика нейросетевого анализа ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов, более эффективного, чем штатный алгоритм.

Во второй главе обоснован подход к совершенствованию системы автоматизированного анализа ТМИ в реальном времени путём разработки набора инструментальных средств, в основу которых положен предметно-ориентированный, высокоуровневый язык написания подпрограмм автоматизированного анализа ТМИ (**язык анализа ТМИ**).

Подпрограммы анализа ТМИ встраиваются в исходные данные на обработку ТМИ как отдельные алгоритмы, наряду с другими алгоритмами преобразования значений телеметрических (ТМ) параметров, что позволяет подавать на вход обычным алгоритмам преобразований результаты анализа и наоборот. В каждой подпрограмме анализа указывается состав входных и выходных параметров, имена переменных, локальные функции и пользовательские типы. В результате трансляции исходных данных для каждой подпрограммы анализа транслятором исходных данных формируется внутреннее представление задачи анализа в виде байт-кода, как это делается, например, в языках Java и Python. Исполнение задач анализа в реальном времени по мере поступления значений входных ТМ-параметров осуществляется с помощью интерпретатора, который выполняет функции, аналогичные виртуальным машинам в современных языках программирования.

Такой подход к обработке телеметрической информации позволяет создать программное обеспечение, реализующее транслятор и интерпретатор задач анализа, а всю прикладную логику вычислений, требуемых при анализе ТМИ конкретных КА, задавать в виде исходных данных для подпрограмм анализа на высокоуровневом предметно-ориентированном языке.

На Рис. 1 представлена модель языка анализа ТМИ. Синтаксис языка основан на синтаксисе современных высокоуровневых языков программирования C++, C#, Java, знакомых большинству программистов и в основном применяющихся при разработке

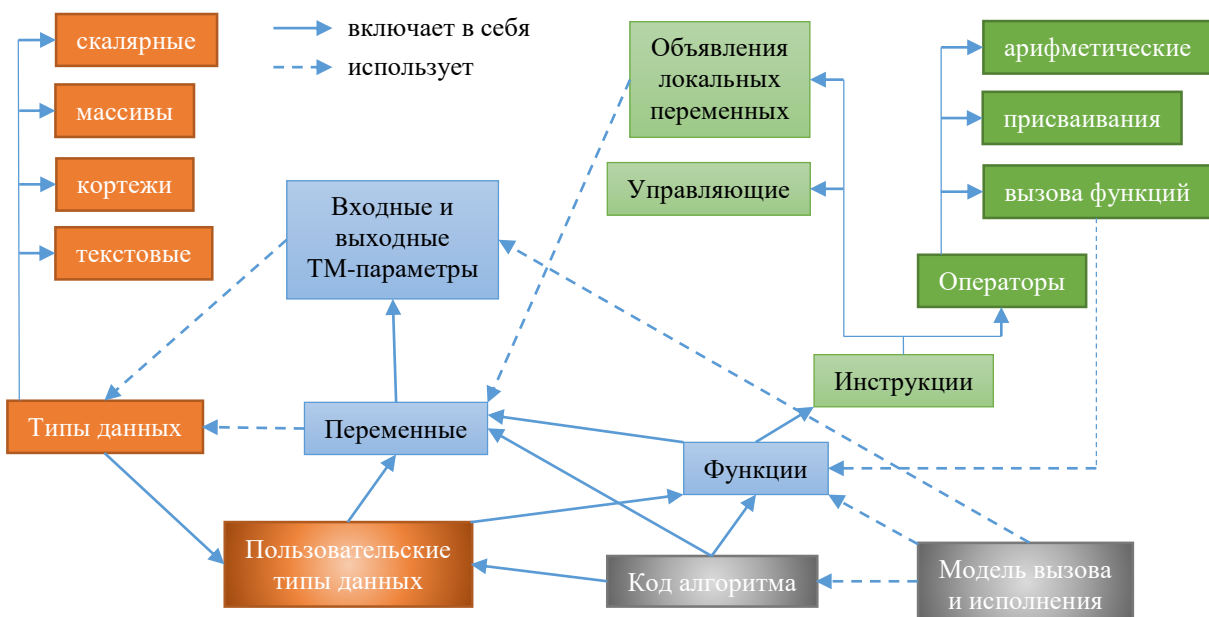


Рис. 1. Модель языка анализа ТМИ

специального программного обеспечения ЦУП. Далее будем называть их **основные языки программирования**. Разработка языка выполнена на основе теории формальных грамматик, описание языка приводится с использованием расширенных форм Бэкуса-Наура (РБНФ).

Общая структура задания подпрограмм на языке анализа приведена на Рис. 2.

Базовые типы данных языка основаны на типах данных языка С#. К уникальным типам данных относятся:

код – кодовый тип, занимающий 9 байтов, из них 8 байтов (64 бита) отводятся под значение кода и 1 байт (8 бит) под длину;

кортеж – совокупность элементов как одного, так и разных типов. В современных языках программирования кортежи только набирают популярность;

```

АНАЛИЗ (
  <Способ запуска и исполнения подпрограммы>
  <Объявления входных и выходных параметров>
  <Объявления переменных>
  <Объявления пользовательских типов>
  <Описание функций>
{
  <Код главной функции подпрограммы>
}
)

```

Рис. 2. Общая структура задания подпрограммы анализа ТМИ.

ПАРАМ – динамический тип данных, основанный на значении некоторого ТМ-параметра, тип его содержимого зависит от текущего значения ТМ-параметра.

МАСАН – массив анализа, специальный тип для передачи цифровых массивов между подпрограммами анализа;

ТЕКСТАН – текст анализа, специальный тип для форматного вывода текстовых протоколов и документов;

АССII – тип ТМ-параметров, содержащих короткие текстовые значения до 16 символов для отображения на алфавитно-цифровых формулярах наряду с обычными функциональными и кодовыми параметрами.

Введены типы даты и времени, основанные на целых числах и позволяющие задавать в коде дату и время литеральными константами вида: 12.04.1961, 09:07:00.

Операторы языка анализа ТМИ аналогичны операторам языка С#, за исключением дополнительно введённых операторов работы с битовыми полями.

