

МИХЕЕВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО
РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ ТИПА КУБСАТ**

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет)

Научный руководитель:

Антипов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Одинокоев Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт», кафедра «Управление инновациями», профессор;

Ларин Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «Региональный инжиниринговый центр», директор.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита состоится 24 июня 2026 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/resources/dis_protection/mikheev.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.05,
доктор технических наук, доцент

Я.А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная космическая отрасль переживает революцию, связанную с широким распространением малых космических аппаратов, и, в частности, наноспутников стандарта CUBESAT. Их компактность, относительно низкая стоимость разработки и запуска, а также короткие сроки создания открыли доступ к космосу университетам, исследовательским организациям и частным компаниям по всему миру. CUBESAT нашли применение в фундаментальных научных исследованиях, дистанционном зондировании Земли, технологическом экспериментировании, образовании и развитии коммерческих сервисов (например, IoT). Прогнозируется дальнейший значительный рост количества запусков наноспутников, формируя потребность в их серийном производстве.

Однако, существующая практика создания CUBESAT сталкивается с серьезными ограничениями, препятствующими масштабированию. Доминирование ручного труда на этапах сборки и тестирования делает процесс трудоемким, дорогостоящим и подверженным человеческим ошибкам. Отсутствие специализированных, высокоавтоматизированных производственных решений, адаптированных к микро-масштабам и специфике сборки космической электроники и механики, является ключевым технологическим барьером. Конструкции CUBESAT, как правило, не оптимизированы для автоматизации, что делает попытки роботизации фрагментарными и неэффективными.

Следовательно, **актуальность** диссертационной работы определяется тем, что существует острая необходимость в преодолении сложившегося противоречия между растущим рыночным спросом на массовое производство наноспутников и отсутствием адекватных, комплексных организационно-технологических решений по серийной роботизированной сборки аэрокосмической техники.

Современное состояние вопроса

Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов управления качеством и организации производства внесли российские и зарубежные ученые: Ю.П. Адлер, В.Н. Азаров, В.А. Барвинок, В.Я. Белобрагин, В.В. Бойцов, Б.В. Бойцов, В.А. Васильев, С.А. Васин, В.Г. Версан, Г.П. Воронин, В.Н. Козловский, Д.И. Панюков, О.В. Пантюхин, М.А. Полякова, Э. Деминг, О. Тайити, Дж. Джуран, Г. Тагути, К. Исикава, А. Фейгенбаум, Ф. Кросби и др. Вопросами организации цифровых, роботизированных производств занимались: Д.В. Антипов, И.С. Ткаченко, В.М. Глушков, Н.П. Бусленко, В.А. Лопатин, А.К. Платонов, А.Г. Братухин, В.В. Соловьев, Е.К. Савич и др.

Однако, большая часть исследований затрагивает вопросы цифровизации, оптимизации процессов изготовления продукции, внедрение инструментов бережливого производства. Вопросы проектирования продукции и процессов под возможности и ограничения роботизации, а также создания интеллектуальных роботизированных производственных ячеек рассмотрены не в достаточном объеме. При организации роботизированного производства необходимо учитывать отраслевую аэрокосмическую специфику, определяющую требования к продукции и производственным процессам.

Целью исследования является повышение производительности процессов производства малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT, за счет разработки, отработки и внедрения организационно-технологических решений серийного роботизированного производства.

Задачи исследования:

1. Провести теоретический анализ существующих подходов к организации серийного роботизированного производства малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT;

2. Разработать инструментарий проектирования конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки;

3. Разработать инструментарий организации интеллектуальной роботизированной производственной ячейки сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT;

4. Провести комплексную экспериментальную апробацию разработанных решений.

Объектом исследования является производственный процесс серийной роботизированной сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT.

Предметом исследования являются модели, методики, алгоритмы, производственно-технологические решения для создания технологических процессов серийного роботизированного производства малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT, включая адаптивное проектирование продукции и интеллектуальные роботизированные производственные ячейки.

