

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Ткаченко Иван Сергеевич

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ
МНОГОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
НА БАЗЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность: 2.3.1

«Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва 2025

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

Научный консультант **Малышев Вениамин Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системный анализ и управление» МАИ, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты: **Клюшников Валерий Юрьевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «ЦНИИмаш»

Охтилев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой №43 компьютерных технологий и программной инженерии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Соловьев Сергей Владимирович, доктор технических наук, ведущий конструктор Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук»** 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

Защита состоится «18» сентября 2025 г. в 15:00 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/doctor/?ELEMENT_ID=184575

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

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

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



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время многие виды хозяйственной деятельности человека, связанные с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), характеризуются постоянным ростом объёмов и скорости обмена информацией. Повышаются требования к космическим системам мониторинга в части глобальности, периодичности и оперативности получения и доставки информации потребителям. В связи с этим возникает потребность в создании многоспутниковых космических систем ДЗЗ, обеспечивающих непрерывный глобальный мониторинг в интересах решения широкой номенклатуры социально-экономических, а также специальных задач. Создание многоспутниковых орбитальных группировок – основной тренд развития мировой космонавтики в последние 10 лет, который определяет будущее космического аппаратостроения на многие годы вперёд.

Примерами успешной реализации глобальной космической системы наблюдения с высокой частотой обновления информации являются развивающаяся с 2013 года группировка малых космических аппаратов (МКА) ДЗЗ компании Planet Labs, которая обеспечивает потребителей ежедневными обновлениями информации о земной поверхности, а также группировки «BlackSky», «Satellologic», «Spire Global», «ICEYE», «Capella» и целый ряд других проектов на разных стадиях практической реализации. В России на сегодняшний день существует программа комплексного развития космических информационных технологий «Сфера», в рамках которой предполагается создание космической информационной инфраструктуры, состоящей из более чем 600 космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли. Сегмент ДЗЗ в программе «Сфера» должен быть представлен МКА на базе унифицированных платформ (УП) «Беркут», разрабатываемых в АО «НПО Лавочкина», количество аппаратов в системе варьируется от 13 до 100 (и более) на разных стадиях реализации проекта. Параллельно ведётся разработка системы мониторинга «Грифон» на базе сверхмалых космических аппаратов (КА), количество которых к 2027 году должно составить 136 единиц.

Существующий в настоящее время научно-технический задел в области проектирования и конструирования космической техники позволяет создавать МКА с аппаратурой наблюдения высокого разрешения, осуществлять одновременный запуск большого числа аппаратов. Основным инструментом масштабирования системы наблюдения, ускорения процессов её проектирования, создания и модернизации, поддержания работоспособности, а также воспроизводимости характеристик аппаратов, является цифровизация процессов на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) многоспутниковой космической системы мониторинга (МКСМ). Этот тезис был частично экспериментально доказан при создании МКА ДЗЗ «АИСТ-2Д» – первого аппарата, который впервые на предприятии АО «РКЦ «Прогресс» был спроектирован полностью в цифровом виде, что позволило обеспечить его создание в рекордные на тот момент для российской ракетно-космической отрасли 32 месяца (от идеи до запуска на орбиту). Тем не менее, вопросы цифровизации процессов проектирования, производства, наземных испытаний, эксплуатации и управления при решении задачи глобального мониторинга Земли и, наконец, утилизации МКА в составе многоспутниковых космических систем являются не до конца изученными при их системном рассмотрении на всех этапах жизненного цикла и не имеют должной методологической основы ни в России, ни в мире.

Степень разработанности темы исследования

Анализ публикаций на данную тему и результаты работ, выполненных авторами: В. В. Малышевым, А. А. Лебедевым, А. В. Соллогубом, Г. П. Аншаковым, В. И.

Куренковым, М. Ю, Овчинниковым, Г. В. Можаяевым, Ю. Н. Разумным, Ю. П. Улыбышевым, А. Ю. Потюпкиным, В. А. Ключниковым, Н. Ф. Аверкиевым, О. В. Карсаевым и др., показал высокую степень проработанности вопросов, связанных с баллистическим проектированием космических мониторинговых систем с учётом большого количества факторов и ограничений, а также теоретических основ и принципов управления космическими аппаратами ДЗЗ.

Вместе с тем, отсутствие в настоящее время современных методических подходов и цифрового инструментария, учитывающих особенности МКСМ, создаваемых на базе кластеров МКА, в совокупности с крайне незначительным накопленным практическим опытом их реализации, ограничивают развитие подобных систем, особенно в нашей стране. Остаются нерешёнными вопросы, связанные с разработкой методических основ и инструментария цифровизации, охватывающих полный ЖЦ МКСМ на базе МКА (массой до 750 кг) с начальных этапов проектирования, заканчивая выбором способа их утилизации по окончании срока активного существования (САС).

Научная проблема

Научная проблема, на решение которой направлена настоящая диссертационная работа, связана с исследованием влияния кратного роста количества космических аппаратов в орбитальной группировке на структуру и особенности жизненного цикла многоспутниковых космических систем мониторинга Земли.

Объект исследования

В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается однородная многоспутниковая космическая система мониторинга Земли, создаваемая на базе идентичных малых космических аппаратов или их унифицированных платформ с различными типами аппаратуры наблюдения с целью формирования и предоставления потребителю информационного продукта с широким набором параметров качества для решения научных, социально-экономических и других видов задач.

Предмет исследования

Предметом исследования являются методологические основы (подходы, методы, методики, алгоритмы, программные средства, технологии) цифровизации жизненного цикла МКСМ на базе МКА ДЗЗ.

Цель работы

Целью работы является сокращение сроков создания многоспутниковых космических систем мониторинга путём систематизации имеющихся и выработки новых научно-методологических практико-ориентированных подходов к цифровизации всех этапов жизненного цикла подобных систем.

Решаемые задачи

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведён системный анализ космических аппаратов и систем, решающих задачи мониторинга земной поверхности, направленный на формирование структуры ЖЦ МКСМ как нового типа объекта исследования и формализацию задачи синтеза проектных параметров таких систем.
2. На основе системы взаимоувязанных математических моделей создан программный инструментарий, обеспечивающий информационную поддержку процесса проектирования МКА ДЗЗ и МКСМ на их базе.
3. Разработаны структурная модель и принципы организации цифровой производственной системы, обеспечивающей серийное производство МКА для МКСМ.
4. Определены направления и инструменты цифровизации экспериментальной отработки МКА, функционирующих в составе МКСМ, направленные на оптимизацию её объёмов, предложена обобщённая схема цифровизации экспериментальной отработки.

5. Разработана архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления МКСМ, в том числе на базе данных телеметрических измерений (ТМИ).

6. Разработаны цифровые технологии и сервисы распространения материалов космической съёмки на основе облачных технологий.

7. Разработана методика и программно реализован алгоритм для оценки эффективности применения средств увода с орбиты МКА после окончания срока их активного функционирования в составе МКСМ.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы системного анализа, теории управления, математического и имитационного моделирования систем, а также логико-вероятностные методы, методы многокритериального выбора, теории принятия решений, регрессионного анализа, онтологического моделирования, исследования операций, теории надёжности систем.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы определяется разработкой на основе системного анализа комплексного подхода к цифровизации всего ЖЦ нового класса систем – МКСМ Земли на базе МКА. В работе изложены научно обоснованные решения, обладающие новизной и научной значимостью:

1) на основе протолётного подхода сформирована модель ЖЦ МКСМ, включающая самостоятельный этап обслуживания и ремонта, который в контексте МКСМ предложено рассматривать как создание и запуск на орбиту нового МКА или вывод из резерва взамен прекратившего активное функционирование;

2) предложен новый подход к формализации требований к МКСМ исходя из целевых задач с учётом современных тенденций и требований мирового рынка геоинформационных продуктов и услуг, рынка космического аппаратостроения, а также с учётом современных приёмов реализации инновационных технических проектов;

3) впервые сформированы концептуальная, структурная и процессная модели «цифрового завода» серийного производства МКА на принципах киберфизической системы с обоснованием выбора матричного типа производственной системы;

4) предложена обобщённая схема цифровизации экспериментальной отработки МКА в составе МКСМ, базирующаяся на применении цифровых инструментов для оптимизации объёмов испытаний;

5) предложена архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления МКСМ, предполагающая цифровизацию процессов хранения и обработки телеметрической информации для последующего принятия решения на её основе по управлению МКА группировки;

6) предложена новая технология распространения материалов космической съёмки с использованием облачных технологий хранения информации, ключевым элементом комплекса взаимодействия оператора и потребителей которой является веб-интерфейс и блок онлайн-обработки данных ДЗЗ;

7) сформирована оригинальная система критериев и методика оценки эффективности средств увода с орбиты МКА из состава МКСМ, базирующаяся на методах интегральной относительной оценки и уверенных суждений.

Практическая значимость результатов исследования

Практическая значимость работы состоит в разработке и апробации новых проектно-конструкторских, технических, технологических, программных и управленческих решений, направленных на цифровизацию процесса создания МКСМ на базе МКА на всех этапах жизненного цикла. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение для развития подобных систем. Их практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработан программный комплекс для решения задач выбора проектных характеристик, моделирования целевого функционирования и оценки эффективности МКСМ, а также база данных обеспечивающих бортовых систем и полезных нагрузок МКА ДЗЗ как средство информационной поддержки процесса проектирования МКА на базе унифицированных платформ.

2. Разработана методика построения имитационной модели производственной системы серийного изготовления МКА, содержащая классификацию показателей производственного процесса и производственных участков.

3. Разработана методика экспертной оценки уровня цифрового развития серийного производства МКА, содержащая критерии оценки для цифровых компонентов, а также процессов «цифрового завода» и физических компонентов.

4. Разработана обобщённая схема цифровизации системы экспериментальной отработки МКА ДЗЗ, функционирующих в составе многоспутниковых космических систем, с учётом оптимизации объёмов наземной экспериментальной отработки.

5. Разработана информационная структура распределённой системы приёма, хранения и обработки телеметрической информации спутниковой группировки и определена эффективность применения методов работы с неполными пакетами данных и детектирования статистических выбросов в данных ТМИ.

6. Разработано программное мобильное приложение для доступа к информации ДЗЗ как один из сервисов (веб-интерфейс) технологии распространения материалов космической съёмки.

7. На основе методики оценки эффективности средств увода с орбиты МКА сформированы рекомендации по выбору типа системы увода для различных типов МКА, функционирующих в составе МКСМ.

На указанные результаты получены охранные документы в виде свидетельств на программы ЭВМ, базы данных, патенты на полезные модели и изобретения. Кроме того, все они нашли своё практическое применение при проектировании, изготовлении, наземной экспериментальной отработке и эксплуатации МКА серии «АИСТ». Разработанные методики проектирования, алгоритмы управления и технологии изготовления прошли успешную апробацию под руководством автора в рамках деятельности наземного комплекса управления (НКУ) МКА серии «АИСТ», а также экспериментальной киберфизической фабрики («цифрового завода») МКА ДЗЗ, созданных по инициативе соискателя в Самарском университете.

Основные результаты работы получены и использованы в рамках комплексного проекта № 02.G36.31.0001 «Создание высокотехнологичного производства маломассогабаритных космических аппаратов наблюдения с использованием гиперспектральной аппаратуры в интересах социально-экономического развития России и международного сотрудничества», реализованного по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010г. №218, а также в рамках выполнения государственного задания по проекту № FSSS-2023-007 «Разработка методов проектирования, научно-технических основ производства и принципов управления и эксплуатации для многоуровневых аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли нового поколения».

Положения, выносимые на защиту

1) Структура жизненного цикла и структурно-параметрическая модель многоспутниковой космической системы мониторинга на базе МКА.

2) Методический подход, алгоритмическое и программно-математическое обеспечение выбора проектных параметров и облика МКА ДЗЗ на базе унифицированных платформ и МКСМ на их основе.

3) Структурная модель и методические подходы к организации цифрового серийного роботизированного производства матричного типа МКА для формирования многоспутниковой космической системы мониторинга.

4) Обобщённая схема цифровизации системы наземной экспериментальной отработки МКА, функционирующих в составе многоспутниковой космической системы мониторинга, с учётом оптимизации объёмов отработки.

5) Архитектура цифровых компонентов наземной инфраструктуры для управления многоспутниковыми системами с использованием данных телеметрических измерений.

6) Технология распространения материалов космической съёмки и результатов тематической обработки среди потребителей на основе облачных технологий и программная реализация её элементов – сервисов.

7) Система показателей оценки эффективности и методика выбора предпочтительного варианта реализации системы увода МКА с орбиты по истечении срока активного функционирования.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность научных положений и основных результатов диссертационной работы обеспечивается за счёт всестороннего анализа состояния исследований в предметной области, согласованности теоретических выводов с результатами натурных и вычислительных экспериментов, а также апробацией основных положений работы в печатных трудах и докладах на российских и международных конференциях. Основные теоретические положения подтверждены успешной практической реализацией при внедрении результатов исследования в проекты по созданию МКА серии «АИСТ».

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, в том числе: на 7-ой международной конференции по последним достижениям в области космических технологий «Recent Advances in Space Technologies» (Стамбул, Турция, 2015 г.); на V и VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, Россия, 2017 г., 2019 г.); на XV научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Алушта, Россия, 2018 г.); на 7-ой Российско-Германской конференции по электроракетным двигателям и их применению «Electric Propulsions - New Challenges» (Гиссен, Германия, 2018 г.); на международной конференции «Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019» (Санкт-Петербург, Россия, 2019 г.); на XXXV Межведомственной научно – технической конференции «Развитие научно – технических аспектов методологии испытаний и эксплуатации с целью повышения эффективности применения существующих средств и систем экспериментально-испытательной базы» (Мирный, Россия, 2019 г.); на 3-м международном форуме специализированного оборудования и инженерной механики («3rd International Forum on Specialized Equipment and Engineering Mechanics») (Нанкин, КНР, 2019 г.); на XLIV и XLV Академических чтениях по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства (Москва, Россия, 2020 г., 2021 г.); на 3-м международном научно-техническом форуме IAA/AAS SciTech Forum 2020 (г. Москва, Россия, 2020 г.); на международной конференции по исследованию космического пространства GLEX-2021 (г. Санкт-Петербург, Россия, 2021 г.); на XXV международной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, Россия, 2021 г.); на VIII и IX международной конференции по информационным и нанотехнологиям

(Самара, Россия, 2022 г., 2023 г.); на 1-й и 2-й Отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2022 г., г. Красноярск, Россия, 2023 г.); на XVI Навигационном форуме и III Конгрессе «Сфера» (г. Москва, Россия, 2023 г.); на 21-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, Россия, 2023 г.); на 2-й Азиатской аэрокосмической и астронавтической конференции АААС 2024 (г. Нанкин, КНР, 2024 г.).