$a[b:c]$ – тернарный оператор взятия битового поля из элемента «а», начиная с бита «b» длиной «с» (

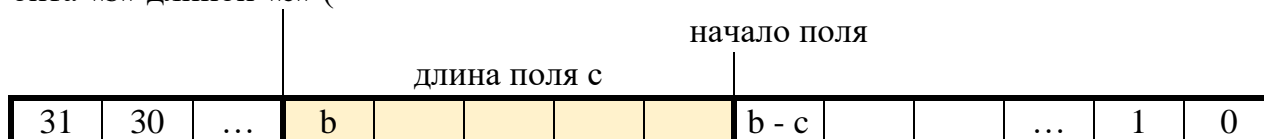


Рис. 3).

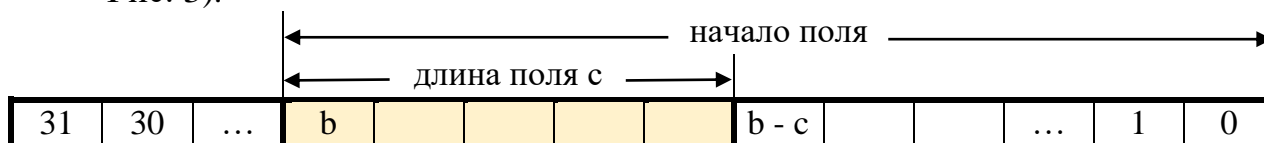


Рис. 3. Взятие битового поля $a[b:c]$

$a[b]$ – бинарный оператор взятия одного бита № «b» из элемента «a», является более короткой записью предыдущего оператора и эквивалентен $a[b:1]$.

$a \ \$ \ b$ – бинарный оператор конкатенации битовых полей, формирует кодовое значение, состоящее из битов выражений «a» и «b», причём биты «a» будут старшими.

Поскольку в задачах обработки ТМИ работа с битовыми данным является весьма распространённой, использование для этих целей специальных операторов существенно упрощает работу, сокращает длину кода, повышает выразительность и скорость исполнения кода, снижает вероятность ошибки.

Большинство управляющих конструкций языка анализа ТМИ аналогичны управляющим конструкциям языков C++, C# и Java. К ним относятся: **if, if – else, if – else if ...– else, for, while, do – while, switch, break, continue, return**. Рассмотрим специально разработанный для языка анализа ТМИ оператор кодового выбора. Его синтаксис в расширенных формах Бэкуса-Наура описывается следующим образом.

```
Code switch = "codeswitch", Тип формата кода, "(", Выражение ")",
"{",
    Список кодовых элементов,
    [ Альтернатива ELSE ],
"}";
Тип формата кода = "Б" | (* битовый *)
                  "В" | (* восьмеричный *)
                  "Ш" | (* шестнадцатеричный *)
Кодовый элемент = Кодовое значение, ":", Инструкция;
Кодовое значение = {Цифра Б}- | {Цифра В}- | {Цифра Ш}-;
Цифра Б = ["0"|"1"|"-"]; (* бинарные *)
Цифра В = ["0".."7"|"-"]; (* восьмеричные *)
Цифра Ш = ["0".."9"|"A".."F"|"-"]; (* шестнадцатеричные *)
Альтернатива ELSE = "else", ":", Инструкция;
```

Лучше всего работу оператора **codeswitch** можно пояснить на примере.

```
codeswitch Б, (ТМИ-Q[6] $ ТМИ-Q[7]) {
    000001--0011----: { ... } @ Пакет технологического режима НП
    000001-----: { ... } @ Пакет штатного режима НП
    000000---0-----: { ... } @ Пакет режима ВП
    else: { ... } @ Неизвестный пакет
}
```

В примере 6-й и 7-й байты массива ТМИ-Q объединяются в 16-разрядное кодовое значение, по которому осуществляется выбор. Полученный код последовательно сопоставляется с заданными двоичными константами, в которых знаком «-» заданы безразличные состояния. Использование оператора кодового выбора существенно упрощает код обработки ТМИ и повышает его эффективность.

Кортежи в основном используются для возврата нескольких значений из функции. Кортежи активно используются в алгоритмах анализа движения центра масс и вокруг центра масс КА. Введены понятия трёх разных видов кортежей: кортеж возврата, кортеж выражений и кортеж объявления. Покажем использование кортежей на примере.

```
01 (double q0, double q1, double q2, double q3)
    ВекторВКватернион(double x, double y, double z) {
02     if (x == 0 && y == 0 && z == 0)
03         return (1, 0, 0, 0);
04     else
05         return (0, x, y, z);
06 }
...
```

```
07 (double Aq0, double Aq1, double Aq2, double Aq3) =
    ВекторВКватернион(x1, y1, z1);
```

В строке 01 примера, в заголовке функции описан кортеж возврата, в строках 03 и 05 используется кортеж выражений, а в строке 07 результат вызова функции присваивается в кортеж объявления.

В завершении главы приводится полная грамматика разработанного языка анализа ТМИ, описанная с использованием расширенных форм Бэкуса-Наура.

В третьей главе разработаны методики синтеза системы анализа, использующей разработанный язык анализа ТМИ, включая методику интерпретации исходных данных для автоматизированного анализа ТМИ КА, методику формирования мнемосхем отображения результатов анализа ТМИ с использованием интерактивных динамических мнемосхем. В завершение главы разработана методика нейросетевого анализа ТМИ, содержащий медицинские показания космонавтов.

Для исполнения подпрограмм на языке анализа ТМИ необходимы средства **трансляции** (компиляции) и **интерпретации** (исполнения) этих подпрограмм. Транслятор проверяет синтаксис подпрограммы, связывает её с входными и выходными ТМ-параметрами, переводит код подпрограммы во внутреннее двоичное представление, состоящее из различных таблиц и байт-кода, и сохраняет в составе исходных данных на обработку ТМИ. Трансляция выполняется методом однопроходного рекурсивного спуска.

На этапе обработки телеметрической информации интерпретатор загружает результаты трансляции исходных данных и, получая на вход поток ТМ-значений, исполняет байт-код при помощи виртуальной машины, аналогичной виртуальным машинам в современных языках программирования. Однако в отличие от них разработанный интерпретатор ориентирован на работу с телеметрическими значениями.

Помимо реализации задач анализа ТМИ язык анализа используется для управления мнемосхемами отображения состояния БС КА на основе поступающей в реальном времени ТМИ. Для решения указанной задачи разработана **методика формирования мнемосхем отображения результатов анализа ТМИ БС КА**.