Методы исследования: математическое и структурно-функциональное моделирование процессов организации роботизированного производства, экспертные методы оценки организационно-технологических рисков, методы стандартизации производственных процессов, конструкторско-технологические методы проектирования аэрокосмической продукции под возможности и ограничения роботизированного производства, а также экспериментальные исследования с целью проверки адекватности теоретических предположений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в создании научно-практического инструментария разработки и внедрения организационно-технологических решений серийного роботизированного производства малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT. Элементами научной новизны являются:

1. Методика оценки технологичности конструкции малых космических аппаратов nano класса под возможности роботизированной сборки, включающая усовершенствованный алгоритм оценки технологичности конструкции под возможности роботизации, отличающаяся от существующих тем, что разработаны новые критерии оценки технологичности конструкции для малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT с учетом особенностей при серийной роботизированной сборке (23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами, паспорта специальности 2.5.22)

2. Свод требований и ограничений (классификатор) к конструкциям малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT, адаптированных под роботизированную сборку, отличающийся от существующих новыми группами конструктивных, технологических требований и ограничений к конструкции, а так же требований и ограничений к технологическим операциям (5. Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством, паспорта специальности 2.5.22).

3. Методика проектирования интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, являющаяся частью общего процесса организации производства, отличающаяся от существующих созданием цифрового двойника ячейки для отработки рациональных технологических решений и написание управляющих программ для робототехнического оборудования (17. Разработка и научно-практическое развитие инструментов бережливого производства, синхронизации в производственных системах, оптимизации процессов и рабочих мест, паспорта специальности 2.5.22).

4 Структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, включающая разработанную организационную структуру команды проекта по созданию интеллектуальных роботизированных производственных ячеек и отличающаяся от существующих действиями, являющимися отличительными особенностями роботизированного производства ракетно-космической техники (17. Разработка и научно-практическое развитие инструментов бережливого производства, синхронизации в производственных системах, оптимизации процессов и рабочих мест, паспорта специальности 2.5.22).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в развитии научных основ организации роботизированных сборочных производств аэрокосмической техники, создании интеллектуальных роботизированных ячеек, а также совершенствовании инструментария проектирования продукции и процессов под возможности и ограничения роботизированного производства аэрокосмической техники.

Практическая значимость работы заключается в разработке инструментария проектирования малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности и ограничения роботизированного производства, а также разработке инструментария организации интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, представляющего собой стандартизованное руководство для предприятий аэрокосмической отрасли.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки технологичности конструкции малых космических аппаратов nano класса под возможности роботизированной сборки;
2. Свод требований и ограничений к конструкции малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT и требований и ограничений к выполнению технологических операций по сборке;
3. Методика проектирования интеллектуальных роботизированных ячеек, включающая разработку планировочных решений;
4. Структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальных роботизированных ячеек.
5. Результаты апробации разработанного инструментария организации серийного роботизированного производства.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, в том числе: XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева.; XI Международной научно-практической конференции творческой молодежи "Актуальные проблемы авиации и космонавтики", 2025г; Совместной III Отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» и VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения»), 2024г; VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных "Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований", 2024г; Всероссийской очной научно-практической конференции «Траектории взаимодействия в развитии цифровых навыков», 2021г.

Публикации по теме диссертации. Содержание диссертационной работы отражено в 13 работах, из них 6 работ опубликовано в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; получено 4 патента на изобретения и полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 183 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 61 таблицу; список литературы включает 79 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, определен объект и предмет исследования, указана научная новизна положений, выдвигаемых на защиту, а также практическая ценность и достоверность полученных результатов.

В первой главе представлен теоретический анализ существующих подходов к организации и управлению роботизированным производством малых космических аппаратов нанокласса типа CUBESAT.

Эволюция космической техники от уникальных, дорогостоящих и долгосрочных проектов к доступным, быстрым и массовым решениям привела к формированию отдельного высокодинамичного сегмента — малых космических аппаратов нано класса (МКА НК). Если классические аэрокосмические изделия (спутники связи, телескопы, межпланетные станции) характеризуются многолетними циклами разработки, массой в сотни и тысячи килограммов, а также бюджетами в сотни миллионов долларов, то их малые аналоги совершили революцию в подходах к освоению космоса.