Личный вклад автора и публикации

Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором, либо под его руководством. В работах, опубликованных в соавторстве, автор внёс определяющий вклад в постановку задач, выбор направлений и методов исследований, аналитические выкладки, анализ и интерпретацию полученных результатов, написание работы. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию вошёл только материал, принадлежащий автору лично. Заимствованный материал обозначен ссылками. Основные научные и практические результаты опубликованы в 40 публикациях, из которых 10 – в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России по специальности, 2 – в рецензируемых изданиях из перечня МРБД, 3 – в других изданиях из списка ВАК, 8 – опубликованы в иностранных изданиях, индексируемых в международных базах данных WoS/Scopus, в материалах 7 конференций, опубликованы 2 монографии, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных, 2 патента на полезную модель, 2 патента на изобретение.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 3 приложений, списка литературных источников из 231 наименований. Работа изложена на 350 страницах машинописного текста, содержит 143 рисунка, 60 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён анализ современного состояния и перспектив развития космических систем (КС) мониторинга Земли на базе орбитальных группировок МКА, определены на основе статистических данных основные тенденции развития мировой группировки космических аппаратов наблюдения. Проанализированы существующие модели, применяемые для описания ЖЦ изделий, в частности космических систем. Сформирован ЖЦ МКСМ на базе МКА. Формализованы требования к космической системе исходя из целевых задач с учётом современных тенденций и требований мирового рынка геоинформационных продуктов и услуг, рынка космического аппаратостроения, а также с учётом современных приёмов реализации инновационных технических проектов. Проведена формализация задачи синтеза параметров МКСМ. Предложены варианты постановок многокритериальной задачи синтеза параметров МКСМ. Сформирована структурно-параметрическая модель МКСМ Земли. Определена экспертным путём роль цифровизации процессов ЖЦ МКСМ Земли в снижении сроков и стоимости их создания.

В настоящее время все более востребованными становятся как отдельные МКА, предназначенные для решения отдельной задачи по мониторингу Земли, так и крупные группировки МКА, позволяющие решать более комплексные задачи нежели одиночные космические аппараты. В 2020 г. из 1282 запущенных спутников доля космических аппаратов с массой меньше 750 кг составила 95%, а в 2021 г. уже 98%. Анализ статистических данных также показал, что в последние пять лет доля малых КА ДЗЗ в общем объёме запущенных МКА постоянно увеличивается, что происходит именно благодаря развёртыванию на орбите МКСМ.

Обобщённые данные по массовым и количественным характеристикам современных МКСМ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Массовые и количественные характеристики МКА в составе МКСМ

Название орбитальной группировки		Масса МКА, кг	Количество действующих МКА	Планируемое количество МКА в группировке
«BlackSky»		44, 56 и 60	17	60
«Satellogic»		38,5	35	90
«Capella»		112	10	36
«Planet»	«PlanetScope»	4,7	>240	>240
	«SkySat»	110 и 140	21	21
«ICEYE»		100	10	18

Результаты анализа статистических данных, охватывающих последнее десятилетие, и характеристик существующих и планируемых космических мониторинговых системы, позволяют сформулировать следующие тренды развития многоспутниковых систем на базе МКА:

- масса МКА в составе группировок последовательно снижается;
- уменьшение диаметра апертуры главного зеркала телескопа при понижении высот рабочих орбит МКА;
- увеличение количества космических систем на базе МКА в краткосрочной и среднесрочной перспективе;
- преобладание однородных систем, создаваемых на базе идентичных МКА или УП МКА с различными типами целевой аппаратуры (ЦА);
- преобладание систем с количеством аппаратов от 10 до 40;
- перспективность совместной эксплуатации систем разных производителей и рост числа геоинформационных сервисов, интегрирующих данные с МКА разных орбитальных группировок.

На основе анализа различных подходов и моделей формирования ЖЦ изделия, в том числе используемых космическими агентствами различных стран для описания ЖЦ космической техники, сформирован ЖЦ МКСМ Земли, построенной на базе МКА (рисунок 1). ЖЦ построен на основе W-модели и учитывает итерационный характер создания системы, который начинается с создания и отработки опытного-технологического (ОТ) изделия, а затем уже на основе результатов его эксплуатации ведётся разработка серийного изделия (СИ), на базе которого формируется космическая система.

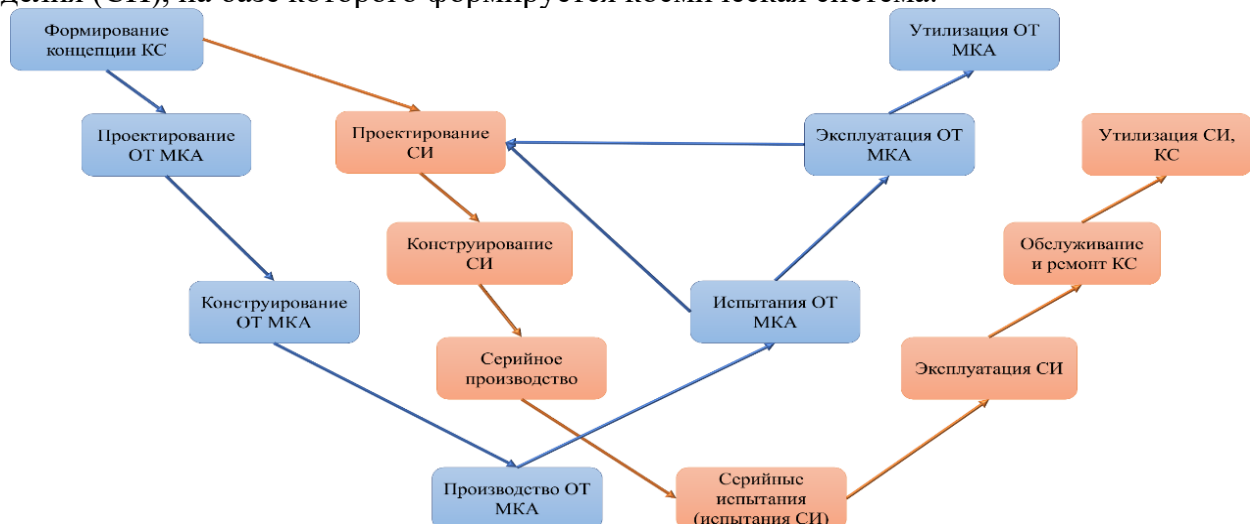


Рисунок 1 – Жизненный цикл МКСМ Земли на базе МКА

Предложен подход, предполагающий утилизацию отказавшего или утратившего управление МКА в составе МКСМ и замену его аппаратом, находящимся в резерве. Данный подход базируется на принципах унификации, стандартизации и модульности конструкции МКА, применяемых на этапе проектирования; серийного изготовления с использованием роботизированных комплексов, применяемого на этапе производства; широкого внедрения виртуальных испытаний на этапе наземной экспериментальной отработки, которые в конечном итоге направлены на сокращение сроков и стоимости создания МКА для МКСМ. Это делает нецелесообразным ремонт и техническое обслуживание отдельного МКА в процессе его функционирования. Поэтому под ремонтом в случае МКСМ предлагается понимать замену отказавших аппаратов на орбите путём восполнения группировки новыми МКА для поддержания работоспособности группировки и требуемых значений показателей эффективности её работы.

Разработана модель для определения количества аппаратов, необходимых для поддержания работоспособности МКСМ, на установленном на этапе проектирования уровне с учётом условия обеспечения минимального количества аппаратов для выполнения поставленной задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i^p = N_{i-1}^p - N_i^{hp} + N_i^b \geq N^{min}; \\ N_i^b \geq N_i^{hy} + N_i^{ot}; \\ N_i^{hy} = \sum_{j=1}^{N_i^p} a_{ij}; \\ N_i^{ot} = (1 - P_n) \cdot N_i^p = \frac{N_i^p}{\bar{t}_\phi} \cdot t_i; \\ P_n(t_i) = 1 - [1 - e^{-\lambda(t_i) \cdot (t_i)}]^{k_p+1}; \\ \bar{t}_\phi = \frac{k_p+1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^{k_p} (-1)^j \frac{k_p!}{(k_p-j)!j!(j+1)^2}; \\ \lambda(t_i) = \frac{\lambda_0(k_p+1)(1-e^{-\lambda_0 t_i})^{k_p} \cdot e^{-\lambda_0 t_i}}{1 - (1-e^{-\lambda_0 t_i})^{k_p+1}}; \\ k_p = \frac{M_n}{\alpha M_{MKA}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где N_i^p – работоспособные МКА; N_i^{hp} – МКА в нерабочем состоянии; N_i^{hy} – МКА, потерявшие управление; N_i^{ot} – отказавшие МКА; N_i^b – количество введённых в эксплуатацию МКА; $P_n(t_i)$ – вероятность надёжной работы МКА к i -му моменту времени; $\bar{t}_\phi$ – среднее время безотказной работы МКА к i -му моменту времени; k_p – кратность резервирования ненадёжных элементов; $\lambda(t_i)$ – интенсивность отказов в i -ый момент времени; M_n – масса, выделяемая для резервных копий ненадёжных элементов; M_{MKA} – масса МКА; α – относительная величина занимаемой резервными копиями ненадёжных элементов массы МКА.

Анализ зарубежного опыта создания многоспутниковых систем различного назначения показывает, что максимальный системный эффект достигается при полном развёртывании системы (как орбитального, так и наземного сегмента). С этой точки зрения первостепенное значение приобретает скорость создания системы, тогда математическая постановка многокритериальной задачи при решении её путём выделения главного критерия будет выглядеть следующим образом:

$$T_{созд}^{MКСМ} \rightarrow \min \quad \left| \begin{array}{l} \Pi \geq \Pi^{Зад}, R_{t_{k_l}} \geq R_{t_{k_l}}^{Зад}, \\ T_{CAC}^{MКСМ} \geq T_{CAC}^{MКСМЗад}, P \geq P^{Зад}, J \geq J^{Зад} \\ C_{MКСМ} \leq C_{MКСМ}^{Доп}, N_{MKA} \leq N_{MKA}^{Зад}, N_{PH} \leq N_{PH}^{Зад} \\ \gamma_{MKA} \in \gamma_{MKA}^{Доп}, X \in X^{Доп}, \gamma_{HКУ} \in \gamma_{HКУ}^{Доп}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где $T_{\text{созд}}^{\text{МКСМ}}$ – время создания МКСМ (сут.); $\gamma_{\text{МКА}}$ – вектор проектных параметров МКА, принадлежащий допустимому множеству $\gamma_{\text{МКА}}^{\text{Доп}}$; $X \in X^{\text{Доп}}$ – функционирование системы в рамках выбранной орбитальной структуры (X – вектор орбитальных параметров); $\gamma_{\text{НКУ}}$ – вектор проектных параметров НКУ, принадлежащий допустимому множеству $\gamma_{\text{НКУ}}^{\text{Доп}}$; Π – производительность системы, выражаемая площадью земной поверхности, которую могут снять МКА системы за один виток (сутки, год) полёта или за время активного существования; $R_{t_{k_l}}$ – вектор качественных характеристик информационного продукта в соответствии с набором тематических задач, решаемых МКСМ; $T_{\text{САС}}^{\text{МКСМ}}$ – САС МКСМ (время от начала эксплуатации системы в финальной конфигурации до времени утилизации последнего аппарата в ней); P – показатель надёжности системы, как её способность сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации; $C_{\text{МКСМ}}$ – интегральный показатель стоимости системы; J – комплексный показатель, характеризующий эффективность производственного процесса серийного изготовления МКА для МКСМ; $N_{\text{МКА}}$ – количество МКА в системе; $N_{\text{РН}}$ – количество запусков ракет-носителей (РН), необходимых для развертывания системы; индекс «Зад» – обозначение заданного значения соответствующего показателя, «Доп» – допустимое значение.

Главным инструментом снижения стоимости и сроков создания МКСМ, а также повышения качества и надёжности МКА, функционирующих в её составе, является цифровизация всех этапов ЖЦ системы: проектирования, производства, экспериментальной отработки, эксплуатации и утилизации.

Для подтверждения данного тезиса применён метод экспертной оценки. В опросе приняло участие десять экспертов в области создания ракетно-космической техники с ведущих предприятий ракетно-космической отрасли РФ, входящих в ГК «Роскосмос» (АО «РКЦ «Прогресс», ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», АО «РЕШЕТНЁВ», АО «НПО Лавочкина»), находящихся за её пределами (коммерческие компании ООО «Спутникс», ООО «Бюро 1440», АО НПК «Барл»), университетов, входящих в Консорциум аэрокосмических вузов России (Самарский университет им. С. П. Королёва, СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнёва, ГУАП). Для оценки степени влияния цифровизации рассматривались десять групп параметров:

$$\gamma_{\text{МКСМ}}^{\text{эксперт}} = \{R_{t_{k_l}}, \Pi, T_{\text{созд}}^{\text{МКСМ}}, C_{\text{МКСМ}}, P, J, \gamma_{\text{НКУ}}, \gamma_{\text{НППИ}}, \gamma_{\text{РН}}, \gamma_{\text{МКА}}\}. \quad (3)$$

В результате получены следующие веса групп параметров (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Веса групп параметров МКСМ по оценкам экспертов

	Группы параметров									
	$R_{t_{k_l}}$	Π	$T_{\text{созд}}^{\text{МКСМ}}$	$C_{\text{МКСМ}}$	P	J	$\gamma_{\text{НКУ}}$	$\gamma_{\text{НППИ}}$	$\gamma_{\text{РН}}$	$\gamma_{\text{МКА}}$
Веса групп V_i	0,141	0,066	0,155	0,151	0,066	0,145	0,066	0,038	0,040	0,133

Максимальный вес, по мнению экспертов, имеет группа параметров «время создания МКСМ». Коэффициент конкордации, определяющий степень согласованности мнений экспертов, в данном исследовании составил 0,67.

Таким образом, реализация проектов по созданию многоспутниковых космических систем мониторинга должна осуществляться с учётом минимизации стоимостных и временных параметров, что может быть обеспечено путём цифровизации основных этапов ЖЦ.

Во второй главе предложены методические подходы к формированию проектного облика и синтезу параметров МКА мониторинга Земли на базе УП с помощью разработанного специализированного программного обеспечения (ПО). Для его функционирования сформирован комплекс взаимоувязанных математических моделей, обеспечивающих формирование проектного облика МКА, расчёт параметров целевой аппаратуры и обеспечивающих систем (система энергоснабжения (СЭП), система обеспечения теплового режима, система управления движением (СУД), двигательная установка (ДУ)).

Разработанный «Программный комплекс для выбора проектных параметров космической системы мониторинга с учётом требований на ресурсы заказчика» структурно включает несколько модулей:

- 1) модуль для определения проектных параметров МКА ДЗЗ;
- 2) модуль для определения проектных параметров и имитационного моделирования функционирования МКСМ (рисунок 2);
- 3) модуль для определения целевых показателей эффективности МКСМ.