1. В системе подготовки кадров отображения в визуальном редакторе готовится макет мнемосхемы из набора геометрических фигур и изображений, которым назначаются имена.
2. Программа на языке анализа ТМИ (**скрипт**) принимает на вход значения ТМ-параметров и сигналов времени, на основании которых управляет отображаемыми фигурами.
3. Обращаясь к фигурам по именам, скрипт меняет их свойства, создаёт новые и удаляет старые фигуры, позволяя создавать динамические мнемосхемы.
4. Скрипт может реагировать на действия пользователя, тем самым позволяя создавать интерактивные мнемосхемы.
5. Программа отображения интерпретирует скрипт на языке анализа ТМИ при помощи модуля обработки ТМИ.

На Рис. 4 приведена структурная схема системы отображения мнемосхем на основе ТМИ, использующей скрипты на языке анализа ТМИ.

В работе определён рациональный набор геометрических фигур, которых достаточно для реализации большинства мнемосхем отображения состояния БС КА.

Для удобства работы некоторые специальные типы данных реализованы в скрипте через базовые типы языка. Например, для типа FontFamily (шрифт) можно просто указать название шрифта (тип string), а цвет задаётся целым 32-разрядным числом, в котором

старший байт отвечает за прозрачность, следующий – за красный, далее – за зелёный и последний – за синий. Так выглядит задание розового цвета текста:

```
АВД-т . цветШрифта = 0xFFFA3C0;
```

Через специальный объект Мнемосхема из скрипта можно добавить новые фигуры, воспроизвести звуковой файл, вывести сообщение пользователю, переключить отображение на другой формуляр и т. д.

Ссылки на графические элементы передаются в интерпретатор скрипта на этапе инициализации мнемосхемы и доступны по своим именам через переменные.

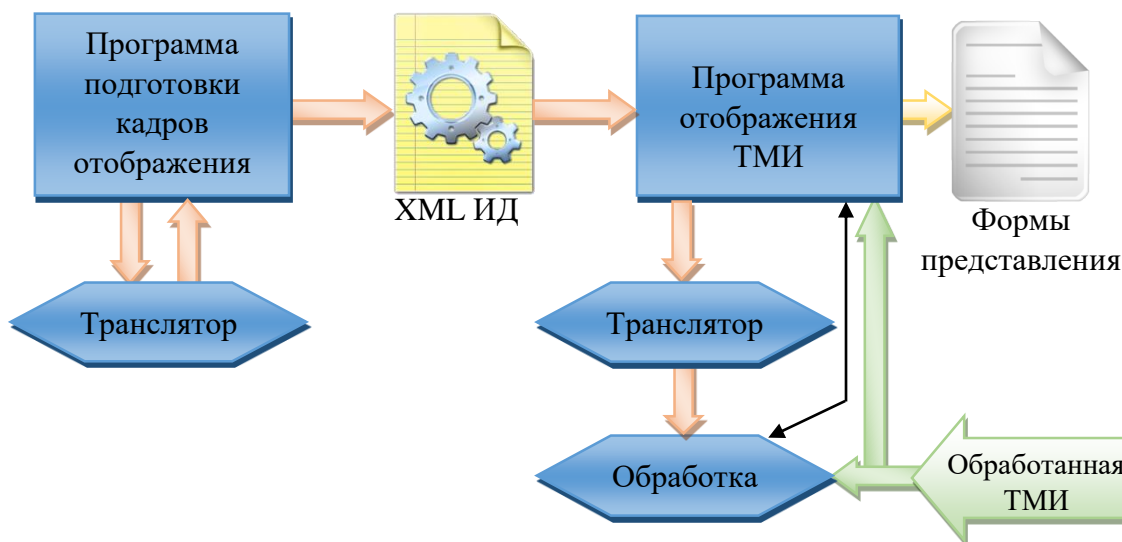


Рис. 4. Структурная схема системы отображения мнемосхем.

Программисту предоставляются уникальные возможности по интеграции потоков ТМИ с разных бортов за счёт возможности обращаться из скрипта к ТМ-параметрам другого борта посредством синтаксической конструкции:

```

Телеметрический параметр =
Идентификатор | (* Имя параметра *)
Идентификатор, "_", Идентификатор (* Имя борта и параметра *)
  
```

При этом система отображения ТМИ возвращает текущее значение ТМ-параметра из указанного борта, если по нему в настоящее время идёт сеанс. Таким образом, можно создавать мнемосхемы и выполнять комплексный анализ составных изделий, например, ракеты космического назначения (РКН) как единого изделия, используя ТМ-параметры ракеты-носителя и выводимого ею корабля на участке выведения, используя параметры транспортного корабля и модуля МКС на участках стыковки и расстыковки, используя параметры различных модулей МКС и т. п. Предложенный механизм поднимает анализ состояния сложных изделий космической техники на новый качественный уровень.

В качестве одного из направлений применения разработанных средств автоматизированного анализа ТМИ в работе разработана нейросетевая методика анализа ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов.

На Рис. 5 приведена блок-схема разработанной методики нейросетевого анализа медицинской ТМИ со скафандров «Орлан-МКС», поступающей в ЦУП по трём каналам:

1. Пакеты УС-23 в составе американской ТМИ из ЦУП в г. Хьюстон.
2. ТМ-кадры с полным составом измерений от системы «Транзит».
3. Показания космонавтов, переданные через подключённые к скафандрам на этапе шлюзования электрофалы.

