

На правах рукописи



Соловьев Сергей Владимирович

**ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ОРБИТАЛЬНЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в публичном акционерном обществе «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева»

Официальные оппоненты:

Сазонов Виктор Васильевич, главный научный сотрудник ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им М.В. Келдыша Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор;

Малышев Вениамин Васильевич, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доктор технических наук, профессор;

Литовченко Дмитрий Цезарьевич, начальник тематического конструкторского бюро, заместитель генерального директора АО «Корпорация «Комета», доктор технических наук.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна».

Защита диссертации состоится «19» октября 2021 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана в аудитории 613м по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. За короткий промежуток времени космонавтика стала неотъемлемой частью многоплановой деятельности человечества. Большое значение в жизни человека приобрела информация, непосредственно предоставляемая космическими аппаратами (КА) с орбиты. КА, функционирующей в космическом пространстве, является наиболее значимым, сложным и многофункциональным техническим средством, которое позволяет реализовать поставленные задачи.

Ключевая роль при осуществлении эксплуатации КА принадлежит процессу управления его полетом. Обеспечение полноты достижения цели полета КА, с необходимой надёжностью и безопасностью приводит к высокой трудоёмкости и сложности самого процесса управления. Проблема повышения эффективности управления полетом КА, длительное время находящегося за пределами земной атмосферы в космической среде, весьма агрессивной и в настоящее время далеко не изученной, была и остается одной из самых актуальных проблем космонавтики. Значимость и сложность отмеченной проблемы потребовали проведение комплексных работ по исследованию и поиску путей ее надежного решения.

С 60-х годов прошлого столетия основная направленность исследований состояла в определении и обосновании набора средств, методов и технологий, необходимых для оперативного управления полетом КА, с учетом существующих на тот момент научных и инженерных возможностей. Эти исследования и полученные результаты, в целом позволяют решать задачи эксплуатации космической техники, но до настоящего времени, процесс управления полетом КА остается очень трудоемким, частично автоматизированным и имеет очевидные недостатки. Современные математические методы, интеллектуальные технологии анализа данных и извлечения знаний позволяют по-новому подойти к проблеме повышения эффективности управления полетами КА и решения ими целевых задач.

В условиях увеличения конструктивной сложности КА, длительности их функционирования на орбите, а также при переходе к планетарным перелетам, без использования постоянного контроля КА наземными средствами управления полетом, создание на новых принципах систем телеметрического контроля с использованием интеллектуальных технологий анализа телеметрической информации (ТМИ) является актуальной проблемой. Безусловно, возникает необходимость в более глубоком анализе и прогнозировании состояния КА и его

составных частей. Решение данной проблемы может быть осуществлено на базе разработки, комплексирования, совершенствования и развития принципов и методических основ, автоматизированных, автоматических и интеллектуализированных систем телеметрического контроля, используемых в ходе управления полетом КА.

Проблеме управления космическими полетами посвящены работы А.С. Елисеева, В.Г. Кравца, В.Е. Любинского, Л.Н. Лысенко, В.И. Лобачева и др.

Проблема построения систем телеметрического обеспечения описана в работах В.В. Казакова, Г.И. Козырева, А.Н. Кравцова, Е.Б. Самойлова, А.М. Титова и др.

Созданию теории интеллектуальных систем управления и использованию алгоритмов идентификаций посвящены труды К. Острема, Л. Льюнга, Н.С. Райбмана, Я.З. Цыпкина, П. Эйкхофф, Б.Т. Поляка, Г.С. Поспелова, К.А. Пупкова, Е.А. Микрина, И.М. Макаровой и других ученых.

Исследования, составляющие содержание диссертации, выполнялись в процессе решения научных и практических задач в ходе управления полетом Российским сегментом Международной космической станции (РС МКС), транспортных пилотируемых кораблей (ТПК) «Союз», транспортных грузовых кораблей (ТГК) «Прогресс», КА типа «Ямал», «БелКА», «Казсат», «Экспресс-МД» при непосредственном участии, а в ряде случаев - под научным руководством автора.

Объектом диссертационного исследования является интеллектуализированная система телеметрического контроля КА различного назначения, ТПК, ТГК и пилотируемых долговременных орбитальных комплексов (ОК).

Предмет исследования – принципы, методы, методические и алгоритмические средства телеметрического обеспечения процесса управления полетом КА различного назначения, ТПК, ТГК и ОК.

Целью исследования является создание методов управления КА различного назначения и ОК, основанных на использовании автоматизированных, автоматических и интеллектуализированных систем, позволяющих повысить оперативность, информативность и качество получения достоверных знаний о состоянии объектов управления, прогнозировать их функционирование в процессе длительного космического полета, а также снизить трудоемкость, ресурсоемкость и временные затраты на выполнение операций при их управлении.

Для достижения указанной цели поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Проведен анализ существующих средств, методов и технологий контроля современных КА и долговременных ОК с учетом основных тенденций их развития и особенностей, непосредственно влияющих на выполнение функции контроля при осуществлении управления космическим полетом.

2. Обобщены и формализованы основные составляющие процесса контроля, виды результатов контроля, причины возникновения, методы обнаружения, анализа и парирования нештатных ситуаций (НШС).

3. На основе системного анализа технологий контроля при управлении космическим полетом разработаны новые подходы их построения на базе результатов анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий, а также комплексной системы отображения результатов анализа для повышения оперативности управления функционирования существующих и перспективных космических средств.

4. Проанализированы и формализованы структура и организация функционирования систем телеметрического контроля, определены основные положения при формировании иерархической структуры контроля с учетом ограничений и особенностей функционирования КА.

5. Разработаны методы анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий для систем телеметрического контроля на основе самообучающихся универсальных алгоритмов извлечения знаний из ТМИ.

6. Сформулированы требования и принципы разработки алгоритмического обеспечения интеллектуализированной системы телеметрического контроля при управлении полетом КА на основе цифровых идентификационных моделей.

7. Проведена экспериментальная отработка результатов теоретических исследований при решении задач анализа состояния КА и прогнозирования их работы в реальных условиях космического полета.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложен принцип построения автоматизированных, автоматических и интеллектуализированных систем телеметрического контроля КА, которые в отличие от существующих, не зависят от конструктивных особенностей контролируемого КА и обеспечивающие качественное повышение информативности, достоверности и оперативности процесса контроля, а также снижение трудоемкости работ.

2. Сформулировано математическое определение коэффициента автоматизации процедур анализа ТМИ, позволяющее осуществлять количественное определение уровня автоматизации систем телеметрического контроля.

3. Предложен метод анализа ТМИ с использованием вектора технического состояния КА как обобщенного признака, позволяющего автоматически формировать результат контроля, что существенно повысить оперативность и снизить трудоемкость получения достоверных знаний о состоянии КА.

4. Предложены методы анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий на базе методов кластерного анализа данных, вейвлет анализа и анализа временных рядов, в которых обновление нечетких правил выполняется путем получения знаний из базы знаний, пополняемой в процессе эксплуатации КА.

5. Сформулированы и обоснованы требования и критерии для выбора методов анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий, исходя из практических задач контроля при управлении полетом КА.

6. Предложена методика разработки алгоритмического обеспечения интеллектуализированной системы контроля, включающая обобщенные алгоритмы анализа и прогнозирования состояния КА с использованием элементов самообучения на основе цифровых идентификационных моделей, построенных на ранних или предшествующих этапах эксплуатации КА, что позволяет оперативно формировать знания о состоянии КА и автоматически реализовать функцию прогнозирования состояния КА.

7. Применение разработанных методов анализа в задачах контроля при управлении полетом КА позволило автоматизировать и расширить состав решаемых задач, которые не рассматривались в рамках стандартных методов анализа, применяемых на практике при контроле в процессе управления полетом КА.

Практическая значимость работы определяется прикладной направленностью исследований, включающих подготовку методических и практических рекомендаций по повышению информативности (качества знаний) и оперативности получения достоверной информации о состоянии КА и его прогнозирования, а также снижения трудоемкости работ, путем интеллектуализации процесса анализа ТМИ в ходе управления полетом КА,

ТПК, ТГК и ОК. К основным практически значимым результатам работы можно отнести следующие:

1. Синтезирован современный подход к построению интеллектуализированной системы контроля на основе цифровых идентификационных моделей с использованием элементов самообучения, которые могут применяться для решения широкого круга задач контроля космической техники и других сложных технических объектов.

2. Предложенная методология контроля состояния процесса функционирования КА позволяет формировать результаты контроля с высокой оперативностью и расширенными знаниями относительно применяемых на практике в настоящее время.

3. Построенная на основе разработанных требований интеллектуализированная система телеметрического контроля обеспечивает процесс непрерывного автоматического анализа ТМИ и прогнозирования состояния КА и тем самым снижает трудоемкость наиболее информационно нагруженной части процесса управления полетом КА.

4. Предложенный подход к разработке интеллектуализированных систем контроля предусматривает возможность интеграции их в структуру существующих систем телеметрического контроля любого наземного комплекса управления (НКУ) современных КА, что существенно упрощает процесс внедрения, а в перспективе и перенос их на борт КА.

5. Применение разработанных методов анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий для решения задач контроля при управлении полетом КА позволяет расширить спектр определяемых аномальных процессов, протекающих в составных частях КА, которые в рамках стандартных технологий определялись со значительной временной задержкой, что в условиях оперативного процесса управления полетом КА является критическим фактором.

Результаты работы были использованы при подготовке и реализации контроля в процессе управления полетом КА типа «Ямал», КА «БелКА», КА «Монитор-Э», «Казсат», ТПК типа «Союз», ТГК типа «Прогресс», РС МКС, а также при разработке эскизных проектов КА связи и КА дистанционного зондирования Земли.