Проведенный анализ показал, что традиционный процесс сборки CUBESAT включает четыре ключевых этапа: подготовка компонентов, механическая сборка, интеграция подсистем и финальные испытания. Наиболее проблемными этапами являются пайка микросхем (12-15% дефектов), крепление солнечных панелей (8-10%) и монтаж антенн (5-7%). Эти операции в значительной степени зависят от ручного труда, что приводит к высокой вариативности качества.

Сравнение ручной сборки с роботизированными прототипами выявило существенные преимущества автоматизации: точность монтажа повышается с ± 0.2 мм до ± 0.05 мм, время полной сборки сокращается с 300-400 до 120-180 часов, а себестоимость снижается с 9-12 млн. до 6-8,5 млн. за аппарат.

Так же, по результатам анализа 37 промышленных кейсов были выделены пять ключевых проблемных зон:

- 1) Зависимость от ручного труда (82% операций).
- 2) Низкая воспроизводимость (разброс параметров до 15%).
- 3) Ограниченная технологичность конструкции.
- 4) Длительные циклы сборки.
- 5) Риски контроля качества (27% дефектов обнаруживаются на орбите).

Анализ сборки типовых конструкций CUBESAT выявил ключевые недостатки, критически влияющих на надёжность, трудоёмкость и сроки: ручная пайка (основной источник риска для надёжности - увеличивает трудоёмкость на 40–50 ч/аппарат и длительность цикла монтажа электроники на 60–70%); нестандартные интерфейсы (создают механические риски и повышают общую трудоёмкость на 15–20%, а время переналадки — до 8–12 ч).

Аудит производственного процесса показал, что до 45% общей трудоёмкости сборки аппарата составляют ручные операции, требующие высокой квалификации исполнителей. При этом 23% отказов на орбите напрямую коррелируют с ошибками, допущенными на этих ручных этапах. Такая зависимость делает традиционные методы технологически несостоятельными для перехода к серийному производству, поскольку они не обеспечивают необходимой повторяемости, предсказуемости и контроля качества.

Проведенный анализ показал, что интеллектуальные роботизированные производственные ячейки (ИРПЯ) могут обеспечить снижение времени переналадки с 2-

5 дней до 1-4 часов, повысить гибкость за счет применения цифровых двойников и увеличить производительность с 20-30 до 80-120 аппаратов в год, тем самым перейти на серийные подходы к выпуску продукции.

В выводе первого раздела обобщается, что традиционные организационно-технологические методы сборки CUBESAT достигли предела своей эффективности. Доказывается, что для перехода к серийному производству необходим комплексный подход, включающий перепроектирование конструкций CUBESAT с учетом требований автоматизации и цифровизации, разработку специализированных интеллектуальных робототехнических комплексов, реорганизацию производственных участков и подготовку кадров.

Во второй главе разрабатывается инструментарий для проектирования конструкций малых космических аппаратов типа CUBESAT, адаптированных к серийной роботизированной сборке.

Основой разработанного инструментария стала методика оценки технологичности. Это методика, которая включает в себя усовершенствованный алгоритм оценки технологичности конструкции под возможности роботизации, отличающаяся от существующих тем, что разработаны новые критерии оценки технологичности конструкции для малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT с учетом особенностей при серийной роботизированной сборке, состоящая из 8 коэффициентов, а именно и представлена на рисунке 1.