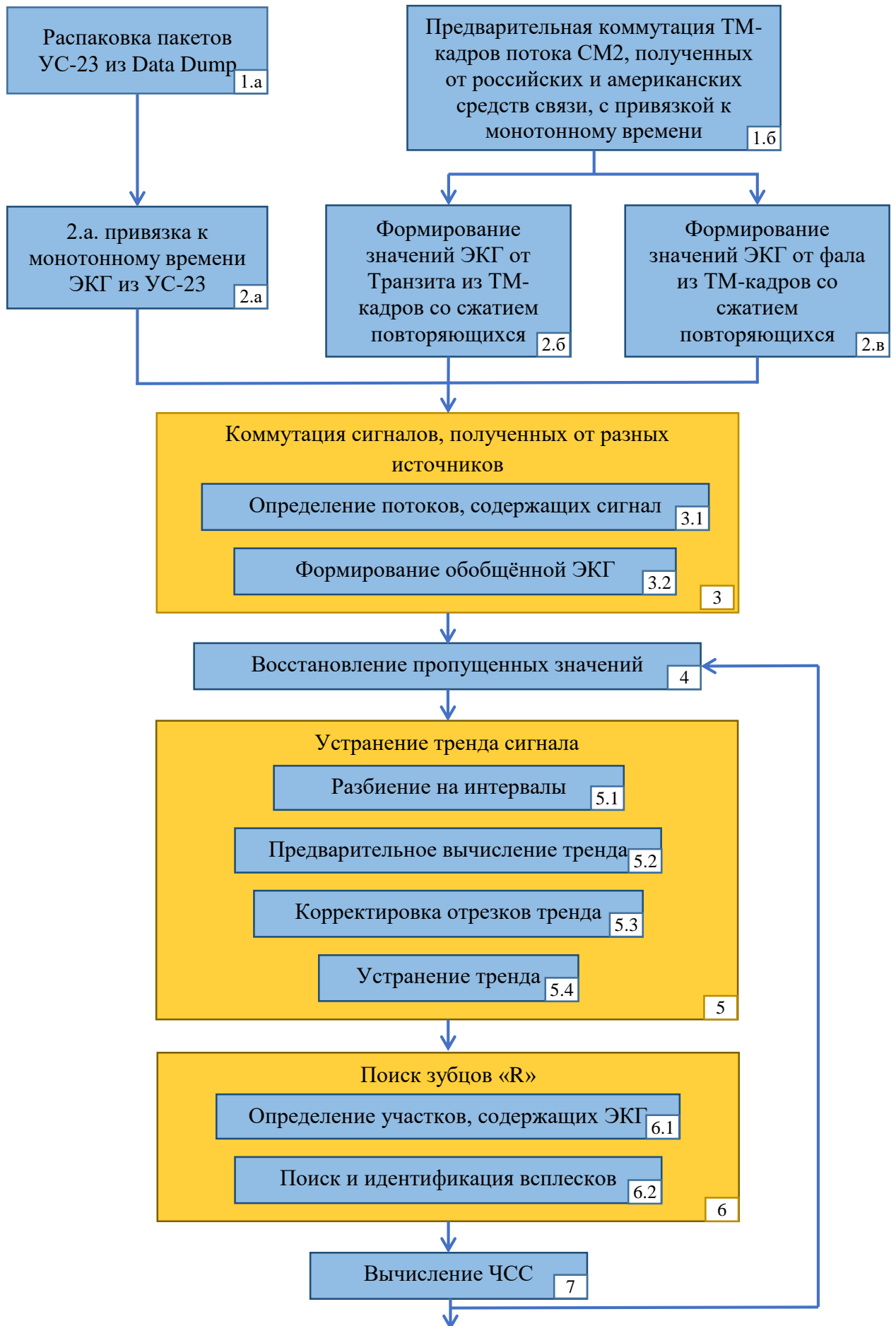


Рис. 5. Блок-схема методики нейросетевого анализа медицинской ТМИ.

Методика включает стадии предварительной обработки входных сигналов, равномерной привязки ко времени и извлечения показаний каждого космонавта (шаги 1, 2); коммутации единого сигнала электрокардиограммы (ЭКГ) для каждого космонавта с учётом качества (шаг 3); восстановления пропущенных (сжатых) значений (шаг 4). Для устранения плавающего тренда (см. Рис. 6) сигнал разбивается на интервалы $\eta_i \in I$ длиной $\Delta T^{tr} = 0,700c$, содержащие порядка $\|I\| = L = \Delta T^{tr} / \Delta T \approx 140$ точек. На каждом интервале определяется **верхнее предельное значение** η^{613} , для чего измерения интервала сортируются в отдельном массиве $\eta'_i \in \text{data2}$ и берётся элемент, находящийся на позиции:

$$\eta^{613} = \text{data2}[L \cdot 0,9],$$

такой, что 90% измерений интервала будут меньше этого значения, а 10% - больше. Как видно из Рис. 6, ЭКГ содержит преобладающий сигнал низкого уровня, и кратковременные всплески сигнала – зубцы «R». Для вычисления тренда используется только сигнал низкого уровня, для чего все измерения $\eta_i > \eta^{613}$ заменяются на средние.

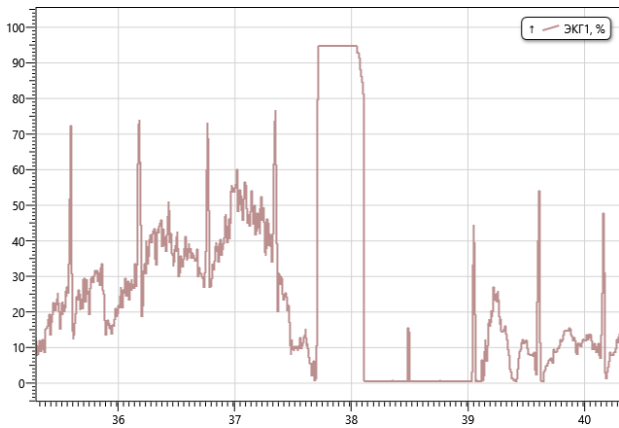


Рис. 6. Пример ЭКГ

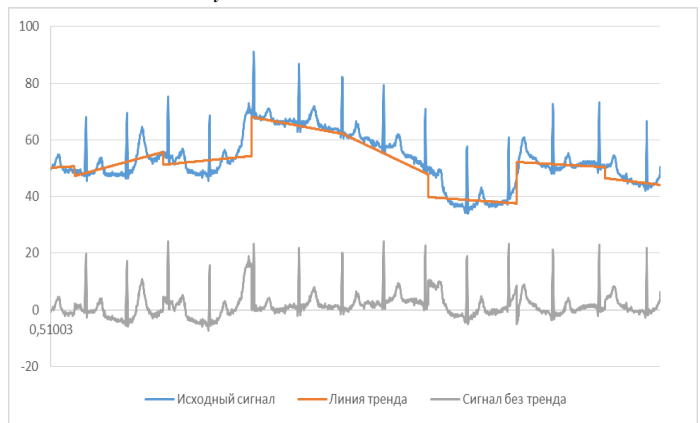


Рис. 7. Несоединённые отрезки тренда

Значения на каждом интервале аппроксимируются по методу наименьших квадратов линейной функцией $f(t_i) = a_0 + a_1 \cdot t_i$ с критерием $\sum_i (\eta_i'' - f(T(\eta_i'')))^2 \rightarrow \min$.

Так как при таком подходе концы отрезков тренда на соседних интервалах не совпадут (Рис. 7), выполняется совмещение концов отрезков тренда в средней точке.