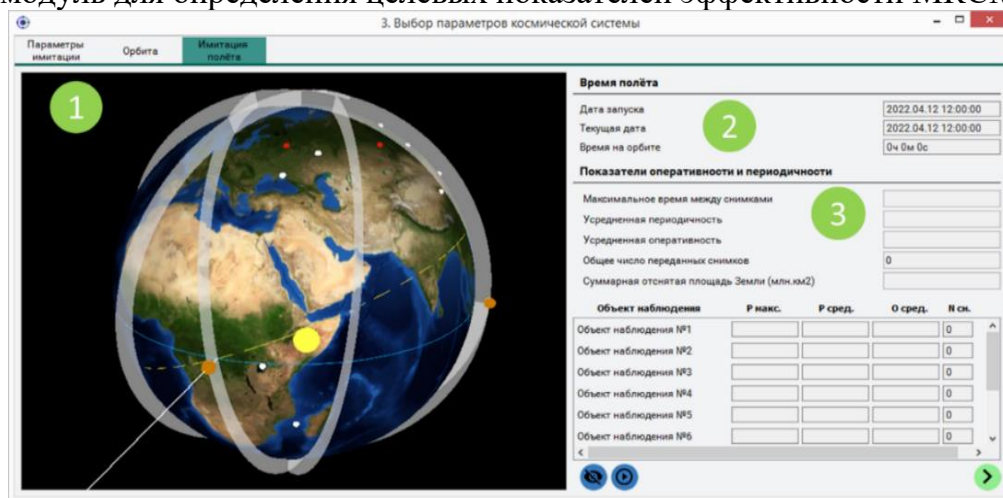


Рисунок 2 – Окно выбора параметров целевого функционирования МКСМ

Предложена следующая математическая модель оптико-электронного телескопического комплекса (ОЭТК), связывающая его массу с целевыми параметрами:

$$M_{\text{ОЭТК}} = k_{y\partial} \cdot \pi \cdot k_D \cdot D_{\Gamma 3} \left(\frac{k_D}{2} D_{\Gamma 3} + L_{\text{ОЭТК}} \right) = k_{y\partial} \cdot \pi \cdot k_D \cdot k_{\Gamma 3} \cdot \frac{\Pi l_3^2}{\Delta L^2} \cdot \left[\frac{k_D \cdot k_{\Gamma 3} \cdot \Pi}{2} + \frac{H}{k_f} \right], \quad (4)$$

где $k_{y\partial}$ – удельная масса ОЭТК; k_D – коэффициент превышения диаметра корпуса ОЭТК над диаметром главного зеркала; $D_{\Gamma 3}$ – диаметр главного зеркала; $L_{\text{ОЭТК}}$ – длина ОЭТК; $k_{\Gamma 3}$ – коэффициент превышения диаметра главного зеркала оптико-электронного телескопического комплекса над длиной фотоприёмного устройства; Π – ширина полосы захвата; l_3 – размер элемента ПЗС-матрицы; ΔL – линейное разрешение на местности; H – высота рабочей орбиты; k_f – коэффициент превышения фокусного расстояния оптико-электронного телескопического комплекса над его длиной.

Помимо синтеза параметров МКА для МКСМ с помощью разработанных математических моделей, программный комплекс предусматривает возможность использования базы данных (БД) обеспечивающих бортовых систем и ЦА МКА ДЗЗ в качестве средства информационной поддержки процесса проектирования. В разработанной БД добавлены описания аппаратных интерфейсов (шины и разъёмы), обеспечивающих работу подсистем в составе МКА. Соответствие интерфейсов используется в качестве одного из критериев совместимости компонентов.

Одним из основных направлений в проектировании, обеспечивающих эффективное решение задач создания МКСМ в короткие сроки, является использование платформенных принципов при разработке МКА, позволяющих создавать целый ряд

(семейство) МКА, отличающихся по составу ЦА, но имеющих общую платформу, включающую в себя полный набор обеспечивающих систем.

Сформирован итерационный алгоритм адаптации УП под требования ЦА МКА (рисунок 3). Алгоритм предполагает определение диапазона изменения вектора основных проектных параметров УП исходя из имеющихся ограничений на массу, габариты, энергопотребление и тип РН, и последующую проверку выполнения условия принадлежности изменённого (адаптерного) вектора проектных параметров УП заданному диапазону. В случае его невыполнения создание МКА на базе данной УП невозможно или нецелесообразно.

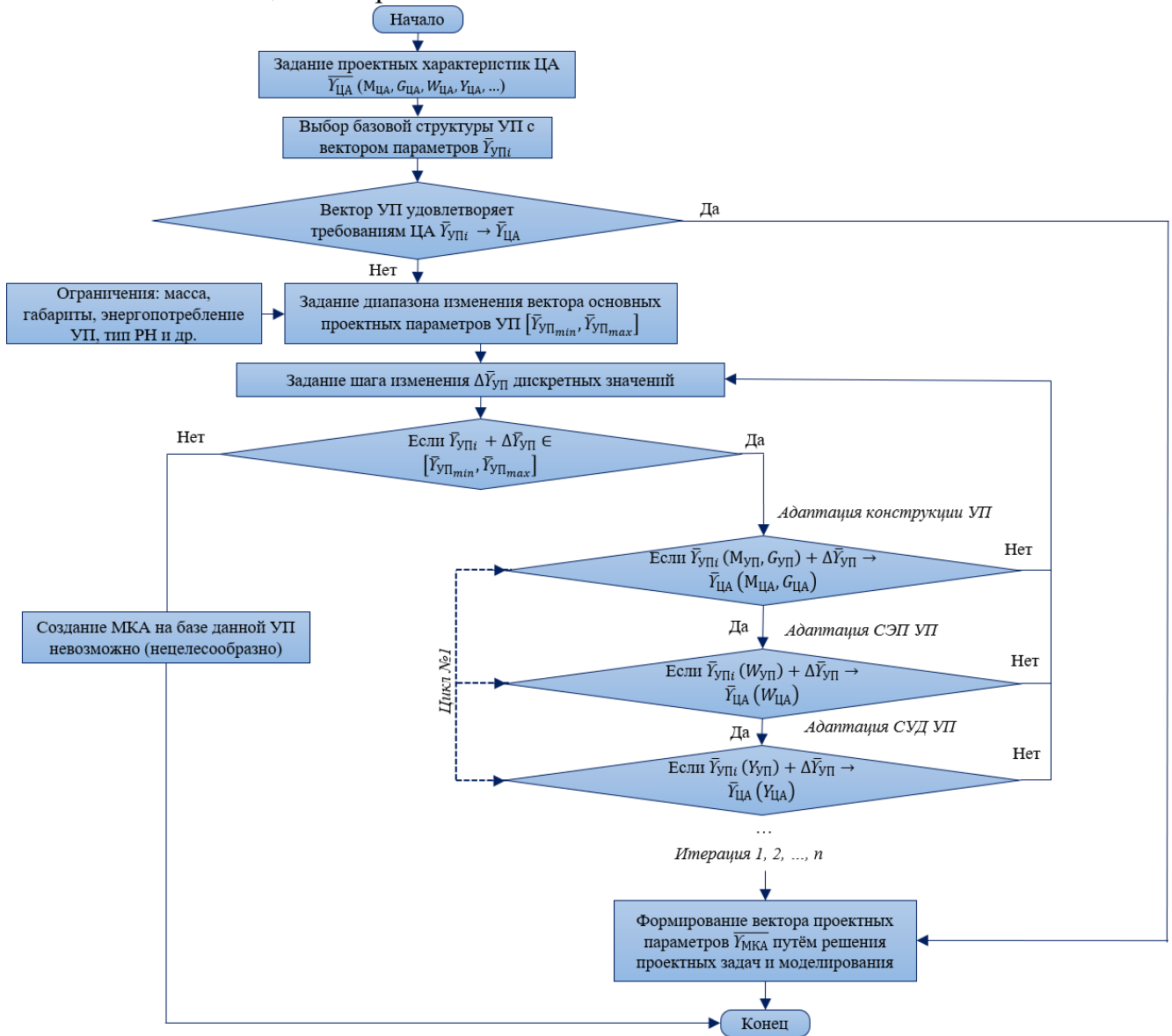


Рисунок 3 – Алгоритм адаптации УП под требования ЦА МКА

С использованием описанных выше моделей и алгоритма в 2013 г. была начата разработка УП МКА «АИСТ-2», предназначенной для интеграции различных типов целевой аппаратуры. Первым спутником, созданным на базе УП «АИСТ-2», является МКА ДЗЗ «АИСТ-2Д», разработанный совместно АО «РКЦ «Прогресс» и Самарским университетом, запущен на орбиту 28.04.2016 г. с космодрома Восточный.

На рисунке 4 приведены примеры решения задачи синтеза проектных параметров МКА ДЗЗ на базе УП «АИСТ-2» с различными типами ЦА (включая обзорную оптико-электронную, инфракрасную, гиперспектральную) с использованием разработанного ПО, описанных выше моделей и алгоритма.



Рисунок 4 – Проектный облик МКА ДЗЗ на базе УП «АИСТ-2»

С использованием разработанного ПО осуществлено моделирование целевого функционирования четырёх вариантов глобальной МКСМ на базе аппаратов класса «АИСТ-2Д» (рисунки 5, 6): в состав МКСМ №1 входит 48 МКА, равномерно распределённых по шести орбитальным плоскостям, которые, в свою очередь, распределены по всей земной сфере путём сдвига по долготе восходящего узла орбиты; в состав МКСМ №2 входит 24 МКА, распределение орбит по долготе восходящего узла составило 60°; в орбитальную структуру МКСМ №3 входят 16 МКА, распределённых равномерно по двум плоскостям под углом 90° друг к другу; МКСМ №4 строится на базе 8 МКА, расположенных в одной плоскости.

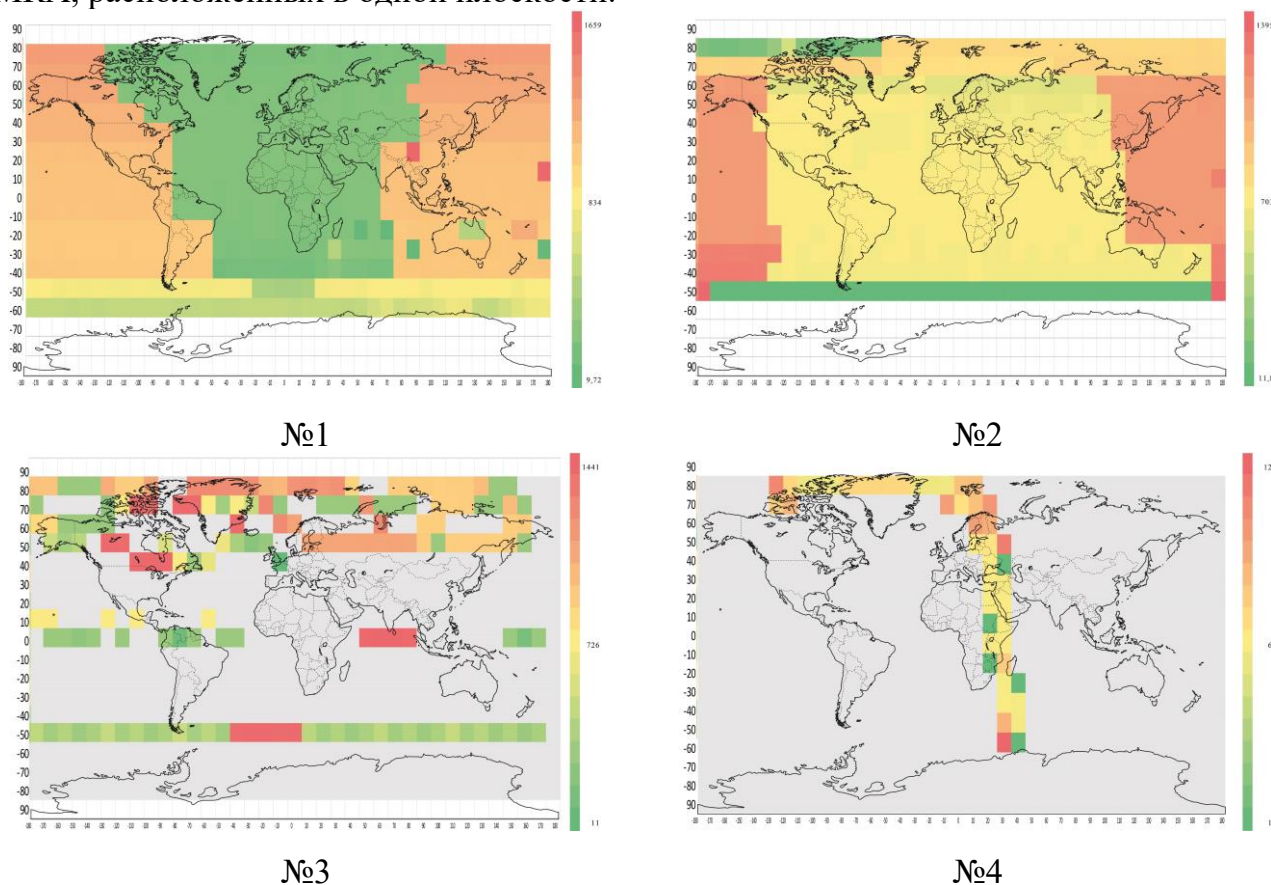


Рисунок 5 – Тепловые карты периодичности моделируемых вариантов МКСМ

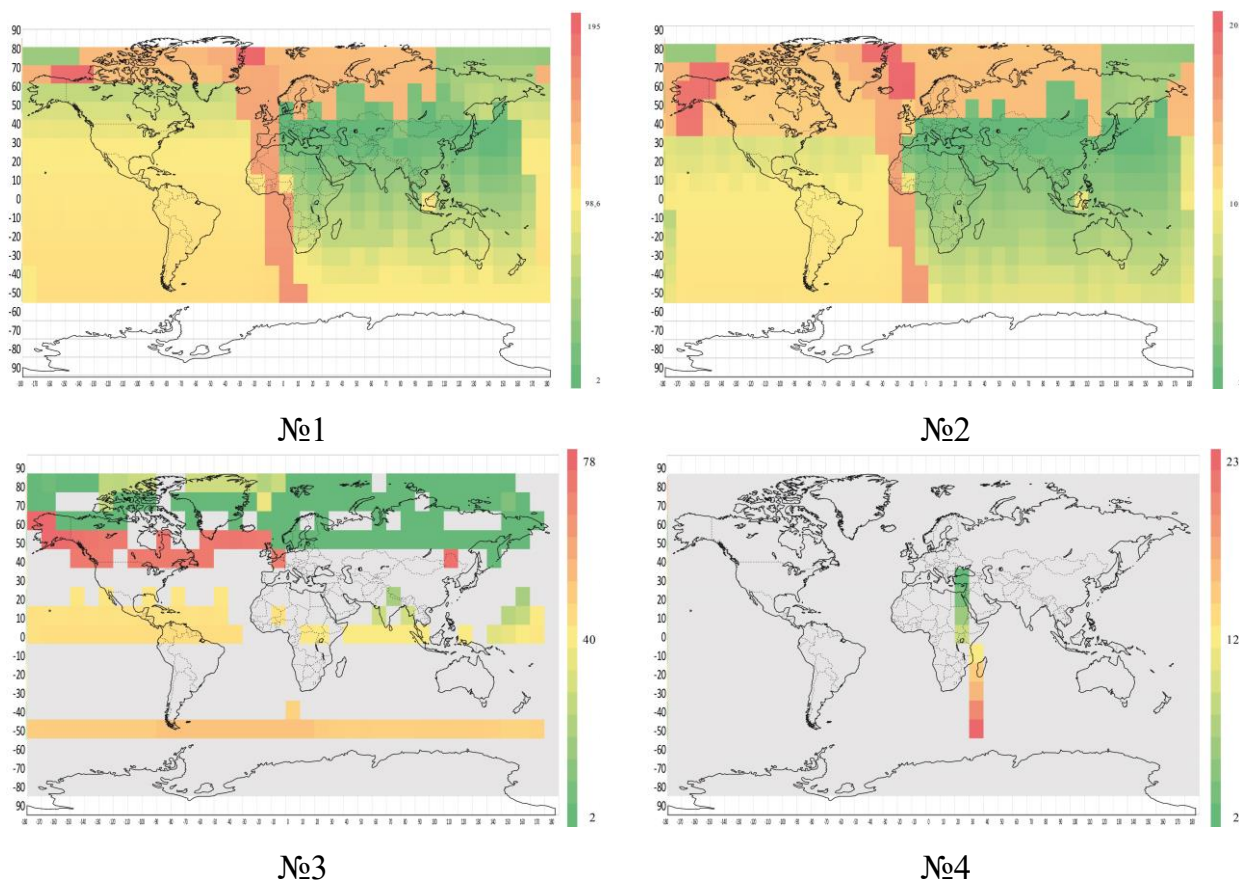


Рисунок 6 – Тепловые карты оперативности моделируемых вариантов МКСМ

Из рисунка 5 видно, что только МКСМ №1 и №2 удовлетворяют критерию глобальности обзора поверхности Земли за одни сутки полёта. При этом, в обоих вариантах, задействуя наземную инфраструктуру единой территориально-распределённой информационной системы (ЕТРИС) ДЗЗ, удаётся достигнуть оперативности доставки информации от 2 до 200 минут (рисунок 6). Из рисунка 6 также видно, что варианты МКСМ №3 и №4 не решают задачу глобального наблюдения поверхности Земли за сутки полёта.