Методы исследования основываются на использовании системного анализа, теорий управления космическими полетами, идентификации и интеллектуального анализа данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология функционирования системы телеметрического контроля как составной части системы управления космическим полетом в условиях внешних воздействующих факторов космического пространства и неопределенностей, накладываемых особенностями орбитального движения КА, функционированием и взаимодействием составных частей КА.
2. Принципы анализа ТМИ и действий при обнаружении и парировании НШС с учетом основного критерия необратимости фактора времени.
3. Методы анализа ТМИ, с использованием интеллектуальных технологий для комплексного определения состояния составных частей КА, локализации и определения причин аномальных состояний, НШС и прогнозирования состояния КА, вычисления величины деградации характеристик и определения располагаемого времени в аномальных ситуациях и НШС.
4. Подход к разработке алгоритмического обеспечения интеллектуализированных систем контроля на основе цифровых идентификационных моделей с использованием элементов самообучения.
5. Результаты практического применения предлагаемых методов и технологий анализа ТМИ в процессе управления полетом КА.

Материалы диссертации использованы в курсах лекций «Методы контроля при управлении полетами космических аппаратов» и «Перспективы развития средств управления пилотируемыми и автоматическими космическими аппаратами» для студентов 5-ого и 6-ого курса кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также курса лекций «Устройство и оборудование КА» для магистрантов 1-ого курса факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 23 конференциях, конгрессах, научно-технических совещаниях и семинарах. В том числе на: 13 мультikonференции по проблемам управления (Санкт-Петербург, 2020), 71 международный астронавтический конгресс (IAC 2020, Cyberspace Edition), XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (Москва, 2019); XL - XLV Академических чтениях по космонавтике, «Королевские чтения» (Москва, 2016-2021); LI научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (Калуга, 2016); Международной научно-

практической конференции «Космонавтика XXI века», (г. Королев, Московская обл. 2016); XIX-ой международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах" (Самара, 2017 г.); 68 международный астронавтический конгресс (IAC 2017), III-ей Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». (Санкт-Петербург, 2017 г.); и др.

Публикации по работе. Результаты диссертации отражены в 44 научных работах автора, в том числе: 23 работы в рецензируемых журналах из Перечня ВАК РФ, 5 работ в журналах из перечня Web of Science/Scopus, 14 работ по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации», 3 доклада из перечня Web of Science/Scopus, 21 работа в сборниках трудов конференций и патент на изобретение.

Личный вклад. Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Практическая реализация предложенных методов и подходов осуществлялась как лично автором, так и совместно со специалистами, обеспечивающими оперативное управление полетом РС МКС, ТПК и ТК, КА типа «Ямал» и другими (они являются соавторами соответствующих публикаций).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 198 наименований. Основной текст работы изложен на 303 страницах, содержит 96 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цель и основные задачи исследования, формулируются научная новизна, практическая ценность полученных результатов и основные результаты, выносимые на защиту, дается краткая характеристика содержания глав диссертации.

В первой главе приводятся результаты анализа существующих средств, методов и технологии контроля. Проведен анализ КА и ОК в аспекте управления их полетом, анализ процесса телеметрического обеспечения, анализ текущего состояния и перспектив развития автоматизированных систем управления полетом КА.

Современные КА и ОК представляют собой весьма сложные технические объекты с целым рядом характерных особенностей: разнообразная, многофункциональная и многоблочная конструкция, составные части КА взаимодействуют и взаимовлияют на всем протяжении эксплуатации КА, бортовые ресурсы КА ограничены и не восполняемы (за исключением ОК), требующая самостоятельного управления полезная нагрузка КА, влияние орбитального движения и ориентации КА в пространстве, а также факторов космической среды на параметры состояния КА и изменения (деградацию) характеристик составных частей КА, большое количество полетных операций, выполняемых КА для реализации программы полета, одновременная эксплуатация группировок КА (сотни КА).

Усложнения процесса управления полетом пилотируемых КА и ОК. Таблица 1.

КА	Кол-во операций	Кол-во управляющих воздействий	Кол-во параметров	Особенности управления полетом
«Восток» 1961	5	48	400	Сеансное управление одиночным объектом
«Союз» 1966	30	256	1000	Управление командами; с 1979 г. цифровой и аналоговые контуры управления
«Мир» 1986	500	4096	14000	«Суточное» управление различными объектами
МКС 1998	5 000	>8000 Многоуровневые программы	30000	Распределенное управление из ЦУП- Хьюстон и ЦУП-Москва
МКС 2020	94 000	>12000 Многоуровневые и многовариантные программы	более 50000	Распределенное управление из нескольких центров (6 ЦУПов)

Перечисленные особенности космической техники серьезным образом влияют на технологию управления космическим полетом. Надежность и безопасность космического полета КА обеспечиваются наряду с

конструктивными и функциональными возможностями самого КА, также уровнем технологий, методов и средств управления его полетом.

Управление полётом КА представляет собой многоступенчатый технологический процесс, состоящий из последовательности действий по планированию, реализации и контролю, логически связанных между собой и взаимодействующих во временной последовательности. Контроль в процессе

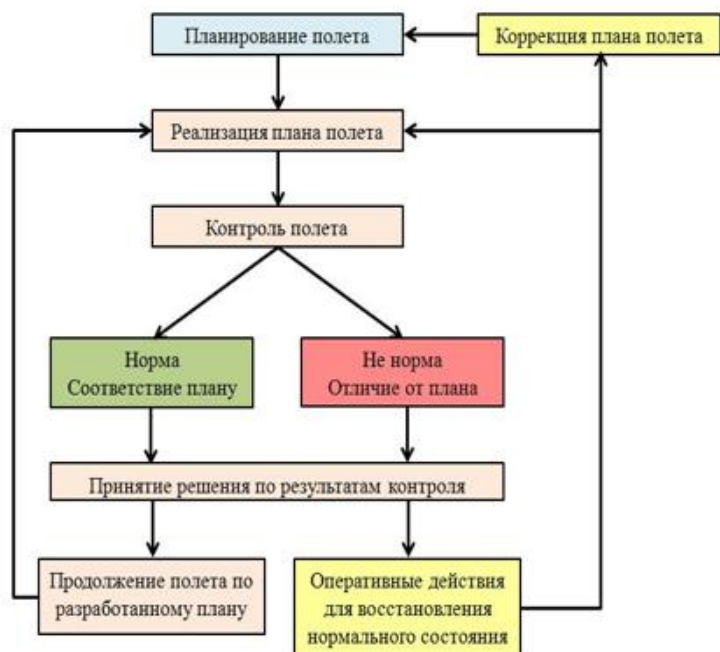


Рис. 1. Укрупненная структура процесса управления полётом

управления полетом КА является информационно-аналитической базой, предоставляющей знания для решения задач управления и достижения целей полета КА в контуре обратной связи. Для управления полетом КА различного типа и назначения, технология осуществления контроля принципиально подобна и осуществляется циклически. На основании результатов проведенного системного анализа, можно

сформулировать общие принципы контроля, применимые в процессе управления полетом КА, наиболее существенные из которых являются следующие:

- результаты контроля должны обеспечивать полноту выявления состояния или отклонения фактического состояния от запланированного, оперативность обнаружения таких отклонений, определение причин, вызвавших такие отклонения, рекомендаций для дальнейшей эксплуатации;
- объект контроля должен подлежать постоянному наблюдению;
- при проведении контроля должны рассматриваться все составные части КА, с учетом взаимосвязи между ними и режимами их функционирования;
- всякая составная часть КА, должна быть подвержена контролю;
- оценка состояния КА осуществляется только на базе проверенных и достоверных данных;
- контроль должен осуществляться планомерно.

Обязательным условием осуществления контроля при управлении полетом КА является наличие достоверной ТМИ от контролируемого КА. Объем ТМИ

существенно превосходит объемы других видов информации циркулирующих в контуре управления полетом.

Математическое описание процесса контроля:

$$R_k(t) = \begin{cases} W_{\text{ТМИ}}(t) \geq W_{\text{пред}} \\ \{S_{1\text{исп}}, S_{2\text{исп}}, \dots, S_{j\text{исп}}\} \in \{S_{1\text{пл}}, S_{2\text{пл}}, \dots, S_{j\text{пл}}\} \\ P_{\text{imin}} < P_i(t) < P_{\text{imax}} \\ T_{\text{расп}} > T_{\text{крит}} \in \{T_1 \dots T_i\} \\ Q_i(t) \geq Q_{\text{иплан}}(t) + Q_{\text{ирез}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

где: $W_{\text{ТМИ}}$ и $W_{\text{пред}}$ – объем ТМИ (выраженный в некотором количестве значений ТМП) полученных от КА и минимальный объем ТМИ, необходимый для контроля КА; $S_{1\text{исп}}, S_{1\text{пл}}$ – исполняемые и запланированные режимы работы (полетные операции) составных частей и оборудования КА; $P_i, P_{\text{imin}}, P_{\text{imax}}$ – текущее, минимальное и максимальное допустимое значение телеметрического параметра (ТМП); $T_{\text{крит}}$ – располагаемое время по критичному ТМП; $Q_i, Q_{\text{иплан}}, Q_{\text{ирез}}$ – располагаемые, плановые и резервные ресурсы КА.

Результаты контроля обеспечивают принятие решения по дальнейшему управлению полетом. При этом возможны два исхода: действие по существующему плану полета или корректировка и реализация скорректированного плана.

Для эффективного, безопасного и надёжного управления полётом КА, особенно с учётом перечисленных факторов, имеющих недостатки и высокой трудоемкости процесса контроля весьма актуальной задачей является автоматизация и интеллектуализация всех составных частей процесса контроля.