Поиск зубцов «R» (шаг 6) выполняется с применением двух нейросетей. Первая нейросеть nn_1 топологии (67, 30, 13, 1) определяет, содержит ли рассматриваемый интервал ЭКГ либо там шумы, пустой сигнал, сигнал с неподключённого датчика (шаг 6.1). Для подачи в нейросеть данные сортируют по возрастанию в отдельном массиве $\eta'_i \in \text{data2}$, прореживают значения, заменяя каждые 5 соседних на их среднее арифметическое $\eta_j'' = (\eta'_{5j} + \eta'_{5j+1} + \eta'_{5j+2} + \eta'_{5j+3} + \eta'_{5j+4}) / 5$, переходят к массиву разностей $d\eta_j'' \in \text{data}/5$, $d\eta_j'' = \eta_j'' - \eta_{j-1}''$. Результатом проверки нейросетью полученного массива $\text{data}/5$ будет вероятность того, что данные содержат ЭКГ: $nn_1(\text{data}/5) \in [0;1]$. Нейросеть обучена на множестве реальных сигналов космонавтов, а исполнение нейросети в компактной форме реализовано на языке анализа ТМИ (код приведён в диссертации).

Для участков, содержащих ЭКГ, выполняется поиск зубцов «R» (шаг 6.2). Алгоритмическим путём находят всплески, удовлетворяющие критерию:

$$\exists j, k \in N : \begin{cases} k - j - 1 \geq 3 \\ \eta_{j-1} < \eta^{6n3} \\ \eta_i \geq \eta^{6n3}, j \leq i \leq k \\ \eta_{k+1} < \eta^{6n3} \end{cases}$$

Найденные значения вместе с окрестностью проверяются на соответствие зубцу «R» с помощью нейросети nn_2 топологии (16, 12, 8, 1), также обученной на реальных показаниях космонавтов и реализованной на языке анализа ТМИ.

На основе найденных зубцов «R» с учётом возможных пропусков вычисляется текущая частота сердечных сокращений (ЧСС) космонавта:

$$ЧСС = \frac{60}{T(R_j) - T(R_{j-1})},$$

где $T()$ – время полученного измерения.

На языке анализа ТМИ все описанные алгоритмы записываются отдельным подпрограммами, а обработка ЭКГ каждого космонавта задаётся приписыванием каждому параметру ЭКГ цепочки из предварительно описанных алгоритмов.

Результаты нейросетевого анализа ЭКГ космонавта приведены на Рис. 8.

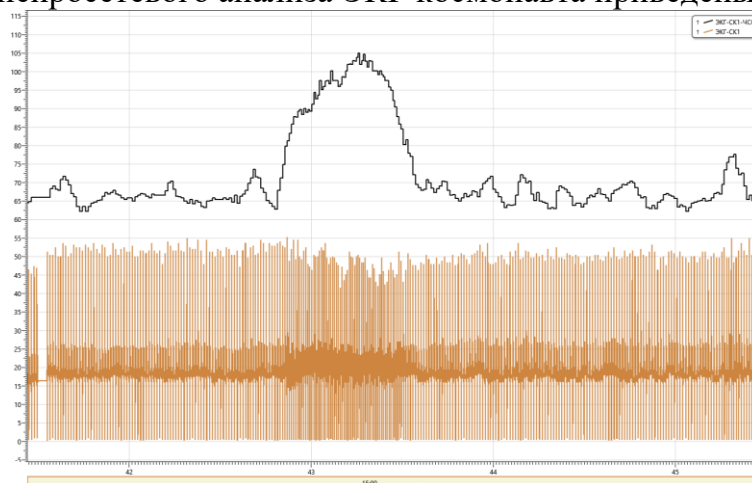


Рис. 8. Пример вычисления ЧСС (чёрный) на длительном интервале времени.

Вероятность успешного распознавания сигнала ЭКГ разработанным алгоритмом составляет $P(A^{ЭКГ}) = 97,9\%$, в то время, как штатный алгоритм, основанный на процедурных механизмах, имеет вероятность лишь 54,2%.

В четвёртой главе приводятся примеры практического применения разработанных средств, которые успешно внедрены в программное информационно-телеметрическое обеспечение ряда центров управления полётами, включая ЦУП российского сегмента МКС, ЦУП космической системы «Канопус-В», белорусского космического аппарата. Приводятся примеры реализованных на разработанных средствах мнемосхем, обеспечивающих автоматизированный анализ ТМИ КА в реальном времени. Описывается алгоритм нейросетевого анализа отделения боковых блоков РН типа «Союз». Приводятся результаты практической отработки методики анализа медицинских показаний космонавтов с использованием нейросетей. Проводится оценка результатов

практического применения системы анализа ТМИ на основе разработанного методического аппарата.

Для оценки ясности, лёгкости изучения и единообразия понятий в языке разработан новый показатель унификации языка программирования, определяемый как:

$$U = \frac{|E_u|}{|E|},$$

где E – множество всех элементов языка, а $E_u \subset E$ – множество унифицированных элементов, заимствованных из других (основных) языков. В результате оценки установлена степень унификации разработанного языка анализа ТМИ в **71,8 %**, а степень унификации использовавшегося ранее языка анализа – **11,1 %**. Таким образом, разработанный язык анализа ТМИ имеет существенно более высокую степень унификации, чем использовавшийся ранее язык. Его проще изучать программистам, знающим основные языки программирования, проще использовать одновременно с написанием программ на основных языках, переносить алгоритмы с одного языка на другой, меньше вероятность допустить ошибку.

Практические исследования по оценке эффективности введённых в язык анализа ТМИ битовых операторов показали сокращение длины и, как следствие повышение выразительности, кодовых преобразований на 17-39 % (в среднем **29%**). Данный код быстрее исполняется за счёт меньшего числа операций и меньше подвержен ошибкам при написании.

Проведено практическое исследование по оценке скорости создания мнемосхем на основе заранее подготовленного задания заказчика. В трёх различных системах подготовки мнемосхем была создана мнемосхема анализа состояния бортовой аппаратуры широкополосной системы связи служебного модуля «Звезда» МКС. В ходе практического исследования замерялось время, затраченное специалистами на создание визуального макета мнемосхемы, описания логики её функционирования и отладку с использованием ТМИ. В Таблица 1 приведены результаты исследования.