Для оценки влияния выхода из строя спутников на показатели эффективности функционирования системы в разработанном ПО проведено моделирование функционирования МКСМ «SkySat», включающей 18 МКА на орбите и 12 наземных пунктов приёма информации (НППИ). На рисунке 7 приведено изменение ключевых показателей эффективности МКСМ в зависимости от количества отказавших МКА.

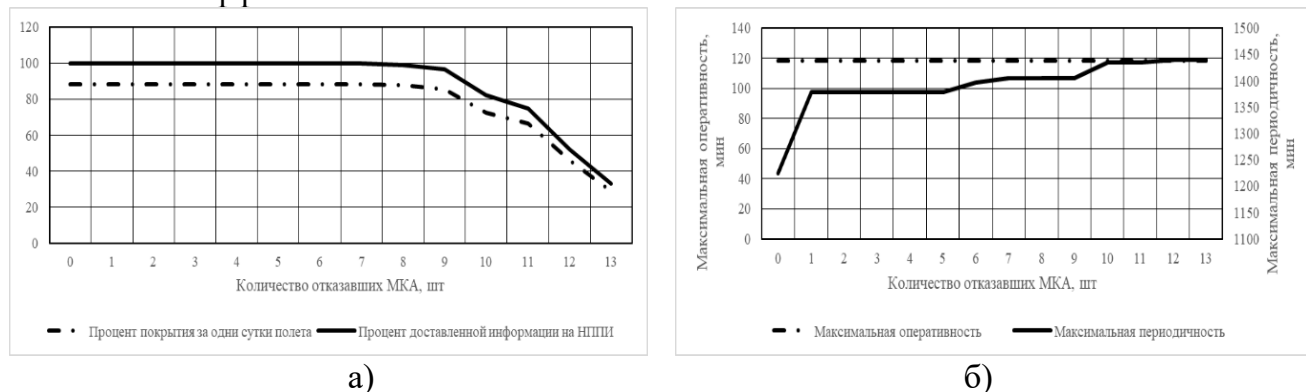


Рисунок 7 – Изменение показателей эффективности МКСМ в зависимости от количества отказавших МКА: а) процента покрытия поверхности Земли за одни сутки полёта и процент доставленной информации ДЗЗ на НППИ; б) максимальной периодичности и максимальной достигнутой оперативности доставки информации

Как видно из рисунка 7(а), ухудшение показателей глобальности покрытия и процента доставленной информации начинается после отказа девяти МКА. При этом выход из строя МКА не влияет существенным образом на показатель максимальной оперативности (рисунок 7(б)). В случае показателя максимальной периодичности он демонстрирует резкое ухудшение при отказе уже одного МКА в первой плоскости и затем плавно увеличивается в связи с ростом количества отказавших МКА, при достижении 12 отказавших МКА периодичность наблюдения некоторых точек начинает превышать одни сутки полёта.

Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать два вывода:

1) при создании отечественной МКСМ, использующей в качестве наземной инфраструктуру, например, систему ЕТРИС ДЗЗ, НППИ которой географически локализованы на территории РФ, такой устойчивости показатель оперативности доставки информации как у МКСМ «SkySat» продемонстрировать уже не сможет;

2) рекомендуемое количество резервных аппаратов в МКСМ, которые необходимо размещать на орбите для осуществления ремонта системы и восполнения группировки, должно составлять не менее 15% от полной численности группировки, обеспечивающей решение целевой задачи мониторинга Земли с требуемыми показателями эффективности.

В третьей главе изложены подходы организации серийного цифрового производства и экспериментальной отработки МКА в составе МКСМ. Сформулированы тренды в организации производства МКА:

- кратное увеличение количество выпускаемых МКА для обеспечения создания многоспутниковых космических группировок;
- увеличение номенклатуры выпускаемых МКА для обеспечения выполнения индивидуальных требований заказчика;
- повышение скорости процессов создания МКА за счёт сокращения длительности производственных циклов;
- снижение затрат на разработку, постановку на производство, изготовление и испытания за счёт внедрения платформенных решений, унификации узлов и компонентов.

Проведён анализ существующих моделей производственных систем, ориентированных на серийное производство, на основе которого осуществлён и обоснован выбор для серийного производства МКА модели матричного производства, обладающего следующими преимуществами:

- максимальная скорость производственных процессов (производительность) при большой номенклатуре выпускаемой продукции;
- высокая степень унификации и стандартизации производственно-технологических решений (унифицированные производственные ячейки);
- возможность практически бесконечного масштабирования производства без рисков получения несбалансированных производственных участков.

Разработана обобщённая математическая модель матричного типа производства:

$$C_{m,n}(V_{\text{пр}}) = \min_i f_{m,n,i}(\sum_m C_{m,n-1}(V_{\text{пр}}) * c_{m,n-1,i}), \quad (5)$$

где $C_{m,n}(V_{\text{пр}})$ – текущий коэффициент загрузки производственной линии, состоящей из n узлов и m линий; $c_{m,n,i}$ – коэффициент загрузки при выполнении i технологических и (или) вспомогательных операций в узле m , n ; $V_{\text{пр}}$ – объём произведённой продукции.

Здесь учитываются варианты замещающей и совокупной зависимости узлов слоя n от слоя $n-1$. Замещающая зависимость означает, что для работы некоторому узлу на слое n требуется выход одного из связанных узлов слоя $n-1$, а совокупная зависимость обозначает, что на входе узла слоя n должны быть одновременно результаты работы двух и более узлов

слоя $n-1$. Во втором случае загрузка определяется минимальной производительностью предыдущего слоя по виду операций i . Выражение (5) используется для определения оптимальной производительности матричного производства, принимая во внимание, что значение функции $f_{m,n,i}$ зависит от значений производительности предыдущих узлов. Данное выражение может быть использовано при выборе наилучшего маршрута прохождения заказа через узлы m, n для минимизации затрат на производство. Таким образом, ключевой принцип оптимизации матричных производств основан на рекурсивных вычислениях и иерархическом подходе в анализе данных. Полученная структура представляет собой аналог многослойного персептрона, в котором в качестве функции активации используется функциональная зависимость $f_{m,n,i}$.

Ключевым базовым элементом матричного производства является роботизированная производственная ячейка (РПЯ) (рисунок 8).

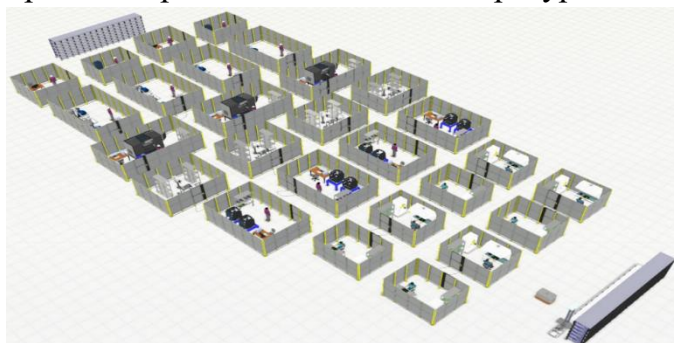


Рисунок 8 – Модель матричного производства

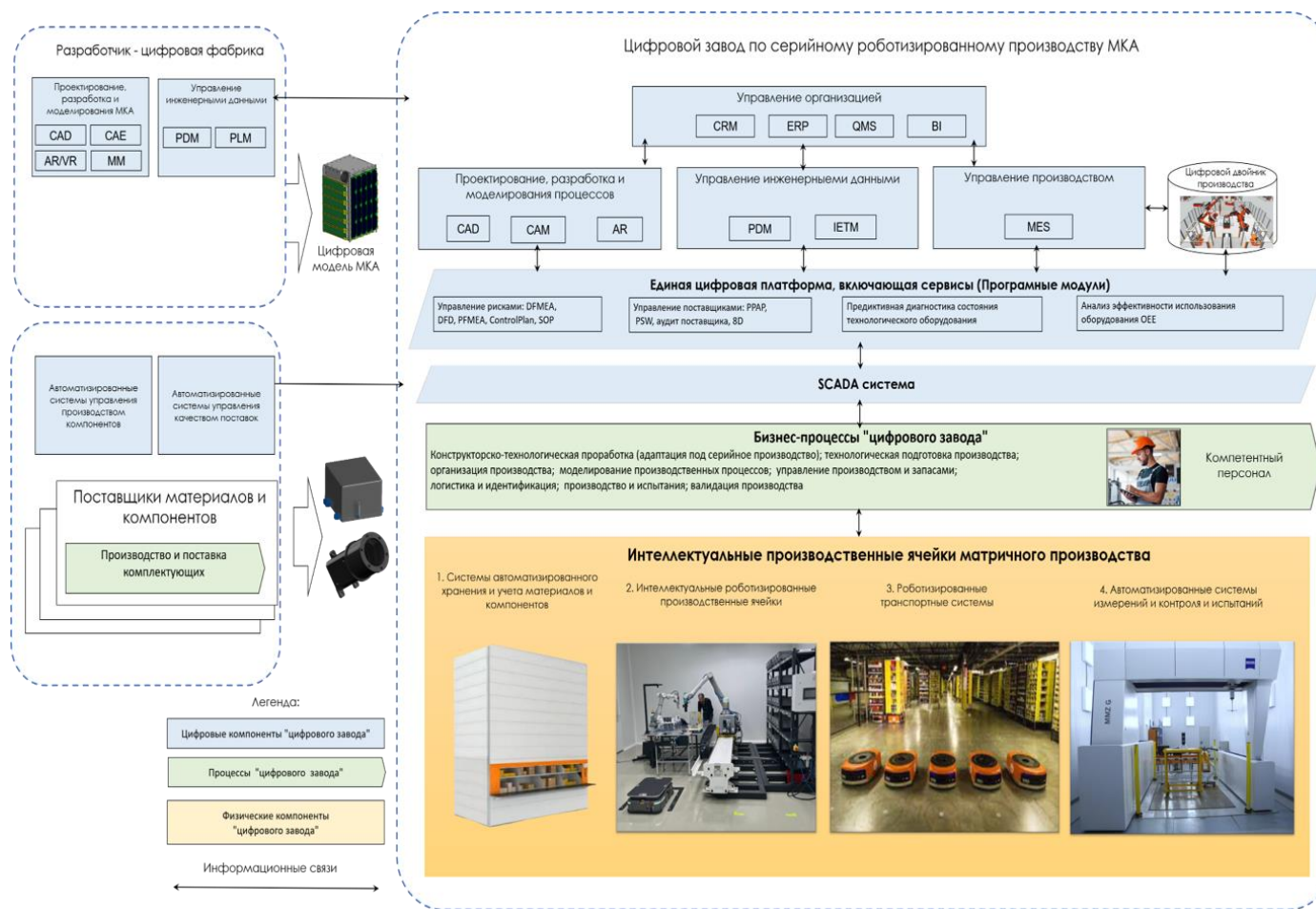
Для оптимизации параметров производительности, пропускной способности и длительности производственного цикла разработана методика построения имитационной модели производственного процесса (рисунок 9), содержащая классификацию показателей производственного процесса.



Рисунок 9 – Методика построения имитационной модели производственного процесса

Разработана концепция создания и функционирования «цифрового завода» (киберфизической фабрики) по серийному производству МКА, структурная модель которой представлена на рисунке 10а. Она основывается на классической модели системы управления, содержащей субъекты управления (группа сквозных технологий, цифровая платформа, SCADA-система (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition, диспетчерское управление и сбор данных)) и объекты управления (бизнес-процессы, производственные участки матричного производства).

Практическая реализация разработанной концепции и модели осуществлена под руководством автора в рамках созданной в 2022-2024 гг. в Самарском университете киберфизической фабрики МКА ДЗЗ (рисунок 10б).



а)



Участок роботизированной сборки МКА



Участок механической обработки



Участок хранения

б)

Рисунок 10 – «Цифровой завод» (киберфизическая фабрика) по серийному производству МКА:

а) – структурная модель; б) – практическая реализация в виде набора роботизированных производственных ячеек (участков) в Самарском университете

Система экспериментальной отработки (СЭО) МКА, состоящая из этапов наземной экспериментальной отработки (НЭО) и лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ), является неотъемлемой частью системы обеспечения качества и надёжности создаваемых изделий. В результате обобщения опыта экспериментальных исследований, накопленного в АО «ЦНИИмаш», ПАО «РКК «Энергия», АО «РЕШЕТНЁВ», АО «РКЦ «Прогресс» сформирована структура СЭО (рисунок 11).

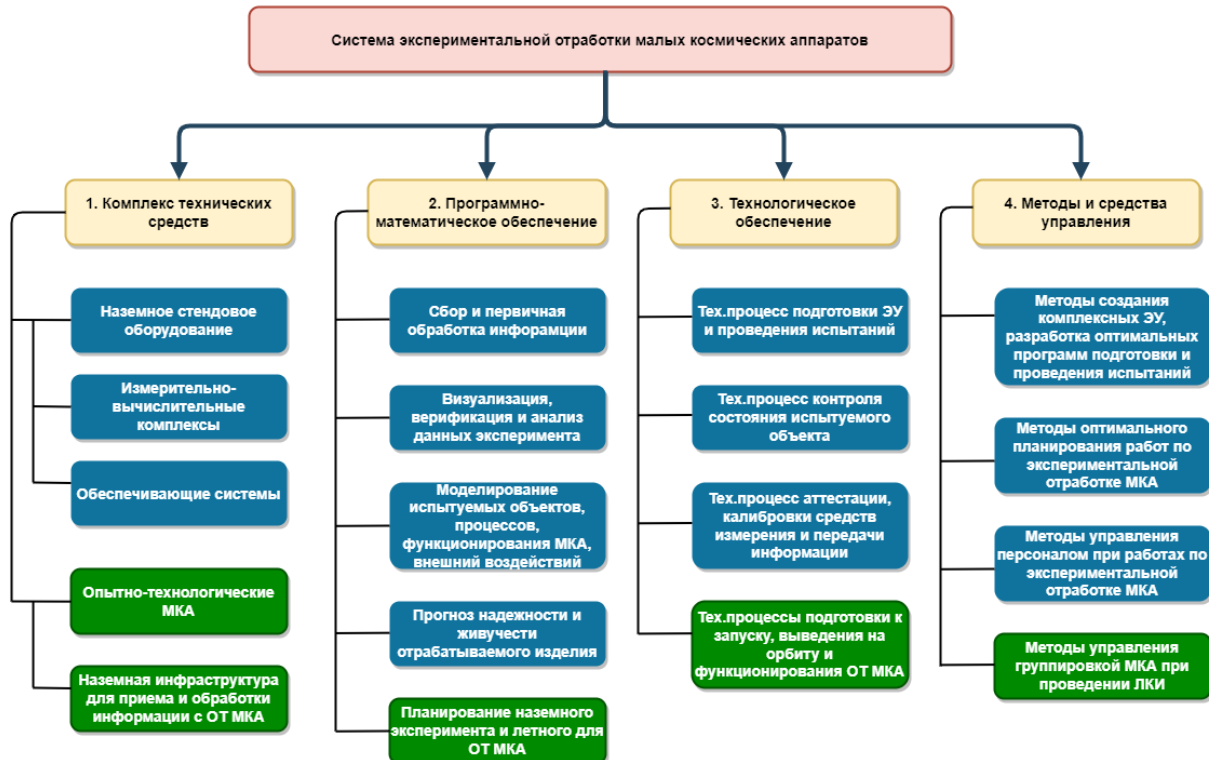


Рисунок 11 – Структурная схема СЭО МКА

Характерными для отработки многоспутниковых группировок (зелёный цвет), является создание и запуск ОТ МКА для ускоренной отработки элементов серийного МКА в условиях космического пространства.