Во второй главе представлены исследования, обобщение и формализация основных составляющих процесса контроля.

Получение необходимой информации для решения задач управления космическим полетом и принятие решений о дальнейшей эксплуатации КА осуществляется в результате анализа ТМИ получаемой с КА. ТМИ является наиболее полной, достоверной и оперативной информацией для определения состояния КА и выполнения программы полета. Анализ ТМИ имеет следующую цель: на основе всей совокупности доступной информации сформировать всеобъемлющее, исчерпывающее и подтвержденное знание о техническом состоянии КА в целом и его составных частей, на основании которого принимается решение о дальнейшей программе полета КА. Анализ состояния КА осуществляется методически по принципу «от частного – к общему», т.е.: элемент – прибор или агрегат - составная часть КА - КА в целом.

Во временной последовательности, процедуры анализа делят на оперативный и послесекансный. Целью оперативного анализа является проверка соответствия фактического состояния КА, запланированному при выполнении текущей программы полета КА. Оперативный анализ выполняется в реальном времени в темпе поступления ТМИ. Под оперативностью управления понимают:

$$P_{oy} = P \{ t_y \leq T_{zy} \}, \quad (2)$$

где P_{oy} - вероятность не превышения длительности цикла управления над заданным временем T_{zy} , t_y – время цикла управления, определяемой как:

$$t_y = t_{сб} + t_a + t_p + t_d + t_{и} + t_{п} \quad (3)$$

где: $t_{сб}$, t_a - время сбора и анализа ТМИ КА, t_p - время выработки рекомендаций по действиям, t_d – время формирования и доведения управляющей воздействий до БКУ КА или исполнительных органов КА, $t_{и}$ – время реализации управляющих воздействий, $t_{п}$ – время подтверждения по ТМИ выполнения управляющих воздействий.

Операции за время $t_{сб}$, t_d , $t_{и}$, $t_{п}$ выполняются автоматически или с минимальными действиями оператора. Операции за t_a и t_p имеют наибольшую продолжительность и ограничено автоматизированы, поэтому повышение оперативности цикла управления заключается в снижении значений t_a и t_p , в основном, за счет автоматизации.

Целью послесекансного анализа является количественная оценка состояния КА, учет ресурсов, определение его фактических технических характеристик и прогнозирование состояния. При этом используется вся существующая информация: архивная, модельная и т.п., содержащая сведения о состоянии данного КА. Послесекансный анализ, выполняется в отложенном времени. Существенным фактором является качество знаний и глубина понимания процессов на борту КА.

В конечном итоге, формируется обобщенное заключение о состоянии КА и о результатах выполнения запланированной программы полета. Существует, как минимум, два варианта заключения.

Первое заключение соответствует нормальному состоянию КА, т.е.:

$$KA[\text{норма}] = \begin{cases} 0 < W_{\text{факт обм}}(t_{\text{сеанса}}) < W_{\text{обм}}(t_{\text{сеанса}}) \\ \{F_1 \dots F_i\}(t) - \text{determ} \\ (S_1, S_2, \dots S_j) = (S_{1p}, S_{2p}, \dots S_{jp}) \\ (P_{\text{imin}}) < P_i < (P_{\text{imax}}) \\ Q_{\text{энбал}} = \sum_{i=1}^m I_{i\text{БФ}} - I_n > I_{\text{пор}} \end{cases} \quad \text{иначе КА[не норма]}. \quad (4)$$

где: $W_{\text{фактобм}}$ и $W_{\text{обм}}$ фактический и номинальный объемы ТМИ от КА, $F_i(t)$ – конфигурация составных частей КА; S_1, S_{1p} – исполняемые и запланированные режимы работы (полетные операции) составных частей и оборудования КА; $P_i, P_{i\min}, P_{i\max}$ – текущее и допустимые значения ТМП; $Q_{\text{энбал}}$ – энергобаланс КА;

Второе заключение - не нормальное состояние КА, а ситуация – нештатная, когда не выполняется хотя бы одно из условий (4). В практике эксплуатации космической техники существует и третье состояние КА, которое определяют, как «нечеткая» ситуация или аномалия $A_k(t)$, когда:

$$A_k(t) \in \begin{cases} \{S_{j\text{исп}}\} \neq \{S_{1\text{пл}}, S_{2\text{пл}}, \dots, S_{j\text{пл}}\} \\ P_{i\text{сс min}} < P_i(t) < P_{i\text{сс max}} \\ T_{i\text{ппфакт}} > T_{i\text{пп план}} \\ G_i(t) \neq G_{i\text{план}}(t) \end{cases} \quad (5)$$

где: $S_{j\text{исп}}, S_{1\text{пл}}$ – исполняемые и запланированные режимы работы (полетные операции) составных частей и оборудования КА; $P_{i\text{сс min}}, P_{i\text{сс max}}$ – максимальное и минимальное значение ТМП полученные фактически за предыдущие периоды эксплуатации КА; $G_i, G_{i\text{план}}$ – фактический и плановый расход ресурса КА;

Термин «нештатная ситуация» (НШС) определяется как совокупность условий или обстоятельств, ведущих к возникновению опасных состояний, к угрозе срыва программы полета или безопасности КА (экипажа КА).

Основными признаками возникновения НШС являются:

- выход значения какого-либо ТМП КА за допустимые пределы;
- аварийное сообщение от бортового комплекса управления (БКУ) КА, сформированное на основе алгоритмов анализа функционирования БКУ;
- изменение конфигурации или режима работы составных частей КА не предусмотренной программой полета КА;
- не исполнение полетных операций, заданных программой полета КА;
- нарушение информационного обмена КА - НКУ.

Под термином «парирование НШС» понимают последовательность действий, направленных на прекращение развития или распространения НШС, локализация, определение и устранение причины, породившей данную НШС, определение и исключение негативных последствий НШС и её повторения на последующих этапах полета КА.

Критическая фаза развития НШС определяется моментом времени перехода КА в состояние, безусловно приводящее к негативным последствиям. Временной интервал между временем определения НШС и временем

достижения критической фазы развития НШС является параметр «располагаемое время», который определяется исходя из скорости изменения VP_i критичного ТМП P_i или критичного ресурса КА Q_i , на некоторой временной базе Δt от времени t_1 до t_2 ($\Delta t = t_2 - t_1$), но требует периодического уточнения, поскольку на практике часто имеет нелинейный характер.

$$VP_i = \Delta P_i / \Delta t = \frac{P_i(t_2) - P_i(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

Парирование НШС осуществляется следующим образом:

- обнаружение или выявление НШС в процессе контроля состояния КА и установление времени её возникновения $T_{\text{ншс}}$;
- локализация и идентификация возникшей НШС;
- параллельно выявляются причины возникновения НШС;
- определение момента наступления критической фазы НШС - $T_{\text{крит}}$;
- оценка величины располагаемого времени - $\tau_{\text{расп}}$ - на парирование НШС;
- выработка программы действий по парированию НШС в соответствии с эксплуатационной документацией (ЭД) или по результатам анализа;
- реализация программы действий по парированию НШС.

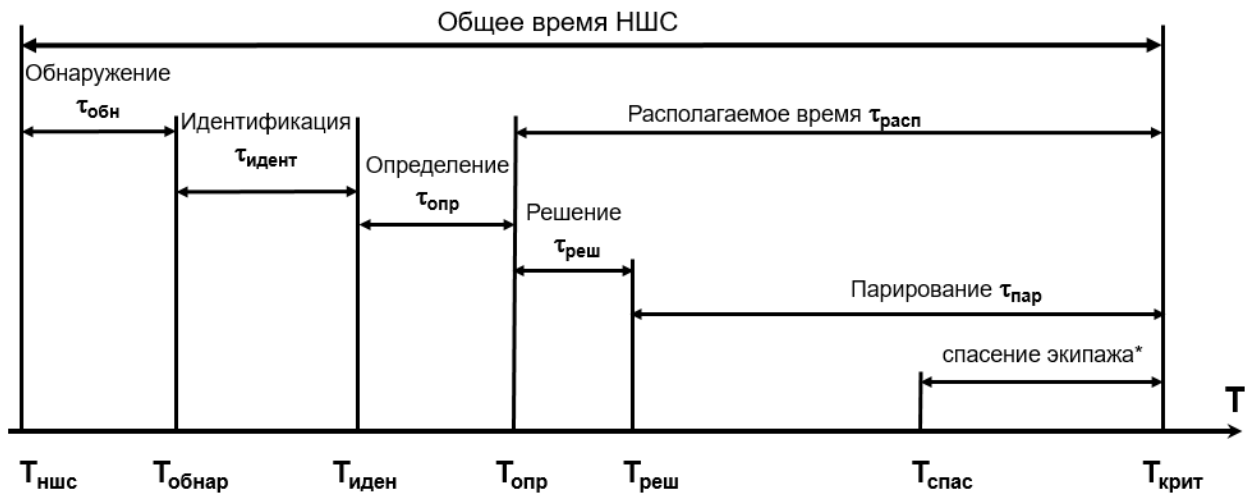


Рис. 2 Циклограмма действий при парировании НШС.