Таблица 1

Система	Время создания мнемосхемы T_{cm} , ч
Система 1	20
Система 2	13
Разработанная система с использованием языка анализа ТМИ	5

Таким образом подтверждена высокая эффективность разработанной системы, использующей визуальный конструктор макета мнемосхемы и скрипт на языке анализа ТМИ, управляющий поведением мнемосхемы. Достигнут выигрыш в скорости создания мнемосхем в сравнении с существующими системами в $2,5 \div 4$ раза. Этот выигрыш позволяет создавать более сложные мнемосхемы или готовить больше мнемосхем для каждого КА, что в конечном итоге повышает качество анализа ТМИ и надёжность управления КА.

Практические исследования с задействованием добровольцев по оценке эффективности анализа состояния БС КА с использованием мнемосхем в сравнении с применением табличных формуляров, показали, что среднее время выполнения анализа сокращается в 3 раза, а вероятность ошибочного заключения снижена на 20%.

Результаты проведённого исследования использовались при создании телеметрического комплекса центра управления полётами (ЦУП) космической системы (КС) «Канопус-В» в г. Королёв и идентичного ЦУП Белорусского космического аппарата

(БКА) в г. Минск. В частности, было реализовано 15 мнемосхем отображения состояния БС КА, разработан ряд алгоритмов анализа ТМИ, включая алгоритмы учёта наработки бортовых систем.

На Рис. 9 приведён пример разработанной мнемосхемы анализа состояния системы управления КА «Канопус-В». Данная мнемосхема анализирует $R_{(i)}^{контр} = 162$ телеметрических параметра, характеризующих состояние подсистем, состояние которых в отсутствие мнемосхемы пришлось бы контролировать по $|W_{(i)}| = 10$ формулярам.

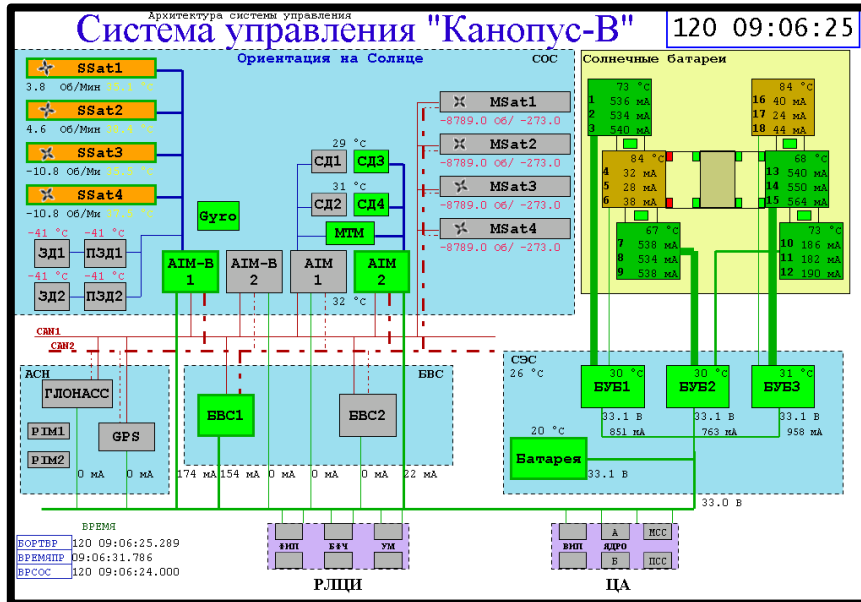


Рис. 9. Мнемосхема состояния системы управления КА «Канопус-В»

На Рис. 10 а) изображён визуальный конструктор, в котором создан графический макет данной мнемосхемы, а на Рис. 10 б) – фрагмент подпрограммы на языке анализа ТМИ (скрипта), управляющей поведением мнемосхемы.

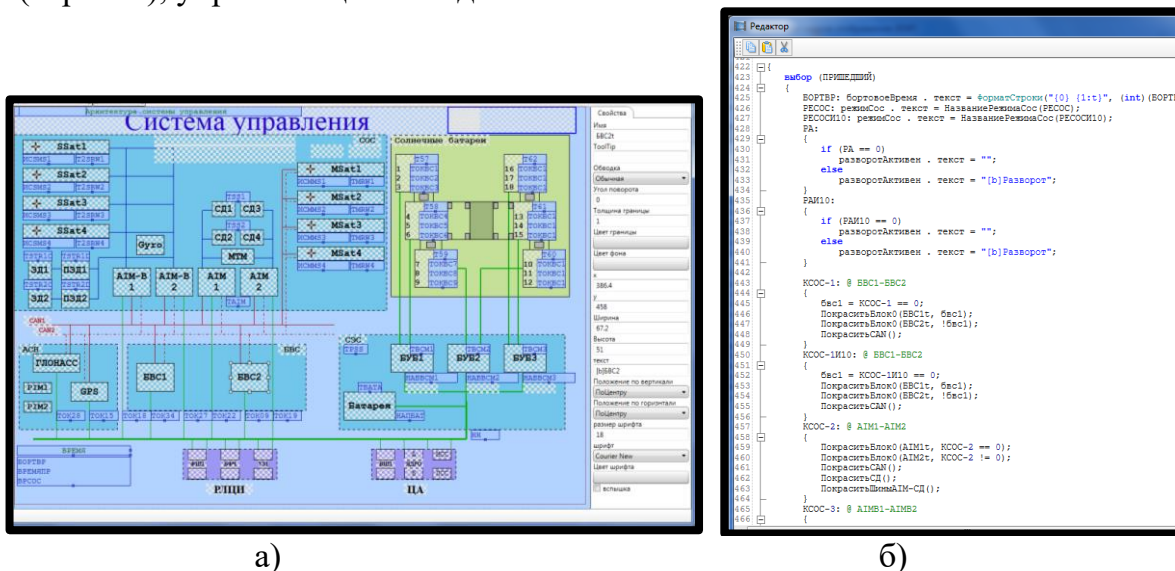


Рис. 10. Создание мнемосхемы системы управления КА «Канопус-В»

Для контроля процесса выведения транспортных пилотируемых кораблей (ТПК) «Союз МС» на ракетах-носителях (РН) «Союз-ФГ» были разработаны две мнемосхемы. Первая динамическая мнемосхема впервые анализирует и отображает состояние всей

РКН, как единого изделия, состоящего из РН и ТПК (Рис. 11 а)), а вторая выводит циклограмму основных полётных событий (Рис. 11 б)).