Проведена классификация испытаний МКА ДЗЗ (рисунок 12) и определены направления оптимизации объёмов НЭО МКА для МКСМ.

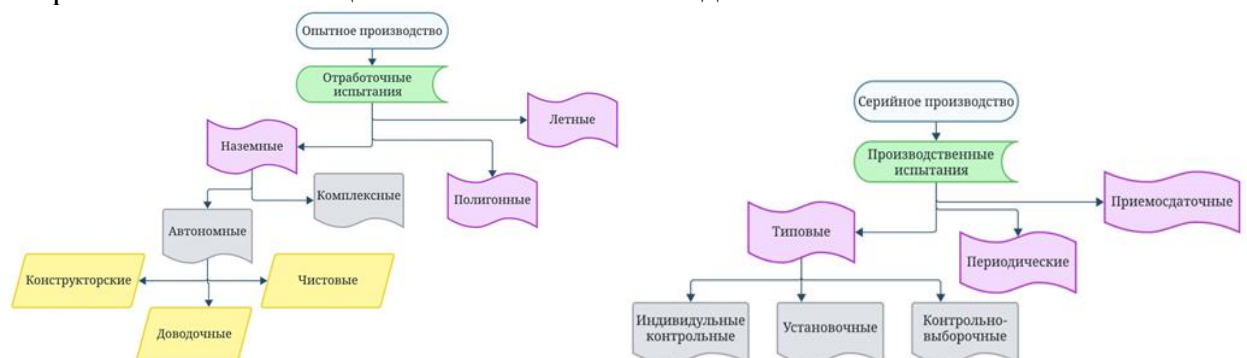


Рисунок 12 – Виды испытаний в опытном и серийном производстве МКА

Уровень надёжности МКА и его бортовых систем, а также сроки его отработки и ресурсы, затрачиваемые на подтверждение его надёжности, определяются в первую очередь объёмами НЭО. Общими подходами к оптимизации объёмов отработки МКА в МКСМ являются сокращение номенклатуры изготавливаемой материальной части для НЭО, замена физических экспериментальных установок (ЭУ) МКА программными моделями и перевод ряда испытаний в цифровую (виртуальную) среду.

Для определения надёжности МКА в МКСМ по результатам НЭО предложено использовать логико-вероятностные методы, с помощью которых возможно не только нормирование количества допустимых отказов, но и идентификация «слабых» звеньев системы для определения направлений повышения её надёжности.

Рост надёжности МКА при проведении НЭО зависит от числа доработок и в первом приближении может быть описан функцией, аналогичной экспоненциальному закону распределения случайных чисел (рисунок 13).

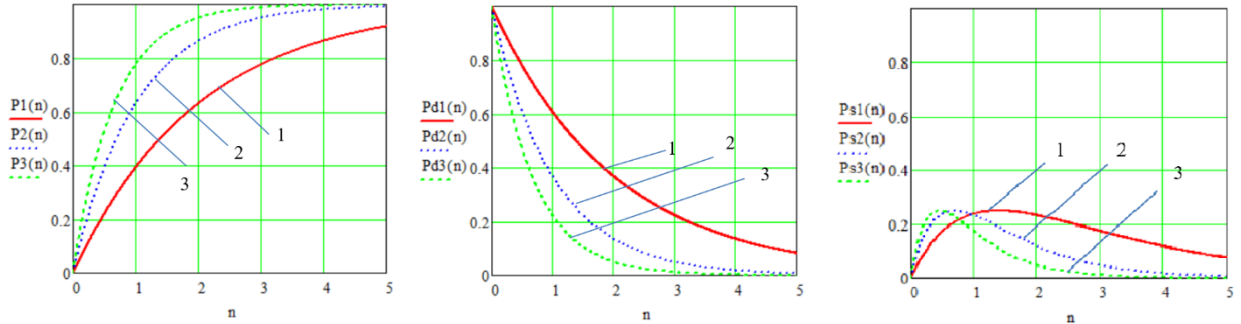


Рисунок 13 – Графики роста надёжности (а), прироста надёжности (б) и произведения функций роста и прироста надёжности (в) МКА в зависимости от количества доработок: 1 – $k = 0,5$; 2 – $k = 1$; 3 – $k = 1,5$ (k – параметр, корректирующий связь надёжности с количеством доработок)

Логическая функция безотказной работы МКА имеет форму:

$$Y = P_{\text{МКА}} \vee P'_{\text{МКА}} \& P_{\text{Д1}} \& P_{\text{МКА1}} \vee P'_{\text{МКА}} \& P_{\text{Д1}} \& P'_{\text{МКА1}} \& P_{\text{Д2}} \& P_{\text{МКА2}} \vee P'_{\text{МКА}} \& P_{\text{Д1}} \& P'_{\text{МКА1}} \& P_{\text{Д2}} \& P'_{\text{МКА2}} \& P_{\text{Д3}} \& P_{\text{МКА3}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{МКА}}$ – событие безотказной работы МКА (без доработки); $P_{\text{МКА1}}$, $P_{\text{МКА2}}$, $P_{\text{МКА3}}$ – события безотказной работы МКА после 1-ой, 2-ой, 3-ей доработок; $P'_{\text{МКА}}$ – событие отказа МКА (без доработки); $P'_{\text{МКА1}}$, $P'_{\text{МКА2}}$, $P'_{\text{МКА3}}$ – события отказа МКА после 1-ой, 2-ой, 3-ей доработок; $P_{\text{Д1}}$, $P_{\text{Д2}}$, $P_{\text{Д3}}$ – события 1-ой, 2-ой, 3-ей доработок МКА; $\vee$ – операция дизъюнкции; $\&$ – операция конъюнкции событий.

Поскольку логическая функция представляет собой ортогональную дизъюнктивную нормальную форму, то переход к вероятностной функции существенно упрощается. Для этого необходимо события заменить их вероятностями:

$$P(Y) = P_{\text{МКА}} + (1 - P_{\text{МКА}})P_{\text{Д1}}P_{\text{МКА1}} + (1 - P_{\text{МКА}})P_{\text{Д1}}(1 - P_{\text{МКА1}})P_{\text{Д2}}P_{\text{МКА2}} + (1 - P_{\text{МКА}})P_{\text{Д1}}(1 - P_{\text{МКА1}})P_{\text{Д2}}(1 - P_{\text{МКА2}})P_{\text{Д3}}P_{\text{МКА3}}. \quad (7)$$

Таким образом, зная статистические показатели процесса НЭО МКА, можно получить приращения надёжности после каждой доработки и определить необходимое число доработок.

Идентификация «слабых» звеньев в СЭО (анализ чувствительности) удобно проводить на основе понятия «значимость» элемента как частной производной от вероятности безотказной работы (или отказа) системы по вероятности безотказной работы (или по вероятности отказа) элемента, то есть:

$$\xi_{\text{МКА}} = \frac{\partial P(Y)}{\partial P_{\text{МКА}}} = 1 - P_{\text{Д1}}P_{\text{МКА1}} - P_{\text{Д1}}(1 - P_{\text{МКА1}})P_{\text{Д2}}P_{\text{МКА2}} - P_{\text{Д1}}(1 - P_{\text{МКА1}})P_{\text{Д2}}(1 - P_{\text{МКА2}})P_{\text{Д3}}P_{\text{МКА3}}. \quad (8)$$

Однако такой расчёт показателей значимости проводить с помощью ЭВМ затруднительно. В теории логико-вероятностных методов доказывается, что производная от вероятностной функции, полученной с помощью методов алгебры логики, численно равна разности вероятности работоспособного состояния системы и вероятности, когда рассматриваемый элемент находится в состоянии отказа:

$$\xi_{\text{МКА}} = P[Y|(P_{\text{МКА}} = 1)] - P[Y|(P_{\text{МКА}} = 0)]. \quad (9)$$

Такой подход позволяет легко автоматизировать процесс расчёта показателей значимости элементов (видов испытаний) СЭО.

Предложена обобщённая схема цифровизации СЭО МКА ДЗЗ, функционирующих в составе МКСМ (рисунок 14).

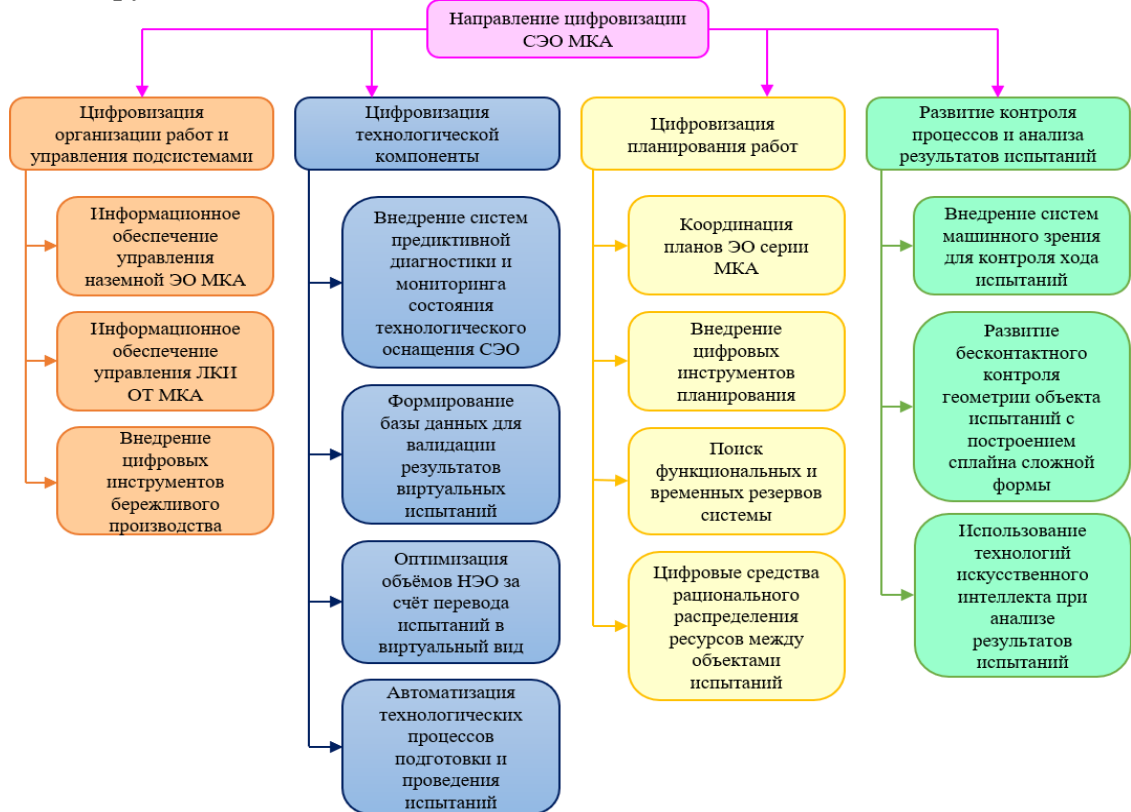


Рисунок 14 – Обобщённая схема повышения эффективности СЭО МКА ДЗЗ, функционирующих в составе МКСМ

В четвертой главе описана цифровизация процессов управления, эксплуатации и утилизации МКСМ. В частности, разработана архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления перспективными многоспутниковыми системами (рисунок 15), основными элементами которой являются:

- БД электронных паспортов МКА для хранения всей проектно-конструкторской и эксплуатационной документации о МКА;
- модуль прогнозирования орбитального движения для выбора актуальных TLE (от англ. Two-Line Element set, двухстрочный набор элементов орбиты) в зависимости от режима функционирования МКА, планируемых сеансов связи и наличия навигационного приёмника на борту;
- модуль интеллектуального планирования работы МКСМ для формирования программы сеансов управления для сети НППИ с учётом состояния каждого МКА, его задач, режима работы и расположения НППИ и их состояний;
- БД доступных НППИ для хранения информации о географическом положении, характеристиках антенной инфраструктуры и маске их зоны радиовидимости;
- модуль реализации управляющих воздействий для формирования пакетов данных на основе командно-программной информации, формируемой с помощью модуля интеллектуального планирования;
- БД принятой с МКА группировки телеметрической информации для хранения и обогащения;
- модуль анализа телеметрии для автоматизированной (в идеальном случае –

автоматической) обработки и анализа данных телеметрических измерений для формирования картины состояния МКА и МКСМ в целом.

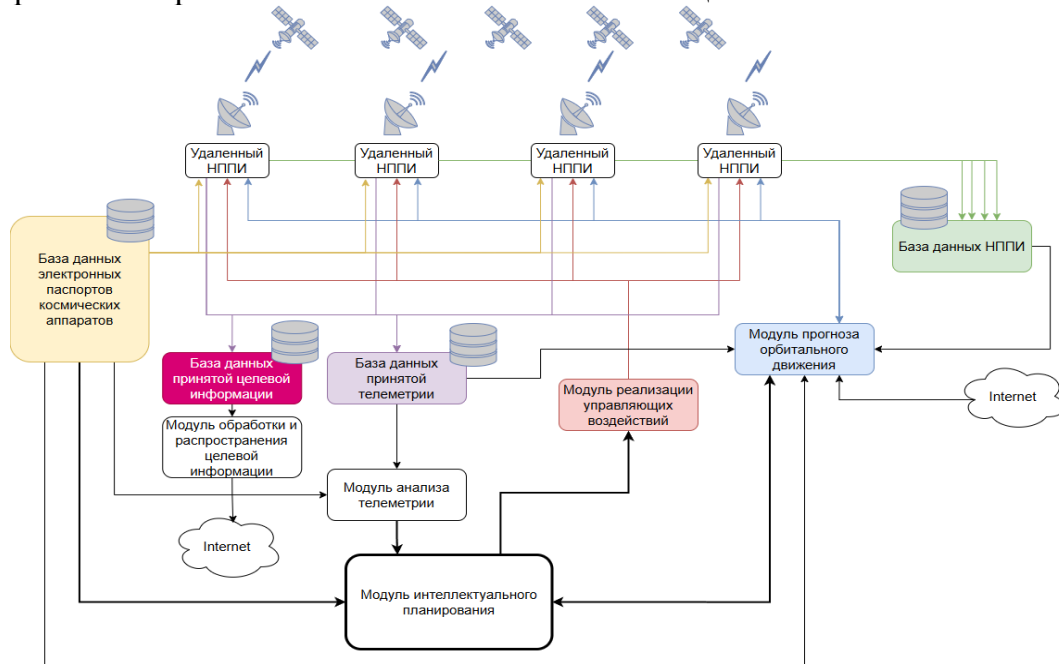


Рисунок 15 – Архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления МКСМ

Преимуществом предложенной архитектуры является с одной стороны возможность создания её в полностью распределённом виде с облачным хранением данных и доступом через сеть интернет, а с другой – возможность глубокой автоматизации процессов, в пределе – полный отказ от персонала управления.