Соответствующие длительности до наступления вышеперечисленных моментов определяются следующим образом:

$$\tau_{\text{обн}} = T_{\text{обнар}} - T_{\text{ншс}} - \text{продолжительность обнаружения НШС}; \quad (7)$$

$$\tau_{\text{идент}} = T_{\text{иден}} - T_{\text{обнар}} - \text{продолжительность идентификации НШС}; \quad (8)$$

$$\tau_{\text{опр}} = T_{\text{опр}} - T_{\text{иден}} - \text{продолжительность определения располагаемого времени на парирование НШС}; \quad (9)$$

$$\tau_{\text{реш}} = T_{\text{реш}} - T_{\text{опр}} - \text{продолжительность подготовки и принятия решения о парировании НШС}; \quad (10)$$

$$\tau_{\text{пар}} = T_{\text{крит}} - T_{\text{реш}} - \text{продолжительность парирования НШС}; \quad (11)$$

$$\tau_{\text{расп}} = T_{\text{кр}} - T_{\text{опр}} = \tau_{\text{реш}} + \tau_{\text{пар}} - \text{располагаемое время}. \quad (12)$$

Методическими действиями для парирования НШС, реализуемыми как БКУ КА, так и по командам от НКУ, являются следующие:

- переход с отказавшего оборудования на резервное;
- переход на резервный режим работы составной части КА;
- прерывание полетной операции, для ее повтора либо исключения;
- отключение или изоляция оборудования и недопущение распространения НШС на другое оборудование или составную часть КА;
- совокупность вышеперечисленных действий.

Парирование НШС направленно на полное восстановление состояния КА и реализацию программы полета в полном объеме. На практике достигается иногда частично, с потерей резервирования, утратой или ухудшения некоторых функций, характеристик или производительности КА. Для пилотируемых КА введено правило, одна НШС – безусловное выполнение программы полета, две НШС – спасение экипажа или КА.

В третьей главе проанализированы существующие в настоящее время системы телеметрического контроля, систематизированы их структура и организация функционирования в интересах управления полетом КА.

Процесс контроля направлен на определение состояния КА, которое формализуется и описывается определенным набором и значением ТМП, которые классифицируются на управляемые и неуправляемые. Общая тенденция увеличения длительности полета, функциональных возможностей КА и производительности бортовых вычислительных средств КА приводят к увеличению количества ТМИ, поступающей от КА на НКУ и контролируемой персоналом управления.

Ограничения пропускной способности радиолинии КА – НКУ и длительность сеансов связи сокращают объем данных WI (информация в килобитах). В любом случае, БКУ КА в своей работе оперирует бóльшим объемом данных $WI_{\text{БКУ}}$, чем наземные средства управления $WI_{\text{НКУ}}$.

$$WI_{\text{БКУ}}(t) = \left(\sum_{i=1}^{i=j} P_i v_i + \sum_{i=1}^{i=n} A_i \tau + \sum_{i=1}^{i=m} R_i \iota \right) t \quad (13)$$

где: v_i – частота опроса датчика ТМП P_i , τ – длительность такта управления БКУ для исполняемого алгоритма A_i , ι – частота передачи данных от прибора КА R_i .

$$WI_{\text{НКУ}}(t) = \left(\sum_{i=1}^{i=j} \frac{P_i v_i}{a_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{A_i \tau}{b_i} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{R_i \iota}{c_i} \right) t_{\text{пер}} \quad (14)$$

где: a_i , b_i , c_i - коэффициенты прореживания, настраиваемые исходя из режима работы составных частей КА, $t_{\text{пер}}$ – время передачи ТМИ от КА на НКУ, поэтому:

$$W_{\text{БКУ}}(t) \gg W_{\text{НКУ}}(t) \quad (15)$$

Сокращение информации при передаче с борта КА на НКУ приводит к утрате значимой информации. Компенсировать указанную потерю возможно только с подстройкой величины сокращения, после получения опыта эксплуатации конкретного КА в отдельных режимах его полета.

Выше перечисленные особенности, в значительной степени определяют методику анализа и конечное определение состояния КА. Поэтому применяются различные алгоритмы анализа, конкретизированные для определенного КА, имеется различие в численности и количестве групп и специалистов по анализу, а также перенесение решения части задач анализа на другие этапы полета КА.

Для решения задач анализа ТМИ на вычислительных средствах Центра управления полетом (ЦУП) в реальном масштабе времени автоматизировано производится обработка поступившей от КА ТМИ, при которой формируется физические величины ТМП, привязанные к шкале времени. Полученные данные являются основой для проведения анализа, и в конечном итоге - определения состояния КА. Результаты обработки ТМИ представляются на экранах автоматизированных рабочих мест специалистов службы управления в виде иерархически структурированной системе форматов отображения ТМИ в текстовом графическом или мнемосхематическом виде и подвергается анализу непосредственно специалистами управления.

Базовыми принципами отображения ТМИ являются структурированность информации по принадлежности ТМП к составным частям КА, разумное количество ТМП на одном формате, единая форма представления, цветоотображение на форматах и последовательность представления информации от общего к частному. Структурирование отображаемой информации по иерархическому принципу позволяет разнести всю ТМИ на три уровня: обобщенного контроля состояния КА и выполнения программы полета, обобщенного контроля по каждой составной части КА, отображения значений ТМП всего объема ТМИ КА по соответствующим составным частям КА. На основе анализа выполнения требований ЭД и текущей программы полета делается заключение о техническом состоянии КА и выполнении запланированной программы полета. Поскольку анализу подвергается

значительный объем разнородной информации, большое значение приобретают квалификация и опыт специалиста управления.

Распределение функций контроля при управлении полетом КА между БКУ и НКУ определяется их вычислительными возможностями. НКУ является развитым комплексом вычислительных и моделирующих средств, на котором работает квалифицированный персонал достаточной численности. Поэтому большая часть задач управления полетом КА в целом и задач контроля в частности выполняется в НКУ. С ростом производительности БКУ и совершенствованием его программно-алгоритмического обеспечения образуется возможность по перенесению все большего числа задач управления полетом на борт КА, что качественно повышает оперативность управления. Для пилотируемых КА отдельным самостоятельным звеном в контуре управления является экипаж, который может выполнять основные процедуры контроля и управления в ручном режиме.

Несмотря на прогресс в функциональном совершенствовании БКУ, в нем имеются значительные вычислительные ограничения. С учетом распределения задач контроля между БКУ и НКУ выделим следующие уровни контроля:

- приоритетный уровень, предназначенный для оценки безопасности полета КА и выполнения условий безопасности экипажа ТПК и ОК;
- верхний уровень, для контроля выполнения текущей программы полета КА и состояния КА в целом;
- базовый уровень, предназначенный для контроля состояния и функционирования оборудования, приборов, агрегатов и составных частей КА;
- углубленный уровень, предназначенный для определения фактических значений технических характеристик КА и его составных частей.

В контексте решения задач при управлении полетом КА иерархическая структура контроля является упорядоченной системой и обладает:

- вертикальной декомпозицией уровней контроля от комплексного состояния КА на верхнем уровне иерархии до детального контроля составных частей КА, приборов и агрегатов на более низких уровнях иерархии;
- приоритетностью решения задач контроля от уровня КА в целом и реализации программы полета к нижним уровням контроля технического состояния составных частей КА;
- зависимостью реализации программы полета КА от функционирования и состояния составных частей КА, находящихся на другом, более низком уровне.

Взаимодействие и взаимовлияние уровней иерархии в процессе контроля автоматических КА, находящихся в штатной эксплуатации на орбите, стремятся зафиксировать неизменным, а для пилотируемых ОК вынужденно имеют возможность к изменению за счет изменения конфигурации ОК в процессе его эксплуатации при ремонте, дооснащении или модернизации.

В четвертой главе изложены основные методы анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий, применимые для задач контроля при управлении полетом КА.

Основные недостатки методов и технологий контроля используемых в настоящее время, следующие:

- минимальная автоматизация процедур анализа ТМИ;
- наличие операций «ручного» контроля при анализе ТМИ;
- ограниченная автоматизация анализа выполнения программы полета КА;
- отсутствие методов автоматизированного прогнозирования технического состояния КА и деградации его характеристик в процессе эксплуатации;
- отсутствие средств для автоматизированного учета ресурсов КА.

Основными предпосылками для автоматизации анализа ТМИ при осуществлении контроля процесса управления полётом КА являются:

- необходимость устранения множества рутинных, постоянно повторяющихся операций, выполняемых специалистами;
- обработка большого количества информации для человеческого восприятия;
- увеличение длительность полётов КА и накопление значительного количества ТМИ в процессе эксплуатации.

Анализ данных для технических приложений – это процесс обнаружения в данных практически полезных и доступных для интерпретации знаний, необходимых для принятия управленческих решений. В структуре задач контроля при управлении полетом КА можно сформировать следующие задачи анализа с использованием интеллектуальных технологий:

- автоматизация процедур анализа ТМИ;
- извлечение неочевидных знаний о функционировании и взаимовлиянии составных частей КА при изменяющихся внешних воздействующих факторах;
- определение аномалий и скрытых НШС;
- прогнозирование состояния КА и его характеристик на перспективу;
- построение прогнозирующих идентификационных моделей.

Для количественного определения уровня автоматизации процессов анализа применим коэффициент полноты автоматизации ($K_{па}$), который определим как долю фактически автономно от человека контролируемых ТМП ($\sum K_j$) к общему числу ТМП ($\sum K_n$) поступающих от КА в НКУ для анализа.

$$K_{па} = \frac{\sum K_j}{\sum K_n} \quad (16)$$

Формула определения интегрального K_a с учетом уровня автоматизации на всех уровнях контроля при количестве n составных частей КА, имеет вид:

$$K_a = \sum_{i=1}^n w_d^i K_a^i \quad (17)$$

где: $K_a^i = K_a^{i,3}$ коэффициент автоматизации контроля i -ой составной части КА.

$$w_d^i = p_d^i / \sum_{i=1}^n p_d^i - \text{вес } i\text{-ой составной части КА по параметру } p_d. \quad (18)$$

В настоящее время существующие значение уровня автоматизации составляет для автоматических КА $K_a \approx 0,35 - 0,55$, для ТПК $K_a \approx 0,2$.