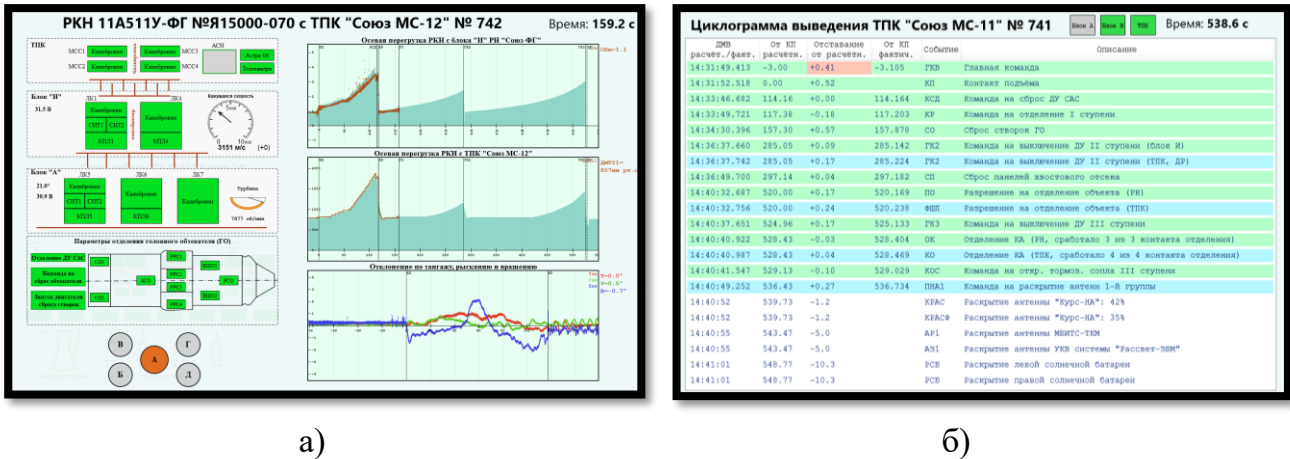


Рис. 11. Динамическая мнемосхема оперативного контроля выведения РН «Союз-ФГ» с ТПК «Союз MS»

В качестве заключительного примера реализации нейросетевого анализа ТМИ на языке анализа ТМИ подробно рассматривается разработанный алгоритм анализа динамического процесса отделения боковых блоков РН «Союз» от центрального блока. На Рис. 12 приведён пример графиков параметров ПВ, У1 и У2, измеряющих характеристики процесса отхода боковых блоков.

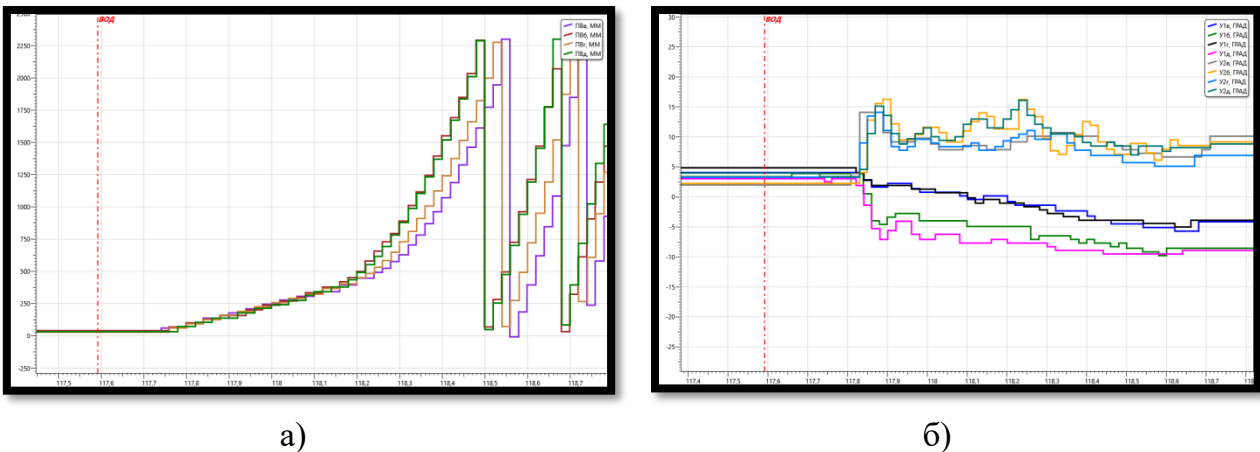


Рис. 12. Графики параметров отхода боковых блоков от центрального блока

Нейросеть даёт заключение по каждому боковому блоку о соответствии параметров его отделения среднеопытному процессу. Обученная нейросеть показала хорошие результаты при оценке новых данных, достоверно диагностируя штатное либо anomальное поведение телеметрических параметров. В процессе запусков ТПК «Союз MS» в 2019 году нейросеть успешно отработала и диагностировала штатное отделение ББ РН по телеметрической информации, поступающей в реальном времени. Нейросеть диагностировала нештатное отделение блока «Д» при аварийном запуске ТПК «Союз MS-10» в 2018 году. Экспериментальная оценка точности работы алгоритма нейросетевого анализа показала вероятность корректной оценки нейросети $P(A^{НС}) = 91,4\%$, в то время как вероятность корректной оценки, выполняемой экспертами в ходе оперативного анализа, составляет только $P(A^{эксперт}) = 76,9\%$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертации поставлена и решена важная научно-практическая задача по разработке моделей и методик автоматизированного анализа телеметрической информации в реальном масштабе времени для пилотируемых орбитальных станций, автоматических и пилотируемых КА, а также средств их выведения. Разработанные модели и методики основаны на использовании специального высокоуровневого предметно-ориентированного языка программирования, предназначенного для задания алгоритмов анализа ТМИ.

В ходе ее решения получены следующие основные наиболее важные и новые научные результаты:

1. На основе системного анализа существующих подходов реализации автоматизированного анализа ТМИ в реальном времени сформирована система показателей и критериев качества системы анализа ТМИ, определены пути совершенствования системы.

2. Разработана лингвистическая модель языка описания алгоритмов анализа ТМИ (язык анализа ТМИ), позволяющего на высокоуровневом предметно-ориентированном языке описывать алгоритмы анализа ТМИ в составе исходных данных на обработку ТМИ. Синтаксис языка построен на базе современных высокоуровневых языков программирования. Введён новый показатель унификации языка программирования; показана высокая степень унификации разработанного языка (**71,8%**). Специально разработанные операторы и синтаксические конструкции позволяют компактно и наглядно описывать, а также эффективнее исполнять типовые для обработки и анализа ТМИ конструкции (выигрыш в среднем на **29%** для кодовых преобразований).