Предложена следующая структура системы приёма, хранения и обработки данных ТМИ с МКА, функционирующих в составе МКСМ. Предлагается реализация системы хранения и обработки ТМИ с центральным хранилищем на базе реляционной СУБД и локальными хранилищами на ней же. Первичную обработку и визуализацию для оперативного управления предлагается осуществлять скриптами локально в НППИ. Локализация позволяет достигать высокой оперативности. Аналитическая деятельность может осуществляться со специальной несинхронной (запаздывающей) копии центрального хранилища данных ТМИ. Дополнительным свойством такой архитектуры является её независимость от доступности центрального узла в момент сеанса. Обработанные данные ТМИ из локальной БД передаются в центральное хранилище данных всей МКСМ для последующей обработки и обогащения.

Влияние возмущающих факторов на процесс получения данных ТМИ вызывает, как правило, два типа ошибок: пропуски, то есть отсутствие ряда данных; статистические выбросы – данные, не соответствующие тенденциям. Проведён анализ методов восстановления данных в ТМИ МКА, функционирующих в составе МКСМ, с целью последующей автоматизации процесса.

Для исправления ошибок первого типа рассмотрены методы, основанные на модели линейной и нелинейной регрессии, заполнение средним арифметическим значением, метод заполнения медианой, метод сплайн – интерполяции, методы линейной интерполяции и кубической сплайн – интерполяции. Для исправления ошибок второго рода рассмотрены методы стандартизированной оценки, модифицированной стандартизированной оценки, межквартильного размаха.

На рисунке 16 приведены исходный (16а) и сгенерированный с пропусками данных (16б) график изменения напряжения бортовой сети МКА серии «АИСТ».

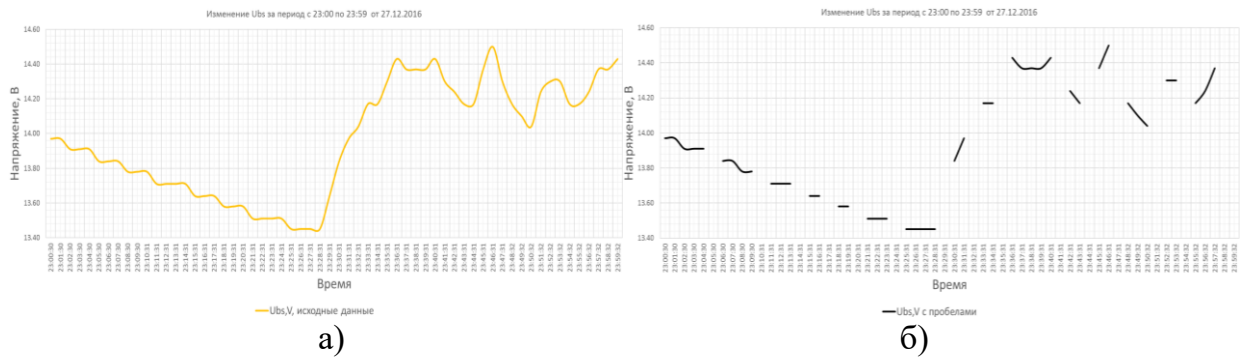


Рисунок 16 – График изменения напряжения бортовой сети U_{bs} : а) – исходный; б) – сгенерированный с пропусками в ТМИ

На рисунке 17 представлены графики изменения параметра U_{bs} , восстановленные с помощью методов, основанных на моделях линейной и нелинейной регрессии.

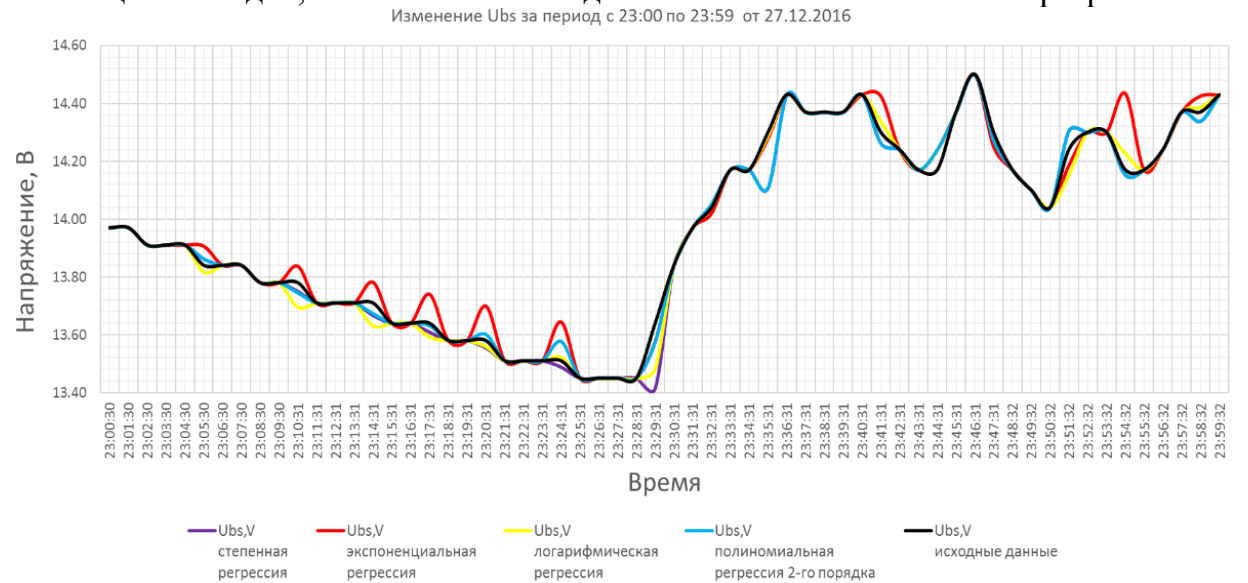


Рисунок 17 – График зависимости параметра U_{bs} от времени после восстановления по методам линейной и нелинейной регрессии

Среди способов количественного оценки результатов прогнозирования временных рядов наиболее популярными являются *MAPE* (от англ. Mean Absolute Percentage Error – средняя абсолютная процентная ошибка):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Z(t) - \hat{Z}(t)|}{Z(t)} 100\%, \quad (10)$$

где N – интервал прогноза; $Z(t)$ – действительное значение временного ряда; $\hat{Z}(t)$ – спрогнозированное значение временного ряда.

Соответственно, точность прогноза определяется из выражения:

$$\text{Точность прогноза} = 100 - MAPE. \quad (11)$$

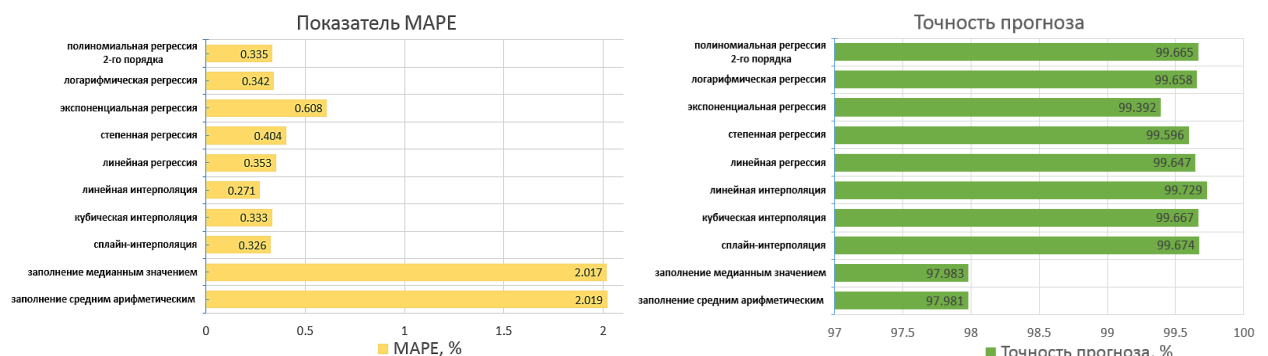


Рисунок 18 – Эффективность применения методов устранения пропусков

На рисунке 18 приведены результаты определения эффективности различных методик устранения пропусков для параметра U_{bs} . Наивысшая точность прогноза наблюдается при использовании линейной интерполяции, что обусловлено особенностями самого параметра U_{bs} . Среди моделей нелинейных регрессий наивысшую эффективность показала полиномиальная модель 2-го порядка. Использование восстановления по медиане или среднему арифметическому в такой ситуации является неэффективным. Очевидно, имеет смысл использования комбинаций данных методов. Интерполяционные методы, кубическая и линейная, наиболее просты с точки зрения их реализации, чем использование регрессионных моделей. Таким образом, для автоматизации процесса обработки ТМИ целесообразно использовать совокупность методов для получения прогноза с максимальной точностью.

На рисунке 19 представлены графики изменения параметров СЭП с выявленными статистическими выбросами.

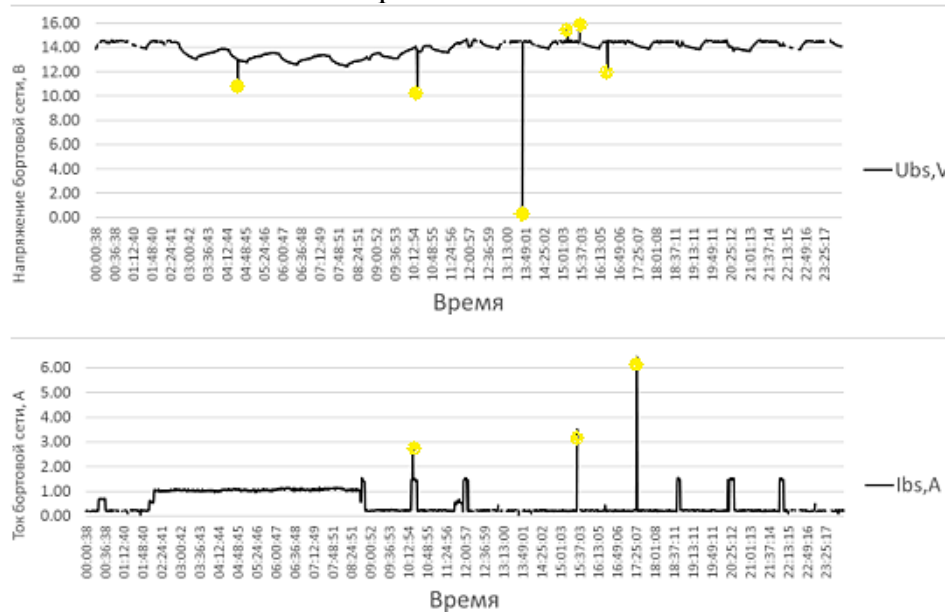


Рисунок 19 – Графики изменения показаний СЭП с выявленными выбросами

Все три вышеописанных способа смогли определить аномальные значения параметров как выбросы, однако некоторые из них были получены не из-за нештатных ситуаций в работе бортового оборудования, а, как в случае с резко возросшим током бортовой сети I_{bs} , с началом сеанса связи с НКУ. Это говорит о том, что методики не учитывают «контекст» ситуационной обстановки. Тем не менее, методы позволили обнаружить очевидные отклонения в параметрах СЭП, например, аномальное одномоментное падение напряжения бортовой сети U_{bs} с 14 В до 1 В.

Таким образом, рассмотренные методы целесообразно использовать для первичного анализа ТМИ, для выявления аномальных значений с целью дальнейшего изучения природы их появления. Для более детального анализа состояния МКА необходимо использование нейросетевых методов машинного обучения, которые смогут учитывать контекст появления аномального значения параметра.

Вторым важнейшим направлением цифровизации этапа эксплуатации МКСМ, помимо автоматизации обработки данных ТМИ, является автоматизация процессов, связанных с формированием, обработкой и распространением целевой информации ДЗЗ. Предложена новая схема распространения материалов космической съёмки (рисунок 20), обеспечивающая возможность одновременной работы с аппаратами ГК «Роскосмос» и МКА, запускаемыми для работы в составе МКСМ, в том числе коммерческими компаниями.

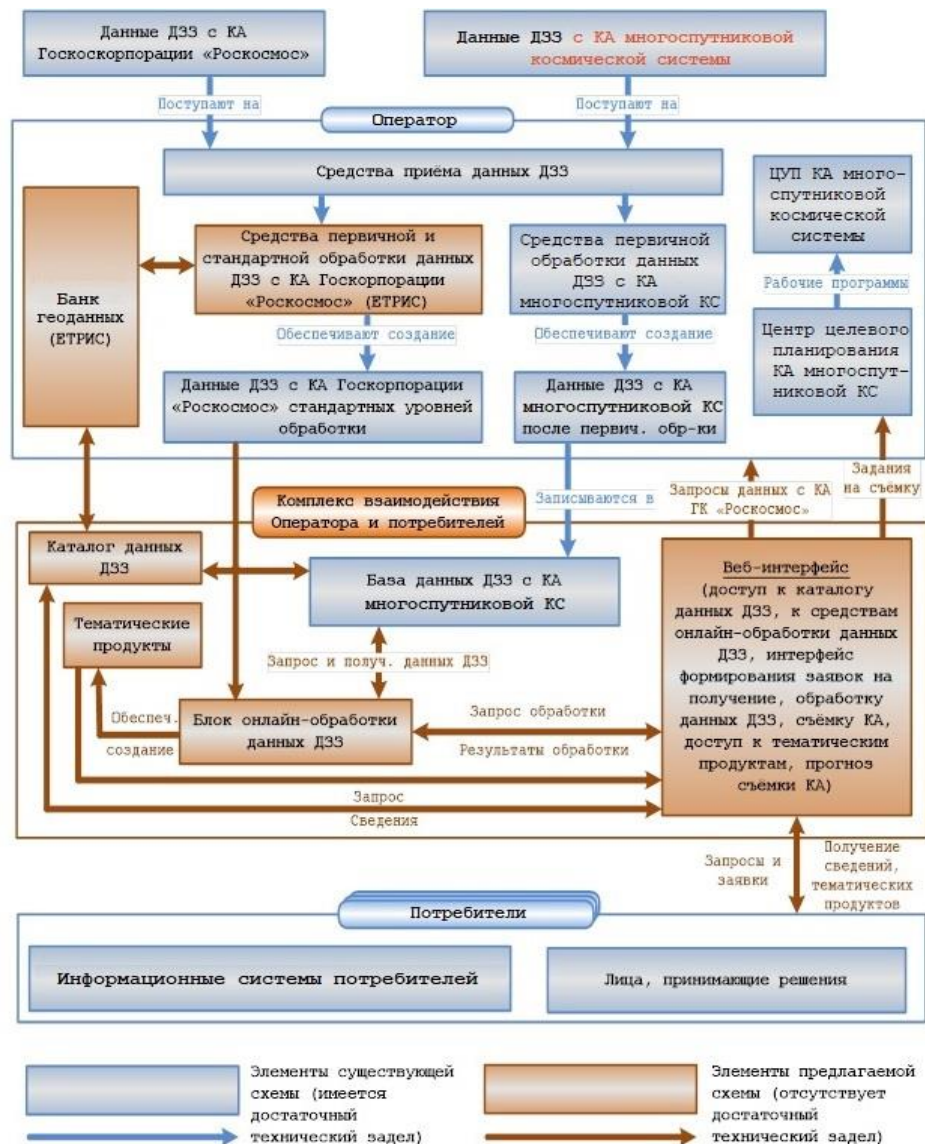


Рисунок 20 – Предлагаемая схема распространения данных ДЗЗ МКСМ

Ключевой особенностью предлагаемой схемы является то, что данные ДЗЗ из базы данных поступают в блок онлайн-обработки, обеспечивая стандартную и тематическую обработку с целью создания тематических продуктов для решения задач потребителей, которые доставляются до потребителей посредством веб-интерфейса. Блок онлайн обработки включает в себя следующие модули:

- хранения управляемых пользователями заданий на выполнение процедур обработки и результатов их выполнения;
- блок работы с заданиями;
- блок подготовки исходных данных из баз данных ДЗЗ для дальнейшего использования в процедурах обработки.