Рассмотрены следующие методы анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий:

- кластерный анализ данных для обобщенной, комплексной оценки состояния КА и его составных частей, обнаружения аномалий и НШС;
- вейвлет-преобразования для локализации и идентификации аномалий и НШС в отдельной составной части КА;
- прогнозирования состояния на основе определения тренда изменения величины ТМП с применением методов анализа временных рядов.

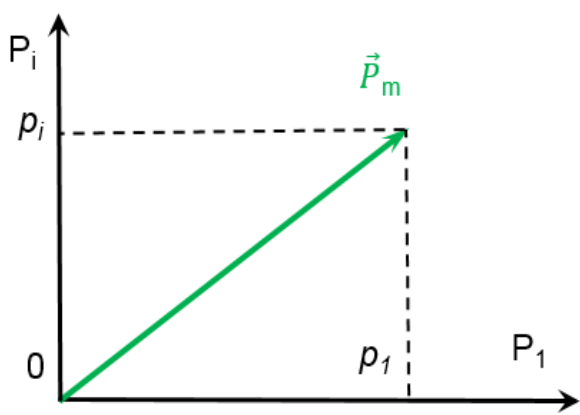


Рис. 3 Визуализация формирования вектора технического состояния КА $\vec{P}_m$

Для комплексной оценки технического состояния КА или его составной части вводится понятие вектор технического состояния, т.е. многомерного вектора $\vec{P}_m$, образованного значениями ТМП P_i на определенный момент времени t_m :

$$t = t_m: \vec{P}_m = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, 1 \leq i \leq n, \quad (19)$$

Все ТМП вносят одинаковый вклад в определение вектора технического состояния анализируемой составной части КА. Полученные вектора соотносятся с помощью Евклидовой метрики, таким образом определяется степень «похожести». Задача кластеризации состоит в построении множества:

$$K = \{K_1, K_2, \dots, K_k, \dots, K_g\}. \quad (20)$$

Здесь K_k — кластер, содержащий похожие векторы из множества:

$$I = \{\vec{P}_1, \dots, \vec{P}_j, \dots, \vec{P}_n\}, \quad (21)$$

$$K_k = \{i_j, i_p | i_j \in I, i_p \in I, d(i_j, i_p) < \sigma_k\}, \quad (22)$$

где σ_k — расстояние между вектором и центроидом кластера, для включения векторов в один кластер; $d(i_j, i_p)$ — мера близости между векторами.

В качестве критерия анализа и определения состояния контролируемого КА или его составной части сформируем специализированный параметр Δ :

$$\Delta = \rho(\vec{P}_m, K_k) - R(K_k) \quad (23)$$

где: $\rho(\vec{P}_m, K_k)$ — значение Евклидова расстояния от текущего вектора $\vec{P}_m$ до ближайшего для него центроида кластера K_k :

$$\rho(\vec{P}_m, K_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^d (P_{mi} - CK_{ki})^2} \quad (24);$$

$R(K_k)$ — радиус кластера K_k , определяемый как максимальное значение Евклидова расстояния между центроидом CK_k и векторами $\vec{P}_{mном}$ из базы знаний, которые относятся к кластеру K_k :

$$R(K_k) = \max_{P \in R(K_k)} \rho(\vec{P}_i, K_k) = \max_{P \in R(K_k)} \sqrt{\sum_{i=1}^d (\vec{P}_m - K_{ki})^2} \quad (25)$$

Отрицательное и нулевое значение параметра Δ соответствует вхождению текущего анализируемого вектора $\vec{P}_{mтек}$ в номинальную область кластера $K_{кном}$ (внутри гиперсферы), т.е. номинальному функционированию КА, а положительное значение параметра Δ соответствует не вхождению текущего анализируемого вектора $\vec{P}_{mтек}$ в границу номинального кластера K_k (снаружи гиперсферы), т.е. аномалии в функционировании КА.

Определяемое отклонение Δ является комплексным показателем, который вычисляется алгоритмом автоматизированного анализа состояния составной

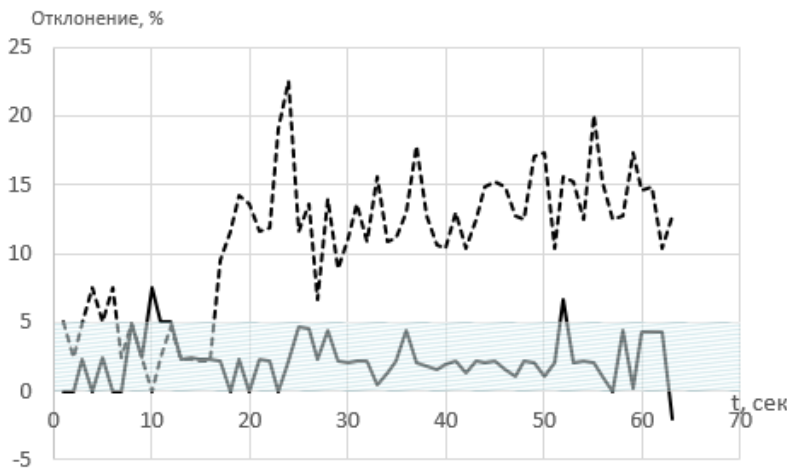


Рис. 4. Визуализация кластерного анализа

части КА или КА в целом. На основе значения этого показателя, с учетом некоторого запаса, формируется сообщение специалисту анализа об обнаружении аномалии или НШС, а также Δ служит для привлечения внимания специалиста к тонким и

неочевидным отличиям, которые в большинстве случаев могут быть предвестниками зарождающихся НШС. Однако локализовать и установить причину данной аномалии данным методом маловероятно.

Метод обнаружения аномалий и НШС в функционировании КА состоит в анализе «псевдосигнала», сформированного из последовательных значений ТМП, результаты которого можно применить для решения нескольких задач, в

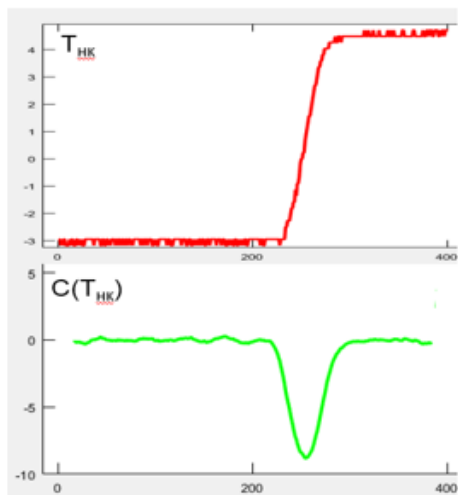


Рис. 5 Визуализация вейвлет анализа значений ТМП

том числе:

- определения, локализации и выявления аномального изменения величины отдельного ТМП, характеризующего процесс на борту КА;
- фильтрации сбойных значений ТМП, не удалённых ранее;
- локализации отклонений, аномалий или НШС при оперативном анализе состояния КА.

Метод способствует выявлению локальных координат аномалий в последовательности результатов вейвлет преобразования.

Непрерывное ВПр (НВПр) осуществляется в соответствии с формулой:

$$C(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{a,\tau}^*(t) \cdot dt, \quad (26)$$

где: $f(t)$ – анализируемый сигнал; $\psi_{a,\tau}^*(t)$ – функция, комплексно-сопряжённая к выбранному вейвлету.

Свертка сигнала с вейвлетом в подинтегральной функции позволяет обнаружить характерные особенности сигнала в окрестности локализации вейвлета. Критерием определения аномалии или НШС является резкое (более чем в 10 раз) изменение вейвлет-коэффициента $C_{m,k}$, сначала в сторону увеличения, а затем последовательного спада до околонулевых значений.

Для решения задачи прогнозирования технического состояния на основе определения изменения значений ТМП КА рассмотрено применения методов анализа временных рядов. Изменение значения ТМП характеризуется скоростью (трендом одномерного временного ряда), присущей для контролируемого процесса. Тренд ТМП на большой временной базе описывается как:

$$Y(P_i(t)) = a_n P_i^n + a_{n-1} P_i^{n-1} + \dots + a_1 P_i + a_0 \quad (27)$$

где: $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ – коэффициенты ряда

Величина тренда и её возможная динамика в будущем необходимы для соотнесения с располагаемыми ресурсами КА и вычисления «располагаемого времени» до достижения предельных значений ТМП или исчерпания ресурсов

КА. Метод автоматизированного анализа ТМИ КА, на основе временных рядов, направлен на решение следующих задач:

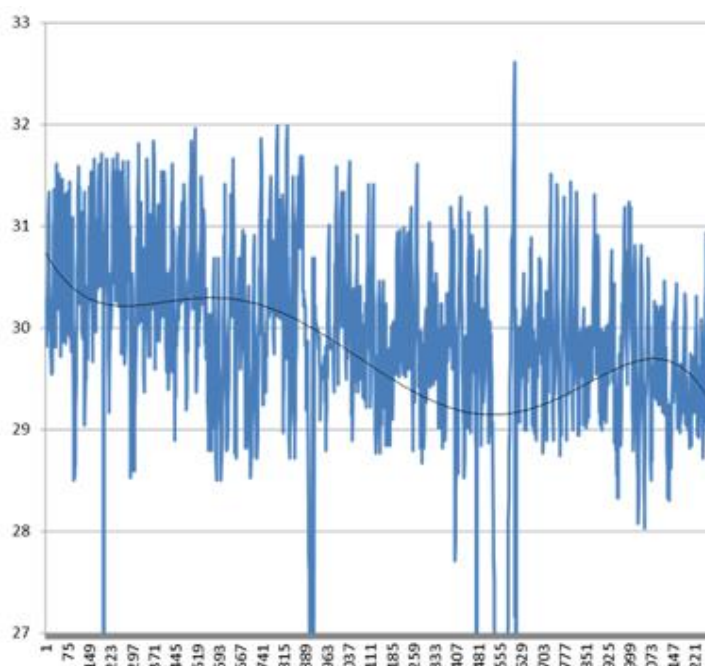


Рис. 6 Тренд изменения напряжения АБ

- выявление соответствия текущего и запланированного/номинального процесса функционирования составных частей КА;
- вычисление основных характеристик временного ряда значений ТМП, позволяющих оценить скорость и существенность его изменения;
- автоматический расчёт располагаемого времени до перехода значений ТМП в критический диапазон.