- коэффициент унификации компонентов (K1) рассчитывается по формуле (1),

$$K_{\text{униф}} = \frac{N_{\text{ст}}}{N_{\text{общ}}} \times 100 \quad (1)$$

где $N_{\text{ст}}$ – фактическая доля стандартных компонентов, $N_{\text{общ}}$ – общее количество компонентов, а 85% – целевой норматив, установленный на основе анализа лучших практик роботизированной сборки CUBESAT;

- коэффициент стандартных крепежных элементов (K2) характеризует долю стандартизированных крепежных элементов в общем количестве крепежа, используемого в конструкции CubeSat. Расчет выполняется по формуле, аналогичной коэффициенту унификации компонентов, но сфокусированной исключительно на крепежных элементах;

- коэффициент модульности (K3), отражает приспособленность конструкции к замене функциональных блоков без разборки всего аппарата. Оценивается через среднее время замены модуля, где $N_{\text{мод}}$ – фактическое время замены модуля в минутах, а 15 минут – нормативное значение, признанное достаточным для эффективной автоматизированной сборки и ремонта.

- коэффициент доступности зон монтажа (K4) характеризует отсутствие «слепых» зон, недоступных для роботизированного инструмента. Расчет выполняется по бинарному принципу;

- коэффициент точности позиционирования компонентов (K5) оценивает, насколько фактические допуски на установку компонентов соответствуют возможностям роботов, где $\Delta_{\text{поз}}$ – фактический допуск позиционирования (в мм), а 0,05 мм – целевое значение, определенное по характеристикам коллаборативных роботов;

- коэффициент ROI (K6) отражает экономическую целесообразность внедрения ИРПЯ для данной конструкции. Рассчитывается как отношение ожидаемой экономии к капитальным затратам, выраженное в процентах за три года, где ROI_факт – фактический возврат на инвестиции (в процентах), а 120% – минимальный приемлемый уровень окупаемости для проектов роботизации в космической отрасли;