Инфраструктура блока онлайн-обработки данных ДЗЗ позволяет единообразно и быстро проводить процедуры обработки разнородных данных из больших распределенных баз данных ДЗЗ и удалённо управлять такими процедурами с помощью веб-интерфейса.

Для повышения эффективности информационного взаимодействия потребителей информации ДЗЗ за счёт использования возможности получения сведений об архивных данных ДЗЗ с МКА типа «АИСТ-2Д» и формирования заявок на получение информационных продуктов с учётом функционала мобильных устройств разработана версия веб-интерфейса «Геомобил» (рисунок 21).

Приложение взаимодействует только с одним компонентом НКУ, обеспечивающим работу МКА «АИСТ-2Д», открытым в «Интернет» – комплексом хранения и информационного взаимодействия.

Серверная часть взаимодействует с БД зарегистрированных пользователей и заявок на основе PostgreSQL по внутренней, защищённой сети. Это позволяет использовать в качестве программного интерфейса простой и удобный в поддержке вариант: ODBC-соединение с ограниченными правами на выполнение нескольких хранимых процедур. Логiku программного интерфейса, таким образом, можно реализовать в виде пользовательских типов и хранимых процедур.

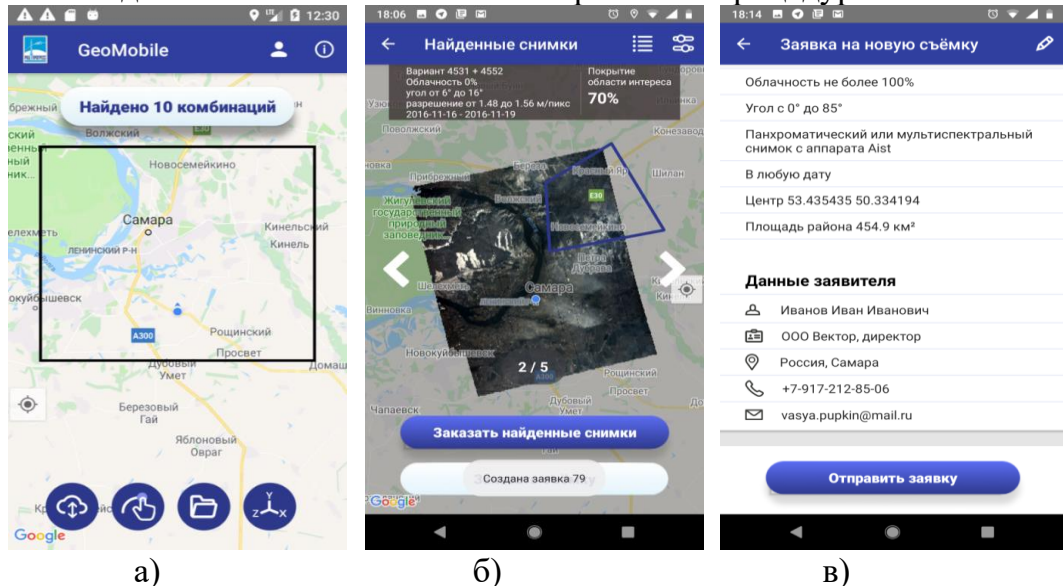


Рисунок 21 – Мобильное приложение «Геомобил»: а) – главное меню; б) – поиск снимков из архива; в) – заявка на новую съёмку

Задача предоставления информационных продуктов ДЗЗ широкому кругу потребителей может быть эффективно решена с использованием облачных вычислений, на основе которых предложена принципиальная схема построения центра обработки и распространения данных ДЗЗ (рисунок 22).

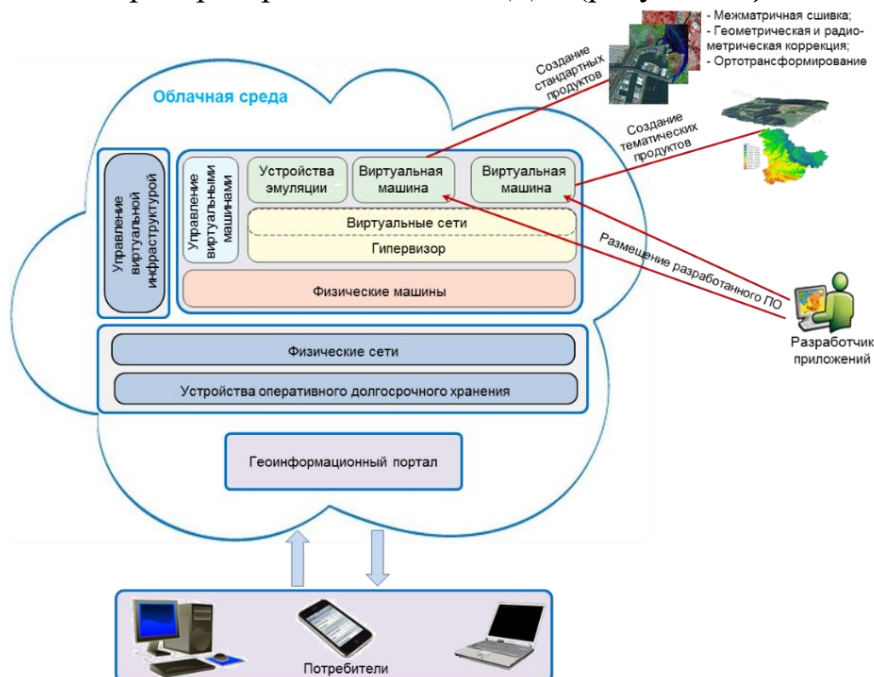


Рисунок 22 – Схема построения центра обработки и распространения информации ДЗЗ на базе облачных технологий

Размещение технологических процессов оператора в облачной инфраструктуре позволит гибко и автоматически перераспределять вычислительные ресурсы в зависимости от текущей и планируемой (прогнозируемой) нагрузки на различных этапах создания информационного продукта.

Финальным этапом существования МКСМ является утилизация объектов, входящих в её состав, в первую очередь МКА ДЗЗ. Осуществлена оценка эффективности применения средств увода с орбиты малых космических на базе системы показателей эффективности:

$$\bar{E}(\hat{T}, \hat{M}_{\text{СУ}}, \hat{W}_{\text{СУ}}, J_{\text{СУ}}, R_{\text{СУ}}, \hat{C}_{\text{СУ}}) \rightarrow \max, \quad (12)$$

где $\hat{T}$ – относительное время увода, определяемое как отношение времени увода ко времени баллистического существования МКА; $\hat{M}_{\text{СУ}}$ – относительная масса системы увода (СУ) с орбиты (отношение массы СУ к суммарной массе МКА); $\hat{W}_{\text{СУ}}$ – удельное энергопотребление СУ (отношение мощности, затрачиваемой на работу СУ к располагаемой мощности СЭП МКА); $J_{\text{СУ}}$ – обобщенный показатель технологичности системы, отражающий конструктивную сложность изготовления элементов и системы увода в целом (определяется экспертным путем); $R_{\text{СУ}}$ – обобщенный показатель надёжности, отражающий вероятность включения и безотказной работы СУ; $\hat{C}_{\text{СУ}}$ – относительная стоимость СУ, определяемая как отношение стоимости её создания к стоимости создания МКА в целом (в случае использования штатной ДУ в качестве средства увода учитывается только стоимость рабочего тела, необходимого для увода).

Разработана методика выбора варианта реализации СУ МКА с орбиты, базирующаяся на методе интегральной относительной оценки, являющегося одной из вариаций метода линейной свёртки. Апробация методики проведена на примере МКА «АИСТ-2Д», для чего сгенерированы опорный и десять альтернативных вариантов реализации СУ, включающие в себя функционирующие на различных физических принципах ДУ, а также пассивные варианты на базе аэродинамических систем (АС) и тросовых систем (ТС).

На рисунке 23 приведена гистограмма коэффициентов интегральной относительной оценки (КИО) рассмотренных альтернатив, полученных для следующего кортежа коэффициентов приоритета показателей эффективности СУ (12): $a_1 = 0,25, a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = a_6 = 0,15$.

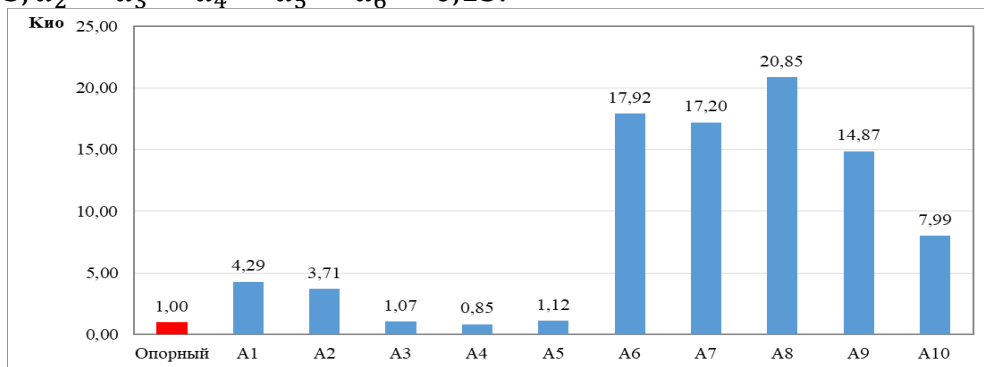


Рисунок 23 – Гистограмма КИО вариантов построения СУ МКА «АИСТ-2Д»

Анализ гистограммы показывает, что наиболее эффективным вариантом реализации СУ МКА «АИСТ-2Д» является вариант на базе твёрдотопливной двигательной установки (вариант А8) со временем увода с орбиты не более 9 ч.

Для устранения зависимости результатов оценки эффективности от значений коэффициентов приоритета, основанной в субъективности лица, осуществляющего их назначение, применен метод уверенных суждений (В. В. Малышев, С. А. Пиявский) и проведено сравнение полученных результатов работы методики.

Жёсткий рейтинг альтернативы – вероятность того, что при всех возможных равновероятных и независимых сочетаниях моделируемых мнений экспертов, альтернатива окажется наилучшей, определяется с помощью выражения:

$$HR_i = \frac{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^N B_{il}}{K}, \quad (13)$$

где $l = \overline{1K}$, $i = \overline{1N}$, N – число проектов/альтернатив, K – число вариантов реализации вектора коэффициентов линейной свёртки $\overline{a_l}$. $B_{il} = 1$ если при l -ом варианте моделируемого мнения i -ый проект оказался наилучшим.

Рассмотрено три варианта мнений ЛПР о взаимной приоритетности критериев (таблица 3): I – приоритет времени увода над всеми остальными параметрами; II – приоритет времени увода над потребляемой мощностью, приоритет технологичности и надёжности над стоимостью; III – приоритет массы над стоимостью, приоритет стоимости над мощностью, приоритет мощности над остальными критериями.

Таблица 3 – Результаты расчёта жёсткого рейтинга альтернатив

Ограничения I рода						
Альтернативы	A1	A2	A6	A7	A8	A9
HR	0,552978	0,311678	0,000773	0,127610	0,002320	0,004640
Ограничения II рода						
Альтернативы	A1	A2	A6	A7	A8	A9
HR	0,141925	0,010604	0,010604	0,829527	0,002447	0,004894
Ограничения III рода						
Альтернативы	A1	A2	A7	A8		
HR	0,727041	0,010204	0,260204	0,002551		

Добавление ограничений заметно снижает мощность множества. Так, ограничения I рода в рассматриваемом случае уменьшает количество комбинаций с 7156 до 1293, II рода – до 1226, III рода – до 392. Дальнейшее увеличение количества ограничений требует уменьшения шага для формирования множества с возрастанием вычислительных затрат. При этом метод уверенных суждений позволяет снизить влияние субъективных факторов на процесс многокритериальной оптимизации и заметно снизить трудозатраты на анализ предпочтений ЛПР, тем самым повышая эффективность процесса и возможность его автоматизации.

На основе применения двух методов к задаче оценки эффективности СУ сформулированы рекомендации по оснащению СУ МКА в зависимости от массы, типа системы ориентации и стабилизации, мощности СЭП (таблица 4).

Таблица 4 – Рекомендации по выбору СУ для низкоорбитальных МКА

Тип МКА	Масса, кг	Тип системы ориентации	Мощность СЭП, Вт	Рекомендуемый тип СУ
Наноспутники	1-10	Пассивная	5-10	АС / ТС
Микроспутники	10-100	Пассивная	10-15	ТС / АС
МКА	100-250	Активная	50-100	ДУ + АС
МКА	250-500	Пассивная	100-200	ДУ + АС
МКА	500-1000	Пассивная	250-450	ДУ + АС

Влияние цифровизации на этапы ЖЦ МКСМ рассмотрено на примере создания МКА на базе платформы «АИСТ-2». На рисунке 24 представлена диаграмма Ганта в укрупнённом виде создания МКА «АИСТ-2Д», а на рисунке 25 – нового МКА на базе УП «АИСТ-2» с ЦА сверхвысокого разрешения.

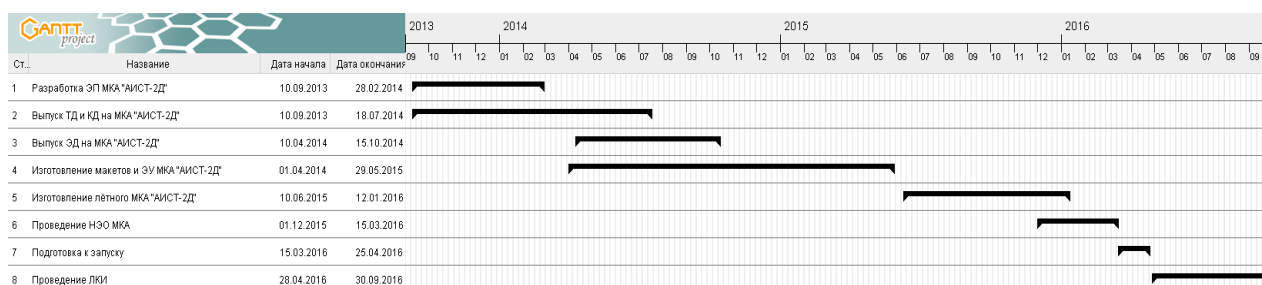


Рисунок 24 – Диаграмма Ганта создания МКА «АИСТ-2Д»



Рисунок 25 – Диаграмма Ганта создания нового МКА на базе УП «АИСТ-2»

Платформенный принцип создания МКА и использование алгоритма адаптации УП под требования ЦА, а также использование разработанного ПО совместно с БД обеспечивающих бортовых систем, позволяют сократить длительность этапа разработки до 8 мес. При этом наибольший выигрыш по времени (2 мес.) приходится на этап начального проектирования. За счёт роботизации технологических процессов сборки МКА, а также автоматизации процессов контроля хода изготовления элементов его конструкции возможно сокращение длительности этапа производства с 17 мес. до 12 мес. Цифровизация испытаний, оптимизация их объёмов, а также перевод части НЭО в виртуальный вид позволяют сократить её длительность с 4 мес. до 1,5 мес. Использование УП для нового МКА и результаты отработки МКА ДЗЗ «АИСТ-2Д» позволяют также существенно сократить этапы подготовки к запуску и проведения ЛКИ (суммарно с 7 мес. до 4 мес.).