Подвергая анализу многомерные временные ряды, образованные значениями ТМП описывающими процессы в отдельной составной части КА,

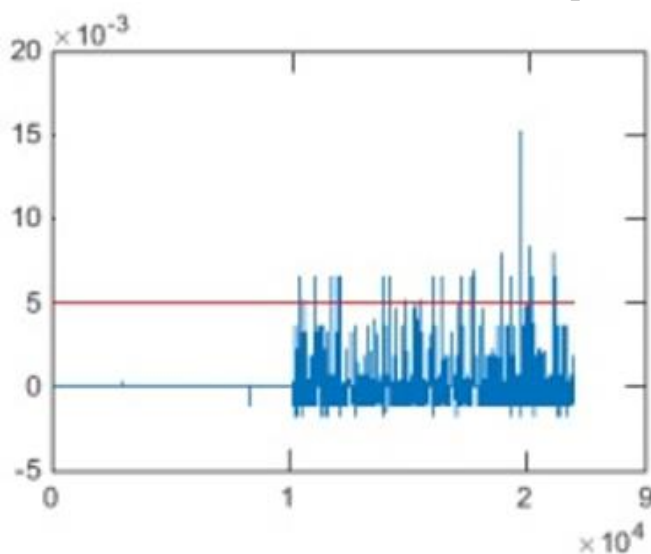


Рис. 7 Обнаружение тренда значения ТМП с плотностью $f_{\theta_1}(P_t)$ и определяется как решение оптимизационной задачи:

$$t_a = \inf \left\{ t \geq 1: \max_{1 \leq k \leq t} \sum_{i=k}^t \ln \frac{f_{\theta_1}(P_t)}{f_{\theta_0}(P_t)} \geq h \right\} \quad (28)$$

где: h – порог алгоритма, θ_1 и θ_0 параметры распределений $f_{\theta_1}(P_t)$ и $f_{\theta_0}(P_t)$, соответственно. От момента времени обнаружения тренда t_a прогнозируемое время $t_{пр}$ достижения этим ТМП P_i предельно допустимого значения P_{ilim} определяется как:

$$t_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{ilim}} - P_i}{(\Delta P_i / \Delta t)_{\text{пр}}} + t_{\text{сс}} \quad (29)$$

где $t_{\text{сс}}$ - момент времени, когда корреляция величины ТМП достигла максимума; $(\Delta P_i / \Delta t)_{\text{пр}}$ - прогнозируемая скорость изменения ТМП P_i .

Рассмотренные методы не являются абсолютно достаточными для решения широкого круга задач анализа ТМИ, однако комбинация методов анализа позволяет создавать системы контроля с качественно иными возможностями.

В пятой главе изложены принципы и методы разработки алгоритмического обеспечения интеллектуализированной системы контроля.

Современный КА следует рассматривать как сложную техническую систему, в которой идут многочисленные функциональные процессы, информация о которых, незначительна и достаточна только для определения «нормы» или подтверждения самого функционального процесса. Незначительные изменения в рамках диапазона допустимых изменений ТМП, в течении инкубационного периода, при этом очевидно не связанных друг с другом может в совокупности привести к НШС. Объективно анализ технического состояния КА в режиме реального времени, существенно затруднен и на практике иногда не дает однозначного понимания ситуации. Поэтому в космической технике нужны принципиально новые модели, методы и средства анализа ТМИ с использованием интеллектуальных технологий. Применение «классических» стохастических моделей для современных КА, является проблематичным, а порой и не осуществимой. Причиной тому служит принципиальная невозможность учета в модели априорной информации и настройка моделей в условиях различных возмущений в процессе космического полета при большой длительности эксплуатации КА. В основе интеллектуализированных систем контроля лежит цифровая идентификационная модель КА, построенная на основе ТМИ, которая выступает в роли технологических данных поступающих при эксплуатации КА, тем самым реализуя процесс самообучения на основе индуктивный знаний. Основными требованиями к алгоритмическому обеспечению интеллектуализированной системы контроля являются:

- способность определять аномалии и НШС, нерассмотренные в ЭД и не прогнозируемые аналитически;
- адекватность результатов и достоверность знаний о реальном функционировании КА и его составных частей;

- решение задачи анализа ТМИ должно осуществляться в масштабе времени, максимально близком к реальному;
- высокая чувствительность, т.е. максимально заблаговременное определение аномалии в функционировании составных частей КА;
- автоматическая реализация процесса анализа ТМИ, при котором специалист только получает результат работы системы.



Рис. 8. Принципиальная схема

интеллектуализированной системы контроля осуществляется на основе данных ТМИ полученных при реальной эксплуатации этого или аналогичного КА, поскольку при космическом полете не допускается проведение активных экспериментов. В аспекте теории автоматического управления КА относятся к классу нелинейных и нестационарных систем, поэтому важно обеспечить постоянное пополнение данными что позволяет осуществлять настройку (обучение) идентификационной модели. Принципиальным моментом является двухэтапный режим работы системы контроля. На первом этапе «обучения», по данным ТМИ, собранным при номинальной работе КА, с использованием различных алгоритмов строится база знаний номинальных состояний, соответствующих нормальному или штатному функционированию КА. На втором этапе, «рабочем» производится анализ технического состояния КА по поступающей в режиме реального времени ТМИ от КА на основе тех же алгоритмов и результаты обработки соотносятся с данными из базы знаний номинальных состояний. Если устанавливается соответствие данных из базы с поступившими данными, то входящие данные пополняют номинальную базу знаний. При несоответствии фиксируется отклонение и происходит предупреждение оператора о выявленной аномалии. Основу методики составляет последовательное применение трех вышеуказанных математических

В основу построения системы контроля в части решения задач анализа ТМИ КА, заложены принципы интеллектуализации, на основе теории идентификации систем. Процесс построения цифрового двойника или идентификационной математической модели КА

методов для обработки данных ТМИ полученной при эксплуатации КА. База знаний, используемая в настоящей интеллектуализированной системе контроля, представляет собой совокупность:

- результатов анализа ТМИ выше перечисленными методами анализа;
- набор однозначных правил, позволяющих сформулировать результат контроля состояния КА или его составной части;
- множества взаимосвязанных ТМП и правила их взаимовлияния внутри отдельного множества;
- описание определенных заранее НШС;
- перечень рекомендаций, для всех определенных заранее НШС.

Соответствие модели номинального функционирования верифицируется применением стандартных, традиционных процедур по анализу технического состояния КА. Если КА эксплуатируется впервые, используются результаты, полученными в ходе наземных и летных испытаний, т.к. программа летных испытаний включает подтверждение свойств и технических состояний КА при всех режимах работы, реализуемых КА и его составными частями. При завершении этапа летных испытаний КА с положительным заключением принимается, что сформирована и верифицирована модель номинального функционирования КА:

$$\begin{cases} K_{\text{ном}} = \{K_1, K_2, \dots, K_k, \dots, K_g\} \\ C(m, k)_{\text{ном}} = \{C_1(m_1, k_1) \dots C_i(m_i, k_i)\} \\ \Delta P_{\text{ном}} = \{\Delta P_1, \dots \Delta P_k, \dots \Delta P_g\} \end{cases} \quad (30)$$

где: $K_1..K_g$ – кластеры номинальных состояний составных частей КА; $C_1(m_1, k_1) \dots C_i(m_i, k_i)$ – номинальные величины вейвлет коэффициентов для значений ТМП; $\Delta P_1 \dots \Delta P_g$ – номинальные величины трендов изменения значений ТМП.

Задачи, решаемые интеллектуализированной системой контроля:

- автоматизированное выявление скрытых событий, аномалий и НШС;
- автоматизированное определение причин появления аномалий и НШС;
- количественная оценка ресурса прибора, агрегата, составной части КА;
- прогноз «располагаемого времени» до наступления НШС или критического события, при выявлении аномалий;
- установление закономерностей, деградаций и трендов в изменении характеристик оборудования и составных частей КА.

Наличие верифицированной цифровой идентификационной модели КА позволяет перейти к управлению полетом с прогнозирующей моделью. Эта технология управления включает в свой состав обратную связь, которая в

реальном времени дает данные для задачи оптимального управления и достижения выбранных критериев оптимальности. Основывается она на том, что идентификационная модель настраивается на прогнозирование будущего состояния КА на основе имеющихся данных на текущий момент. Это позволяет оптимизировать последовательность управляющих воздействий на КА на протяжении периода управления с соблюдением всех ограничений и перейти от общепринятого способа управления по текущему значению выходной величины $y(t)$ к способу регулирования по прогнозу $y(t + \tau_{пр})$.

В шестой главе представлена реализация принципов и разработанных методов интеллектуальной обработки ТМИ в задачах контроля при управлении полетом КА и их возможные применения для долговременных ОК.