3. Разработана методика формирования мнемосхем отображения результатов анализа ТМИ, отличающаяся от существующих использованием управляющей подпрограммы на языке анализа ТМИ, что позволяет формировать интерактивные динамические формы отображения в реальном времени. Показана высокая эффективность предложенной системы подготовки мнемосхем (выигрыш по времени в **2,5÷4** раза). Мнемосхемы, функционирующие под управлением подпрограмм на языке анализа ТМИ, предоставляют больше возможностей по наглядному представлению результатов анализа ТМИ (в среднем анализ быстрее в 3 раза, вероятность ошибочного анализа снижается на 20%), в том числе возможности по совместному анализу функционирования сложных изделий космической техники, таких как несколько модулей пилотируемой орбитальной станции и пристыкованных к ней космических кораблей, ракеты-носителя и выводимого ею космического корабля и т. п.

4. Разработана методика автоматизированного нейросетевого анализа ТМИ, содержащей медицинские показания космонавтов. Нейросети обучены на ТМИ, содержащей реальные показания космонавтов. Потоки ТМИ в реальном времени коммутируются в единый поток, включающий в себя наилучший по качеству сигнал из нескольких потоков. Методика показала высокую эффективность в сравнении с использовавшимися ранее, в том числе по обработке зашумлённых участков сигнала, возможностям автоматического выбора наилучшего по качеству сигнала, адаптации к индивидуальным особенностям космонавтов и возможностям послесекундного анализа полученных данных. Методика реализована на разработанном языке анализа ТМИ и функционирует в опытном режиме в ЦУП российского сегмента МКС с 2020 года. Методика распознаёт **98,8 %** сигнала ЭКГ, в то время, как вероятность штатного алгоритма составляет лишь **46,6 %**.

5. Разработан и реализован на языке анализа ТМИ алгоритм нейросетевого анализа отделения боковых блоков РН «Союз». По поведению динамических параметров нейросеть оценивает, соответствует ли отделение каждого из четырёх боковых блоков РН среднеопытному. В ходе опытной эксплуатации в ЦУП обученная нейросеть в реальном времени показала хорошие результаты при оценке новых данных, достоверно диагностируя штатное либо аномальное поведение телеметрических параметров. Точность работы нейросети составила **91,4 %** против точности оперативного анализа, выполняемого экспертами, – **76,9 %**.

6. Результаты диссертационного исследования внедрены в ЦУП российского сегмента МКС, ЦУП космической системы «Канопус-В», ЦУП Белорусского КА, единый ЦУП космической системы «Ресурс-П», НИР «Астролябия» (КА-2), что подтверждается актами.

В результате выполнения работы создан комплекс моделей и методик автоматизированного анализа телеметрической информации в реальном масштабе времени, использование которых при создании комплексов информационно-телеметрического обеспечения позволяет сократить время создания комплекса, время подготовке к новому КА, повысить эффективность выполнения анализа состояния КА.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК России:

1. Махалов Д. А., Титов А. М. Автоматизированный анализ телеметрической информации // Космонавтика и ракетостроение, вып. 2(95) – г. Королёв, 2017. – с. 146-155.
2. Махалов Д. А., Никитина М. П., Усиков С. Б., Манойло А. В. Телеметрическое обеспечение оперативного контроля полёта ракет и разгонных блоков с использованием спутникового контура управления // Сибирский журнал науки и технологий. – г. Красноярск, 2019. Т. 20, № 3. – с. 344-355.
3. Матюшин М. М., Махалов Д. А. Применение нейросетей к анализу отделения боковых блоков ракеты-носителя «Союз» // Пилотируемые полеты в космос. – Звёздный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина». – 2020. – № 4(37). – с. 42-56.
4. Матюшин М. М., Махалов Д. А., Титов А. М., Анализ параметров движения транспортных кораблей по результатам обработки телеметрической информации // Космонавтика и ракетостроение. – Королёв: АО «ЦНИИмаш». – 2020. – № 6(117) – с. 19-36.
5. Матюшин М. М., Махалов Д. А. Автоматизированная обработка информации от бортовой системы видеоконтроля ракет-носителей // Пилотируемые полеты в космос. – Звёздный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина». – 2021. – № 4(41). – с. 17-35.
6. Махалов Д. А. Разработка языка анализа телеметрической информации // Космическая техника и технологии. – Королёв: АО «ЦНИИмаш». – 2023. – № 3(42)/2023. – с. 112-123.

Программы для ЭВМ:

7. Махалов Д. А., Небосенко С. С., Никитина М. П., Манжуриин Ф. Ф. Программный комплекс центральной системы комплекса базовых средств телеметрического обеспечения // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660783 от 13.08.2019.

8. Махалов Д. А., Небосенко С. С. Программа автоматизированной подготовки исходных данных // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615865 от 13.04.2021.

Публикации в других изданиях:

9. Махалов Д. А., Никитина М. П., Стариков Д. В. Обработка и отображение информации от БСВК РН // Сборник статей VIII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов центра управления полётами – Королёв: ФГУП ЦНИИмаш. – 2018, с. 257-266.

10. Махалов Д. А., Тачёнов С.А., Никитина М. П., Манойло А. В. Обработка телеметрической информации, передаваемой через многофункциональную космическую систему ретрансляции «Луч» от ракет-носителей и разгонных блоков, при пусках с космодрома «Восточный» // Сборник статей VIII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов центра управления полётами – Королёв: ФГУП ЦНИИмаш. – 2018. – с. 244-257.

11. Махалов Д. А., Никитина М. П. Программные средства оперативного контроля полёта ракеты-носителя по ТМИ, передаваемой через МКСР «Луч» // Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Часть 2. – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – 2018. – с. 135-137.

12. Махалов Д. А., Никитина М. П., Манойло А. В. Реализация обработки телеметрической информации, передаваемой через МКСР «Луч» от разгонного блока «Фрегат» при запуске КА «Канопус-В» № 5 и №6 с космодрома «Восточный» // Сборник статей IX научно-технической конференции молодых учёных и специалистов центра управления полётами – Королёв: АО «ЦНИИмаш». – 2019. – с. 238-248.