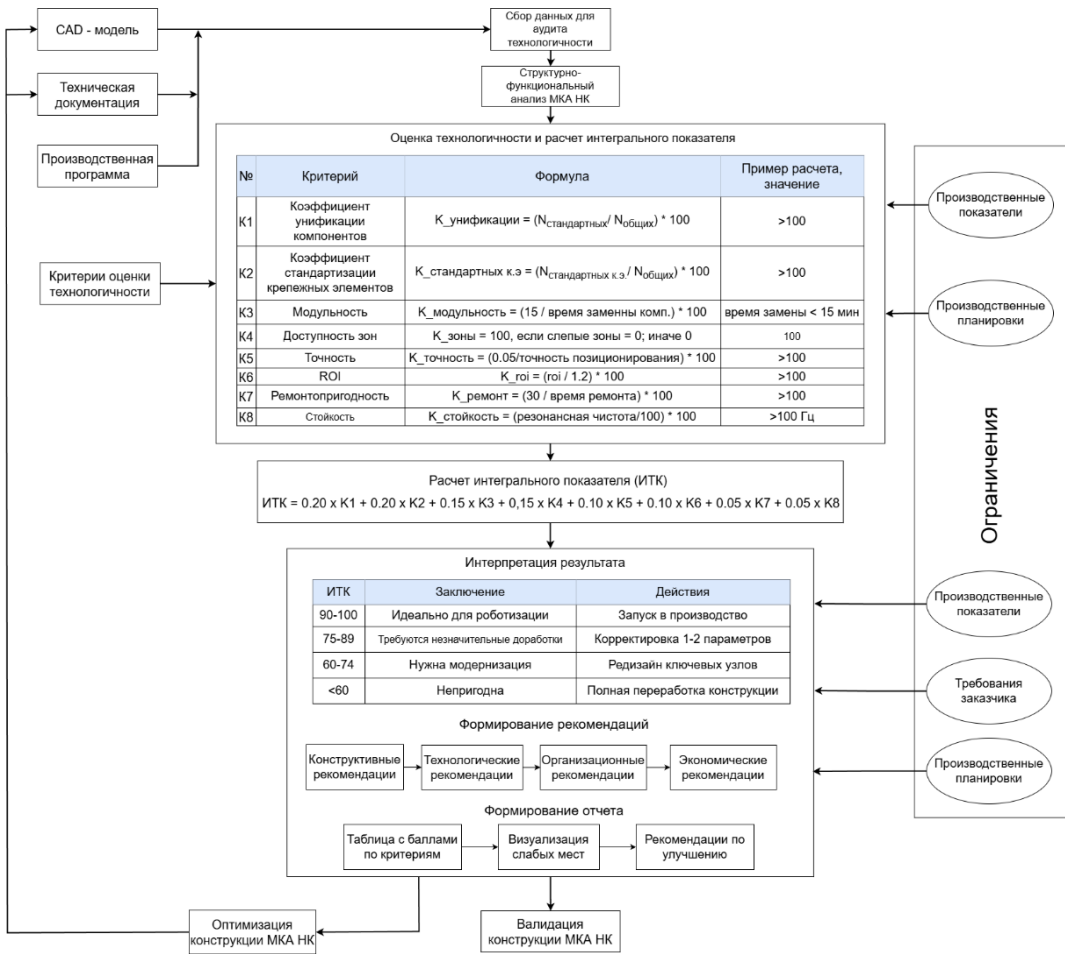


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма оценки технологичности конструкции МКА НК типа CUBESAT

- коэффициент ремонтнопригодности (K7) характеризует скорость выявления и устранения неисправностей. Оценивается через среднее время диагностики и замены неисправного элемента, где $T_{\text{диаг}}$ – фактическое время диагностики (в минутах), а 30 минут – норматив, установленный для роботизированных сборочных производств;

- коэффициент стойкости к внешним воздействиям (K8) оценивает способность конструкции выдерживать вибрационные и динамические нагрузки, характерные для выведения на орбиту, где $f_{\text{рез}}$ – минимальная собственная частота конструкции (в Гц), а 100 Гц – норматив, определенный стандартами NASA (GEVS) и ECSS.

На их основе был разработан интегральный показатель технологичности конструкции (ИТК).

Формула (2) для расчета интегрального показателя:

$$\text{ИТК} = 0.2K1 + 0.2K2 + 0.15K3 + 0.15K4 + 0.10K5 + 0.10K6 + 0.05K7 + 0.05K8 \quad (2)$$

Коэффициенты весомости назначены экспертным методом и характерны для объекта исследования. Так же были установлены пороговые значения ИТК: ≥ 80 баллов – конструкция пригодна для роботизации, < 60 баллов – требуется полная переработка.

На основе интегрального показателя технологичности (ИТК) формируется следующая шкала оценок и рекомендуемых действий.

Далее был разработан полный алгоритм оценки, состоящий из действий от сбора входных данных (CAD-модели, документация) до формирования отчета с рекомендациями. Для наглядности и систематизации этого процесса была разработана структурная схема методики (рисунок 1).

На основе выявленных проблем (нестандартные интерфейсы, "слепые" зоны) были сформулированы рекомендации по повышению технологичности. Они включают в себя стандартизацию крепежа, внедрение модульной архитектуры, использование цифровых двойников и оптимизацию материалов. Практическое внедрение позволяет сократить время сборки 12U CUBESAT с 300 до 100 часов, а себестоимость – с 120 млн. руб. до 65 млн. руб. (на 49%).

Для демонстрации практической адаптации конструкции был проведен анализ на примере российского МКА «АИСТ-СТ». Были предложены конкретные решения: переход к несущим панелям, унификация крепежа, разработка базовых плат для замены кабельной сети и создание специализированной оснастки для роботизированной сборки.

Далее, в диссертационном исследовании был разработан свод требований и ограничений к конструкциям, адаптированных под возможности роботизированной сборки и требования, ограничения к технологическим процессам, применяемых при роботизированной сборке МКА НК типа CUBESAT (рисунок 2).