На рисунке 26 приведён комплекс решений цифровизации этапов ЖЦ МКСМ, разработанный в рамках настоящего диссертационного исследования.



Рисунок 26 – Комплекс решений для цифровизации процессов создания МКСМ Земли на базе МКА

Цифровизация процессов создания МКСМ – основной инструмент сокращения сроков создания подобных систем в Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее диссертационное исследование является первой попыткой рассмотрения, всестороннего анализа и обобщения на системном уровне методологических подходов к цифровизации процессов создания объекта нового типа – многоспутниковой космической системы мониторинга на базе малых космических аппаратов – на всех этапах его жизненного цикла, а также последовавшая за этим разработка новых подходов для тех этапов, которым ранее не уделялось достаточного внимания исследователей, а именно этапов производства (серийного) аппаратов для МКСМ, экспериментальной отработки (наземной и лётной) и утилизации после окончания срока активного функционирования.

Таким образом, основным результатом проведённого исследования является достижение поставленной цели – сокращение сроков создания многоспутниковых космических систем мониторинга путём систематизации имеющихся и выработки новых научно-методологических практико-ориентированных подходов к цифровизации всех этапов жизненного цикла подобных систем.

Для достижения поставленной цели решены следующие научно-технические задачи и получены результаты:

1. Проведён системный анализ, в том числе на основе статистических данных космических аппаратов и систем, решающих задачи мониторинга земной поверхности, позволивший сформировать ЖЦ МКСМ в виде W-модели, включающий восемь основных этапов. Осуществлена формализация требований к МКСМ исходя из целевых задач. Разработана структурно-параметрическая модель МКСМ и предложены постановки задачи синтеза её проектных параметров.

2. На основе системы взаимоувязанных математических моделей создан программный инструментарий, обеспечивающий информационную поддержку процесса проектирования МКА ДЗЗ и МКСМ на их базе. Сформирован алгоритм адаптации УП под требования ЦА МКА и продемонстрирована его работа на примере платформы МКА ДЗЗ «АИСТ-2».

На примере моделирования функционирования МКСМ «SkySat» проведён анализ влияния выхода из строя МКА на показатели эффективности системы, позволивший определить рекомендуемое число резервных аппаратов в МКСМ – не менее 15% от общего числа МКА.

3. Разработаны структурная модель и принципы организации цифровой производственной системы, обеспечивающей серийное производство МКА для многоспутниковых группировок.

Разработана модель производственной системы матричного типа. Для оптимизации параметров производительности, пропускной способности и длительности производственного цикла разработана методика построения имитационной модели производственного процесса.

4. Определены направления и инструменты цифровизации экспериментальной отработки МКА, функционирующих в составе МКСМ, обеспечивающих оптимизацию её объёмов, а также предложена интегральная схема цифровизации экспериментальной отработки.

5. Разработаны архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления МКСМ, в том числе на базе данных ТМИ.

Выполнен анализ методов восстановления данных и детектирования статистических выбросов в телеметрических измерениях МКА, функционирующих в составе МКСМ, для автоматизации процесса обработки данных ТМИ.

6. Разработаны цифровые технологии и сервисы распространения материалов космической съёмки на основе облачных технологий.

На базе разработанной технологии сформирована схема распространения материалов космической съёмки, которая предусматривает совместное использование данных ДЗЗ, получаемых с КА, производимых ГК «Роскосмос», а также МКА, создаваемых в рамках проектов по созданию МКСМ, в том числе коммерческими компаниями (схема разработана на примере МКА «АИСТ-2Д»).

В качестве веб-интерфейса разработано программное мобильное приложение для предоставления доступа к данным ДЗЗ.

7. Разработана методика и программно реализован алгоритм для оценки эффективности применения средств увода с орбиты МКА после окончания срока их активного функционирования в составе МКСМ. Для решения этой задачи применены метод относительной интегральной оценки и метод уверенных суждений. Сформулированы рекомендации по оснащению МКА СУ с орбиты для реализации финального этапа жизненного цикла МКСМ – утилизации.

Результаты цифровизации основных этапов жизненного цикла МКСМ Земли продемонстрированы на примере диаграммы Ганта создания МКА на базе УП «АИСТ-2». Показано, что за счёт цифровизации этапов ЖЦ МКА ДЗЗ типа «АИСТ-2Д» возможно сокращение сроков его проектирования, изготовления и отработки более чем в 1,5 раза – с 36 мес. до 23 мес.

Практическая значимость работы состоит в разработке и апробации новых проектно-конструкторских, технических, технологических, информационных и управленческих решений, обеспечивающих поддержку процесса создания МКСМ на базе МКА на всех этапах ЖЦ. Результаты работы нашли своё практическое применение при проектировании, изготовлении, наземной экспериментальной отработке и эксплуатации МКА серии «АИСТ». Разработанные методические подходы прошли успешную апробацию под научным руководством автора в рамках деятельности наземного комплекса управления МКА серии «АИСТ», а также экспериментальной киберфизической фабрики («цифрового завод») МКА ДЗЗ, созданных по инициативе соискателя в Самарском университете.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК:

1. **Ткаченко И.С., Куренков В.И.** Направления цифровизации и оптимизации объёмов наземной экспериментальной отработки малых космических аппаратов, функционирующих в составе многоспутниковых космических систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2025. № 3. С. 44-53.
2. **Ткаченко И.С., Иванушкин М.А.** Архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления перспективными многоспутниковыми системами на базе данных телеметрических измерений // Авиакосмическое приборостроение. 2025. №3. С. 3-14.
3. **Ткаченко И.С.** Методические подходы к созданию и функционированию серийного роботизированного производства малых космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 3. С. 178-194.
4. **Ткаченко И. С., Антипов Д. В.** Концептуальная модель цифрового завода серийного производства малых космических аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 331-337.

5. **Ткаченко И.С., Сафронов С.Л., Коровин М.Д. и др.** Информационная система поддержки предварительного проектирования малых космических аппаратов // *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №1(47). С.75-89.
6. **Ткаченко И.С.** Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов // *Онтология проектирования*. 2021. Т. 11, №4(42). С.479-501.
7. **Иванушкин М.А., Салмин В.В., Ткаченко С.И., Ткаченко И.С. и др.** Разработка способов обеспечения энергетического баланса при работе целевой аппаратуры малых космических аппаратов серии «АИСТ» в условиях энергетических ограничений // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018. Т. 17, № 4. С. 57-66.
8. **Волгин С.С., Салмин В.В., Ткаченко С.И., Ткаченко И.С., Иванушкин М.А.** Уточнение алгоритмов восстановления работоспособного состояния малых космических аппаратов «АИСТ» на основе телеметрической информации // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018. Т. 17, № 3. С. 36-43.
9. **Ткаченко И.С., Кауров И. В.** Интегральная оценка эффективности космической системы орбитальной инспекции на базе малых космических аппаратов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2013. № 1 (39). С. 91-100.
10. **Волоцунев В.В., Ткаченко И.С. и др.** Выбор проектных параметров универсальных платформ малых космических аппаратов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. № 2 (33). С. 35-47.

Статьи в рецензируемых изданиях из перечня МРБД:

1. **Жалдыбина О.Д., Коровин М.Д., Иванушкин М.А., Ткаченко И.С.** Алгоритм определения проектных параметров малого космического аппарата с радиолокационной съёмочной аппаратурой на начальных этапах проектирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. № 21(5). С. 63-74.
2. **Иванушкин М.А., Ткаченко И.С.** Оценка эффективности многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. № 20(4). С. 101-110.

Статьи в журналах, индексируемых в иностранных библиографических и реферативных базах данных (SCOPUS, Web Of Science):

1. **Akhmetov R., Filatov A., Khalilov A., Raube S., Borisov M., Salmin V., Tkachenko I. and etc.** “AIST-2D”: Results of flight tests and application of earth remote sensing data for solving thematic problems // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2023, Vol. 26, Issue 3, pp. 427-454.
2. **Starinova O. L., Tkachenko I. S., Khabibullin R. M. and etc.** Algorithms of the control programs formation for the Earth remote sensing spacecraft // *IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2023, Vol. 1, 2 p.
3. **Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V., Tkachenko I., Yuzifovich Y., Nikonorov A., Skidanov R., Kazanskiy N., Soifer V. and etc.** First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens // *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Issue 9 (2230).
4. **Krestina A.V., Tkachenko I.S.** Efficiency assessment of the deorbiting systems for small satellite // *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 2022, Vol. 54, № 2, pp. 227 – 240.
5. **Ivanushkin M., Tkachenko I., Krestina A.** Design methodology for a multi-satellite global continuous observation system of the Earth // *8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2022, Vol. 1, 2 p.
6. **Salmin V.V., Kurenkov V.I., Safronov S.L., Tkachenko I.S., Yakischik A.A. and etc.** Determination of the main design parameters of cost-effective remote sensing satellite

systems at the stage of preliminary design // ITNT 2020 Journal of Physics: Conference Series, 2021, Vol. 1745, Issue 1.

7. *Safronov S.L., Tkachenko I.S., Volgin S.S.* Solution of the problem of remote sensing small spacecraft onboard equipment integration through mathematical and simulation modeling of its operation // Journal of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1096, Issue 1.

8. *Ivanushkin M.A., Volgin S.S., Kaurov, I.V., Tkachenko I.S.* Analysis of statistical methods for outlier detection in telemetry data arrays, obtained from "AIST" small satellites // Journal of Physics: Conf. Series, 2019, Vol. 1326, Issue 1.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и патенты на изобретения:

1. Способ автоматизированной сборки космических аппаратов: патент на изобретение № 2824224 от 06.08.2024 / *Ткаченко И.С., Михеев М.А., Звягинцев В.А. и др.*

2. Конструкция унифицированной космической платформы, ориентированной на автоматизированную сборку: патент на изобретение № 2825163 от 21.08.2024 / *Ткаченко И.С., Иванушкин М.А., Михеев М.А., Лысенко Ю.Д., Жалдыбина О.Д. и др.*

3. Маломассогабаритная космическая платформа: патент на полезную модель РФ № 213765 от 28.09.2022 / *Иванушкин М.А., Ткаченко И.С., Сафронов С.Л. и др.*

4. Космический аппарат дистанционного зондирования Земли: патент на полезную модель РФ № 198739 от 24.07.2020 / *Абрашкин В.И., Кирилин А.Н., Салмин В.В., Ткаченко И.С., Сафронов С.Л. и др.*

5. Программа Constellation modeler (ConMod) для моделирования целевого функционирования космической системы мониторинга: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614620 от 03.03.2023 / *Салмин В.В., Куренков В.И., Иванушкин М.А., Ткаченко И.С., Сафронов С.Л. и др.*

6. Программа RUSSIAN SPACE SYSTEM DEVELOPER (RSSD) для моделирования целевого функционирования и оценки эффективности многоспутниковых космических систем различного назначения: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023612104 от 30.01.2023 / *Ткаченко И.С., Иванушкин М.А. и др.*

7. Программный комплекс для выбора проектных параметров космической системы мониторинга с учётом требований на ресурсы заказчика: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619035 от 10.08.2020 / *Салмин В.В., Куренков В.И., Ткаченко И.С., Якищук А.А., Иванушкин М.А. и др.*

8. База данных обеспечивающих бортовых систем и полезных нагрузок малых космических аппаратов различного целевого назначения: свидетельство о государственной регистрации базы данных №2022623241 от 05.12.2022 / *Сафронов С.Л., Ткаченко И.С., Иванушкин М.А., Коровин М.Д., Кауров И.В., Крестина А.В.*

Монографии:

1. *Сафронов С.Л., Ткаченко И.С., Иванушкин М.А., Волгин С.С.* Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ. Самара: Изд-во Самарского университета. 2019. 276 с.

2. *Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А. И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В.* Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2017. 324 с.

В других изданиях:

1. *Ткаченко И.С., Антипов Д.В., и др.* Концептуальная модель цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 3 (113). С. 90-106.

2. *Аншаков Г.П., Крестина А.В., Ткаченко И.С.* Анализ эффективности применения средств увода с орбиты малых космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2020. № 2 (32). С. 72-84.

3. *Ахметов Р.Н., Бакланов А.И., Космодемьянский Е.В., Ткаченко И.С., Салмин В.В. и др.* Основные проектные характеристики малых космических аппаратов научного и прикладного назначения на базе унифицированной платформы «АИСТ-2» // Космическая техника и технологии. 2020. №4 (31). С. 5-20.
4. *Ткаченко И.С.* База данных обеспечивающих бортовых систем и полезных нагрузок малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли как средство информационной поддержки процесса проектирования многоспутниковых орбитальных группировок // Тезисы докладов XXVII научной конференции «Системный анализ, управление и навигация». Изд-во: ООО "Буки Веди" – Москва. 2023. С.141-143.
5. *Иванушкин М.А., Ткаченко И.С.* Многоспутниковые группировки дистанционного зондирования Земли. Современное состояние и перспективы развития // Сборник тезисов XLV Академических чтений по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2021. Т.1. С. 65-69.
6. *Ткаченко И.С.* Анализ жизненного цикла многоспутниковых орбитальных группировок на базе малых космических аппаратов // Тезисы докладов XXV международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация». Изд-во: МАИ – Москва. 2021. С. 67-69.
7. *Аншаков Г.П., Салмин В.В., Куренков В.И., Ткаченко И.С. и др.* Проведение проектных исследований в обеспечение создания и отработки технологий сетевого взаимодействия многоуровневых космических группировок гибкого и оперативного мониторинга Земли с различными типами целевой аппаратуры // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Изд-во СамНЦ РАН – Самара. 2019. Т. 1. С. 32-34.
8. *Сафронов С.Л., Салмин В.В., Ткаченко И.С., Федосеев А.А. и др.* Разработка программного мобильного приложения для доступа к информации дистанционного зондирования Земли // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Изд-во СамНЦ РАН – Самара. 2019. Т. 1. С. 184-186.
9. *Сафронов С.Л., Ткаченко И.С.* Унификация бортовой аппаратуры при разработке малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Изд-во СамНЦ РАН – Самара. 2019. Т. 2. С. 294-296.
10. *Кирилин А.Н., Аншаков Г.П., Бакланов А.И., Салмин В.В., Ткаченко И.С. и др.* Формирование региональной космической системы оперативного мониторинга Земли в интересах решения задач картографии, развития сельского хозяйства и экологической безопасности на базе малых космических аппаратов серии "АИСТ" с широкозахватной целевой аппаратурой среднего разрешения // Материалы XV научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Калуга: Манускрипт. 2018. С. 36-39.