В целях автоматизации процессов контроля при управлении полетом КА связи «Ямал-100» была внедрена методика анализа состояния критичных составных частей - системы электроснабжения (СЭС), объединенной двигательной установки (ОДУ) и средств обеспечения теплового режима (СОТР). Результатом работы методики для СЭС являлось формирования ТМП «Норма/не норма» по следующему алгоритму:

$$СЭС[норма] = \begin{cases} (S_1, S_2, \dots, S_j) = const \\ P_{iСЭСmin} < P_{iСЭС} < P_{iСЭСmax} \\ 0 < \sum_{i=1}^m I_{iБФ} - I_n \\ 72 \text{ мин} < T_{расп \text{ МНВА}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{iнВА} K_{iнВА}}{I_n U_{ш}} \end{cases}, \text{ иначе СЭС[не норма]} \quad (30)$$

где: S_1, S_j – режимы работы СЭС, $P_{iСЭС}$, $P_{iСЭСmin}$, $P_{iСЭСmax}$ – текущее, минимальное и максимальное допустимое значение ТМП СЭС, $I_{iБФ}$, I_n – ток солнечных батарей и ток нагрузки КА, $T_{расп \text{ МНВА}}$ – располагаемое время по критичному ТМП, $P_{iнВА}$ – емкость i -ой аккумуляторной батареи.

Срок эксплуатации автоматического КА связи ограничен запасом рабочего тела ОДУ, а непосредственное измерение его запаса или расхода невозможно, поэтому была реализована автоматизированная система учета расходования этого критичного ресурса. Для этого по данным ТМИ реализован учет наработки отдельных тяговых модулей, с учетом их конструктивной специфики и наличия отдельных катодов:

$$T_{нар \text{ ТМ}(i,j)} = \sum (T_{выкл \text{ ТМ}(i,j)} - T_{вкл \text{ ТМ}(i,j)}) \quad (31)$$

где: $T_{нар \text{ ТМ}(i,j)}$ – наработка тягового модуля, $T_{выкл \text{ ТМ}(i,j)}$, $T_{вкл \text{ ТМ}(i,j)}$ – время включения и выключения тягового модуля,

и остаток запаса рабочего тела ОДУ, что эквивалентно длительности удержания КА в рабочей точке и обеспечение услуг связи требуемого качества:

$$Q_{\text{ост } i\text{бака}} = Q_{\text{заправка } i\text{бака}} - \sum_{n=1}^m \dot{p}_i T_{\text{раб TM}(i,j)} \quad (32)$$

где: $T_{\text{нарTM}(i,j)}$ – наработка отдельного тягового модуля на определенном катоде, $T_{\text{рабTM}(i,j)}$ – время работы тягового модуля за маневр, $\dot{p}_i$ – удельный расход рабочего тела отдельного тягового модуля (определялся отдельно на основе баллистических расчетов).

Обеспечение длительного срока эксплуатации КА требует поддержки комфортного теплового режима, который для различных приборов имеет определенный диапазон. При пассивных схемах СОТР единственный способ регулирования температурного режима обеспечивается включением электронагревателей. На практике требуется контролировать частоту этих включений, что потребовало автоматизировать учет расходования ресурса коммутирующих устройств. Реализация осуществлялась автоматическим счетчиком $Mh_{p,s}$ признаков квитанций команд включения/выключения электронагревателей:

$$Mh_{p,s} = U_{t=0}^{t=\infty} \langle R_{s_{p,s}} | Rv_{p,s} \rangle \quad (33)$$

где: $R_{s_{p,s}} | Rv_{p,s}$ – квитанция команды вкл/выкл электронагревателя.

Внедренная методика реализована в функциональном программном обеспечении обработки, анализа и отображения контрольной информации и введена в ЭД, что позволило сократить втрое число специалистов оперативной смены управления, повысить оперативность анализа ТМИ и минимизировать ошибки персонала управления.

В интересах модернизации автоматизированной системы управления космическими полетами РС МКС проводилась разработка автоматизированной системы контроля (АСК) ТПК/ТГК. Технические решения, апробированные в АСК, планируется перенести в системы контроля перспективного транспортного корабля нового поколения (ПТК НП). Целью данной работы является повышение качественного уровня работы специалистов оперативной группы управления ТПК/ТГК и снижения трудоемкости контроля нескольких ТПК/ТГК (до 5 возможных) при совместном полете с МКС, что повышает безопасность экипажа ТПК и надежность выполнения программы полета, и достигается автоматизированным решением задач анализа, оптимальному интерактивному отображению результатов анализа ТМИ и информационной поддержки специалистов управления. Автоматизированный анализ ТМИ включает в себя

комплексную оценку состояния ТПК в целом и его составных частей с формированием комплексного ТМП «норма/ненорма» по алгоритму:

$$[\text{норма}] = \begin{cases} \{S_{1\text{исп}}, S_{2\text{исп}}, \dots, S_{j\text{исп}}\} \in \{S_{1\text{пл}}, S_{2\text{пл}}, \dots, S_{j\text{пл}}\} \\ \{F_1 \dots F_i\}(t) = \text{const} \\ P_{i\text{min}} < P_i < P_{i\text{max}} \end{cases}, \text{ иначе [не норма]} \quad (34)$$

где: $S_{1\text{исп}}, S_{1\text{пл}}$ – исполняемые и запланированные полетные операции составных частей ТПК/ТГК, $F_i(t)$ – конфигурация составных частей ТПК/ТГК, $P_{i\text{сч}}, P_{i\text{счmin}}, P_{i\text{счmax}}$ – текущее и допустимые значения ТМП составной части ТПК/ТГК, а также выполнение автоматически следующих основных операций:

- обнаружение НШС и аномалий в отдельных составных частях ТПК/ТГК;
- локализация (определения места, прибора или агрегата) возникновения отклонения или НШС и определение причины;
- выявление тренда изменения величины ТМП, с формированием нового ТМП «располагаемое время» до достижения предельных значений контролируемого ТМП и другие информационно-аналитические сервисы.

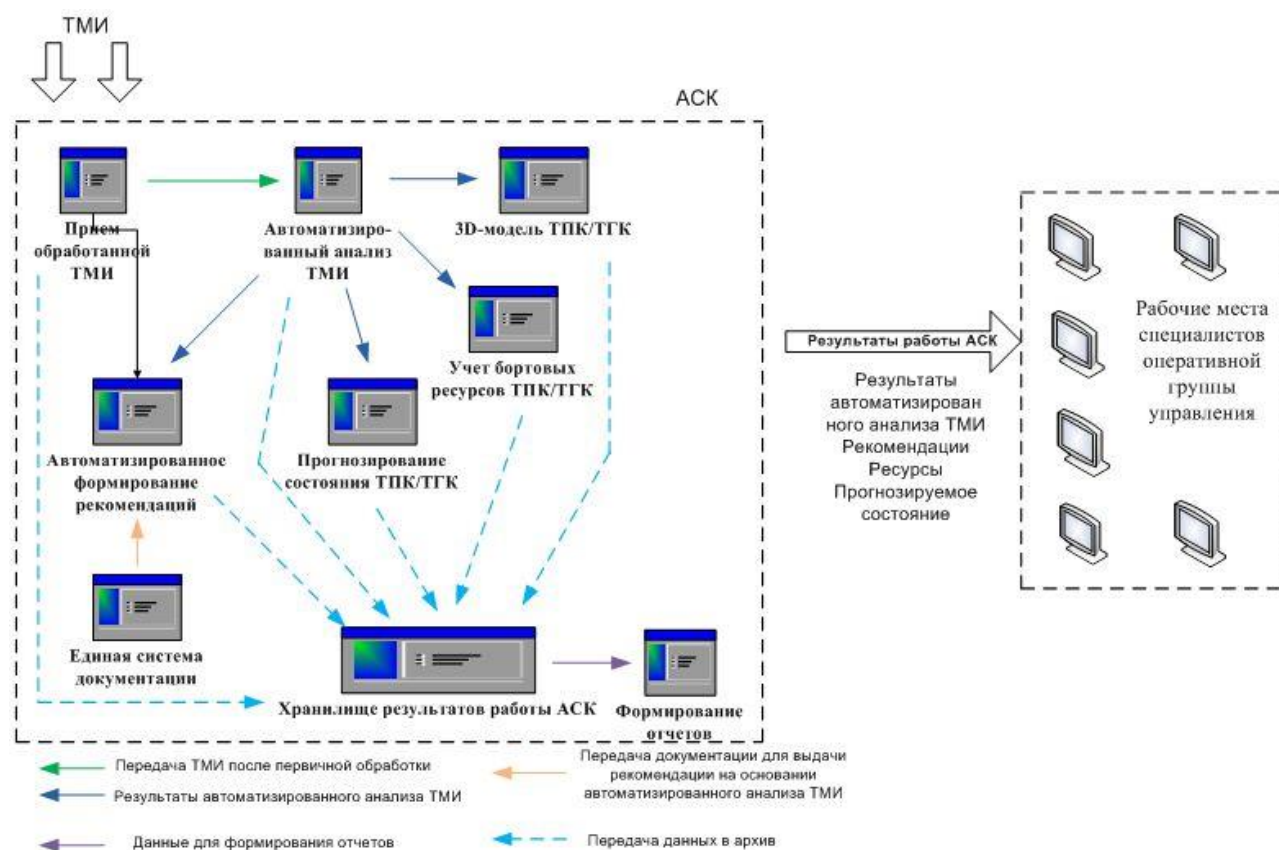


Рис. 9. Функциональная схема АСК.

Результаты автоматизированного анализа отображаются оператору в виде структурированных форматов отображения и автоматизировано заносятся в журналы учета работ и формирования отчетов. При этом достигнуто существенное снижение нагрузки на оператора за счет уменьшения их

количества (18 форматов вместо более 150) а также добавлена функция одновременной работы с несколькими ТПК/ТГК (до 5 одновременно). Аппаратно-программный комплекс главной оперативной группы управления РС МКС содержит ФПО АСК и является информационной системой поддержки принятия решений и организации управления полётом РС МКС.

Для осуществления эксплуатации РС МКС, как минимум до 2028 года и далее, разрабатывается комплекс средств детального определения состояния оборудования РС МКС и прогнозирования его дальнейшего функционирования с определением «располагаемого времени» и остаточного ресурса оборудования.

Принципиальная схема состоит в создании цифровых двойников наиболее нагруженных составных частей РС МКС или незаменимого оборудования. При этом номинальные данные получаются из 20-тилетнего архива ТМИ. Эти данные прошли этап детального анализа и формируют области номинальных состояний. На базе этих данных формируется цифровой двойник, имитирующий номинальное состояние данной составной части. Наличие данного инструмента, методик и данных позволяет реализовывать:

- прогноз вероятности выходов из строя заменяемого оборудования ОК;
- прогноз изменения характеристик незаменимого оборудования ОК;
- подготовку работ по замене оборудования на основе полученного прогноза и выявленных тенденций изменения характеристик при выявлении тенденции к отказу.

Аппаратно-программный комплекс телеметрического обеспечения из состава стенда генерального конструктора РС МКС предназначен для реализации этих задач. В него вводятся инструментальные средства функционального ПО, в том числе и ФПО анализа бортовых систем РС МКС

В заключение дана краткая характеристика основных научных и практических результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ текущего состояния и перспектив развития космической техники показал, что с учетом неизбежного усложнения и совершенствования КА, ОК, появления мега-спутниковых группировок КА возрастает объем информации в контуре управления полетом КА, поэтому требуется автоматизация и интеллектуализация систем телеметрического контроля КА и ОК.

2. На основании результатов проведенного системного анализа технологий телеметрического контроля различных КА сформулированы

принципы, функции и обобщенная схема контроля, а также математическое описание процесса контроля в процессе управления полетом КА.

3. Создана методологическая база процесса контроля, в том числе, в части процедур классификации, обнаружения, идентификации и парирования НШС, с определением располагаемого времени до перехода НШС в критическую фазу.

4. Сформирована иерархическая структура системы контроля с учетом особенностей взаимодействия и взаимовлияния уровней иерархии в ней для автоматических КА и пилотируемых ОК, в которых возможны изменения состава, конфигурации и режимов функционирования бортового оборудования и научной аппаратуры в процессе орбитального полета.

5. Создан комплекс методов, обеспечивающих решение задач анализа и прогнозирования состояния КА при управлении его полетом, на основе современного математического аппарата, в основе которого лежит анализ ТМИ с помощью интеллектуальных технологий, реализующая процесс автоматизации анализа ТМИ КА и позволяющая получить качественно новые и более глубокие знания о функционировании КА и его составных частей при реальных условиях эксплуатации и внешних воздействиях.

6. Предложена и реализована концепция разработки алгоритмического обеспечения интеллектуализированных систем контроля КА как сложных динамических систем на основе цифровых идентификационных моделей, формирование которых осуществляется на основе ТМИ КА, специальным образом преобразованной для формирования базы знаний номинальных состояний и построения цифрового двойника КА и его составных частей.

7. Полученные в работе результаты были использованы в процессе управления полетом Российским сегментом Международной космической станции, ТПК «Союз», ТК «Прогресс», КА типа «Ямал», КА «Монитор-Э», «Казсат».

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Соловьев С.В. Автоматизированная система управления полетом современными спутниками связи. «Полет». 2002., №4 С.26-30. (0,7 п.л.).

2. Соловьев С.В. Методика интеллектуального анализа и прогнозирования состояния ресурсов российского сегмента международной космической станции на основе цифровых идентификационных моделей. Автоматика и телемеханика. 2020. № 9. С. 160-172. (1,06 п.л.).

3. Соловьев С.В. Содержание и структура задач интеллектуализированного контроля состояния космических аппаратов в процессе управления полетом. Космическая техника и технологии. 2021. №1(32) С. 119–126. (0,8 п.л.).
4. Соловьев С.В. Формирование требований к автоматизированной системе контроля состояния современных космических аппаратов. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». №1, 2021. С. 115-120. (0,94 п.л.).
5. Соловьев С.В. Системный анализ методологии контроля при управлении полетом современных космических аппаратов. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 3. С. 39-46. (0,75 п.л.).
6. Соловьев С.В., Хаиров К.И. Метод кластерного анализа в задаче контроля состояния космического аппарата. «Полет». 2018. №5. С. 33 – 40. (1,2/0,7 п.л.).
7. Коваленко А.А., Пирогов П.В., Скурский Ю.А., Соловьев С.В., Станиловская В.И. «Состояние и перспективы развития технологий управления полетом международной космической станции». «Космонавтика и ракетостроение». №5(104), 2018. С. 36-47. (0,94/0,25 п.л.).
8. Донсков А.В., Соловьев С.В. Математические основы метода прогнозирования состояния космического аппарата на основе иерархической многоуровневой базы знаний. Информация и космос. 2019. №1. С. 96-103. (0,63/0,35 п.л.).
9. Мальцев Г.Н., Якимов В.Л., Соловьёв С.В., Лебедева Н.В. Первичная обработка телеметрической информации с использованием динамических моделей изменения параметров и парциальной нелинейной фильтрации. Информационно-управляющие системы, 2018, №5, С. 22-34. (0,63/0,15 п.л.).
10. V. A. Solov'ev, A. A. Kovalenko, S. V. Solov'ev. Priority Scientific and Technical Problems in the Field of Exploration and Efficient Use of Outer Space. Herald of the Russian academy of sciences. Vol. 89, No. 2, 2019 p. 185. (0,63/0,2 п.л.).
11. Верхотуров В.И., Графодатский О.С., Соловьев С.В, Панченко В.А., Чухланцев А.А. Космическая система наблюдения и картографирования «Смотр» для нефтегазового комплекса. Полет 2007., № 9. С. 10-20. (1,5/0,45 п.л.).
12. Соловьев С. В. Анализ телеметрической информации космических аппаратов с использованием базы знаний, пополняемой в процессе эксплуатации // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021.Т. 18, № 3. С. 12 – 17. (0,75 п.л.).

13. Соловьев С. В. Нештатные ситуации в космической технике и принципы их парирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2021. №02. С. 97-103. (0,94 п.л.).
14. Соловьев С.В. Принципы построения интеллектуализированной системы контроля наземного комплекса управления космическим полетом. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки» №3 2021. С. 144-149. (0,94 п.л.).
15. S. V. Solov'ev. Methodology of Intelligent Analysis and Forecasting for the State of Resources in the Russian Segment of the International Space Station Based on Digital Identification Models. Automation and Remote Control, 2019 №81 (9), 1692-1701. (0,63 п.л.).
16. O.I. Abanin, and S.V. Solovyov. Content and task structure of anomaly diagnostics in the operation of spacecraft on-board systems. AIP Conference Proceedings 2171, 200001 (2019). (0,5/0,25 п.л.).
17. S. Solovyov, P. Mukhachev, N. Lebedeva. T. Sadretdinov, A. Ivanov, Housekeeping Telemetry Analysis for Spacecraft Health Monitoring and Predictive Diagnosis Using Machine Learning. Proceeding of the International Astronautical Congress. IAC, Volume 2020-October, 2020 (0,44/0,15 п.л.).
18. Соловьев С.В. Интеллектуальный метод анализа для автоматизированного прогнозирования состояния КА. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 2. (0,7 п.л.).
19. Соловьев С.В. Обоснование выбора метода и критерия кластеризации для интеллектуального анализа при управлении полетом космических аппаратов. Космические аппараты и технологии. 2020 №3 (33) том 4. Стр. 151-160. (1,4 п.л.).
20. Соловьев С.В. Направления интеллектуализации операций контроля применимых для оперативного управления полетом КА. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11. (0,75 п.л.).
21. Лебедева Н.В., Соловьев С.В. Использование интеллектуальных систем при оперативном управлении полётом космических аппаратов. Вестник МАИ 2018. Т. 25. №2 с. 152-159. (1,3/0,6 п.л.).
22. Донсков А.В., Лебедева Н.В., Соловьев С.В. Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата. Вестник МАИ 2018. Т. 25 3. С. 151-160. (1,1/0,5 п.л.).

23. Лебедева Н.В., Соловьев С.В. Методические основы определения тенденций изменения параметров состояния космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 12. (0,7/0,35 п.л.).

24. Соловьев С.В., Мишурова Н.В. Анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полетом космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016. вып. 3. (0,94/0,55 п.л.).

25. Мишурова Н.В., Соловьев С.В. Применение теории графов для оперативного контроля при управлении полетом пилотируемых кораблей. // Труды XIX международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". 2017. С 212-217. (0,5/0,15 п.л.).

26. Соловьев С.В., Хаиров К.И. Метод прогнозирования состояния космических аппаратов на основе интеллектуального анализа данных. // Труды XIX международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". 2017. С. 218-223. (0,5/0,3 п.л.).

27. Мишурова Н.В., Соловьев С.В. Методика определения тенденций изменения параметров состояния космических аппаратов// I-methods. 2017 г. Т. 09. № 4. С. 5-10. (0,5/0,25 п.л.).

28. Соловьев С.В. Принципы разработки интеллектуализированной системы контроля состояния космического аппарата. Материалы конференции «Управление в аэрокосмических системах» (УАКС–2020) имени академика Е.А. Микрина 2020. С. 84-86. (0,2 п.л.).

29. Соловьев С.В. Задачи анализа работы бортовых систем при управлении геостационарным спутником связи нового поколения. Материалы XXXVI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга. 2001. (0,4 п.л.).

Работы, опубликованные в журналах из списка ВАК: [1-14], [18-24].

Переводные работы, входящие в международные базы данных World of Science и Scopus: [2], [9-10], [15-17].

*Подписано в печать 03.08.2021 г.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Объем 2,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ №9619
Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ПАО «РКК “Энергия” им. С.П. Королёва»*