Роботизированная операция	Требования	Ограничения
Захват и транспортировка вакуумным устройством	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стабильность потока сжатого воздуха для создания требуемого значения разрежения (не менее 5 кПа); 2. Контроль за уровнем вакуума; 3. Высокая шероховатость поверхности в месте захвата компонента (не выше Rz 20); 4. Поверхность, для захвата компонента, а также диаметр и количество вакуумных присосок должны соответствовать массе перемещаемого объекта. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Невозможность использовать устройства с пористыми материалами; 2. Утечки воздуха при захвате шероховатых объектов (не более 10%); 3. Предел по массе захватываемых объектов (не более 20 кг); 4. Невозможность точного базирования переносимого объекта относительно робота (отклонение не менее 1 мм).
Захват и транспортировка магнитным устройством	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ферромагнитный материал детали; 2 Магнитная сила, соответствующая или превышающая массу детали. (не более 20 кг) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Только для магнитных материалов; 2. Высокий риск притягивания посторонних компонентов оснастки, изделия.
Захват и транспортировка	<ol style="list-style-type: none"> 1. Соответствие захватывающих губок геометрии детали; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничение по диапазону захватываемых размеров (размер пальцев

Рисунок 2 - Фрагмент свода требований и ограничений к конструкции и технологическим процессам.

Данная классификация служит практическим инструментом для системного проектирования конструкции МКА и интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, где каждое требование коррелирует с конкретным ограничением, что позволяет находить оптимальные инженерные компромиссы на ранних этапах разработки. В рамках диссертационной работы разработан проект СТО.

В третьей главе были разработаны решения по созданию инструментария для организации интеллектуальных роботизированных производственных ячеек (ИРПЯ) для высокоточной сборки CUBESAT. Была разработана методика организации ИРПЯ, базирующейся на пяти ключевых принципах: конструктивно-технологическая преемственность, модульность и гибкость, интеллектуальность на всех уровнях, беспрецедентная точность и интеграция с системами верхнего уровня (MES).

Был определен минимальный состав ИРПЯ, для выполнения сборочных операций МКА НК типа CUBESAT, включающий роботизированное оборудование, систему технического зрения, транспортную систему, контрольно-измерительное оборудование, комплексное программное обеспечение. Для организации таких ячеек в первую очередь был разработан алгоритм проектирования ИРПЯ, состоящий из 16 последовательных шагов: от определения целей ячейки и анализа узких мест процесса до создания технической документации. Фрагмент алгоритма представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Фрагмент алгоритма проектирования ИРПЯ

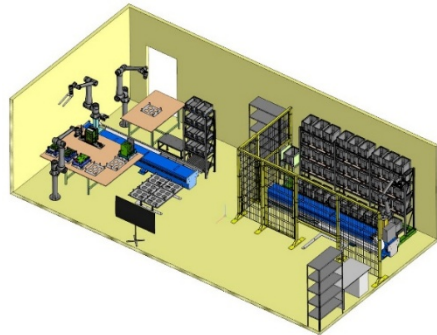


Рисунок 4 – Проект интеллектуальной роботизированной производственной ячейки сборки МКА НК

Результатом его применения стала спроектированная ИРПЯ сборки малого космического аппарата nano класса типа CUBESAT «АИСТ-СТ», адаптированного под роботизированную сборку (рисунок 4). Ключевым аспектом, определяющим эффективность ИРПЯ, является оснастка. Для нее был разработан алгоритм проектирования средств технологического оснащения (СТО), ориентированный на быструю переналадку (SMED). Алгоритм включает подбор модульных компонентов, использование стандартизированных интерфейсов и интеграцию с цифровым двойником для симуляции процессов. Это позволяет сократить время переналадки с 4 часов до 1.5 часов.

Далее была сформирована целевая функция (формула 3), основанная на минимизации трудоемкости выполнения операций за счет внедрения ИРПЯ.

$$\Delta T_i = t_{шти}^p - t_{шти}^{ирпя} \cdot k_{набл} - \Delta t_{обсл} - \Delta t_{упр} , \quad (3)$$

где, $t_{шти}^p$ – исходные затраты, $t_{шти}^{ирпя} \cdot k_{набл}$ – новые затраты непосредственного труда и $\Delta t_{обсл}$, $\Delta t_{упр}$ – изменения в сопутствующих трудозатратах. Например, трудоёмкость обслуживания отражается затратами труда на ремонт, переналадку и техническое обслуживание ИРПЯ и рассчитывается по формуле 3.

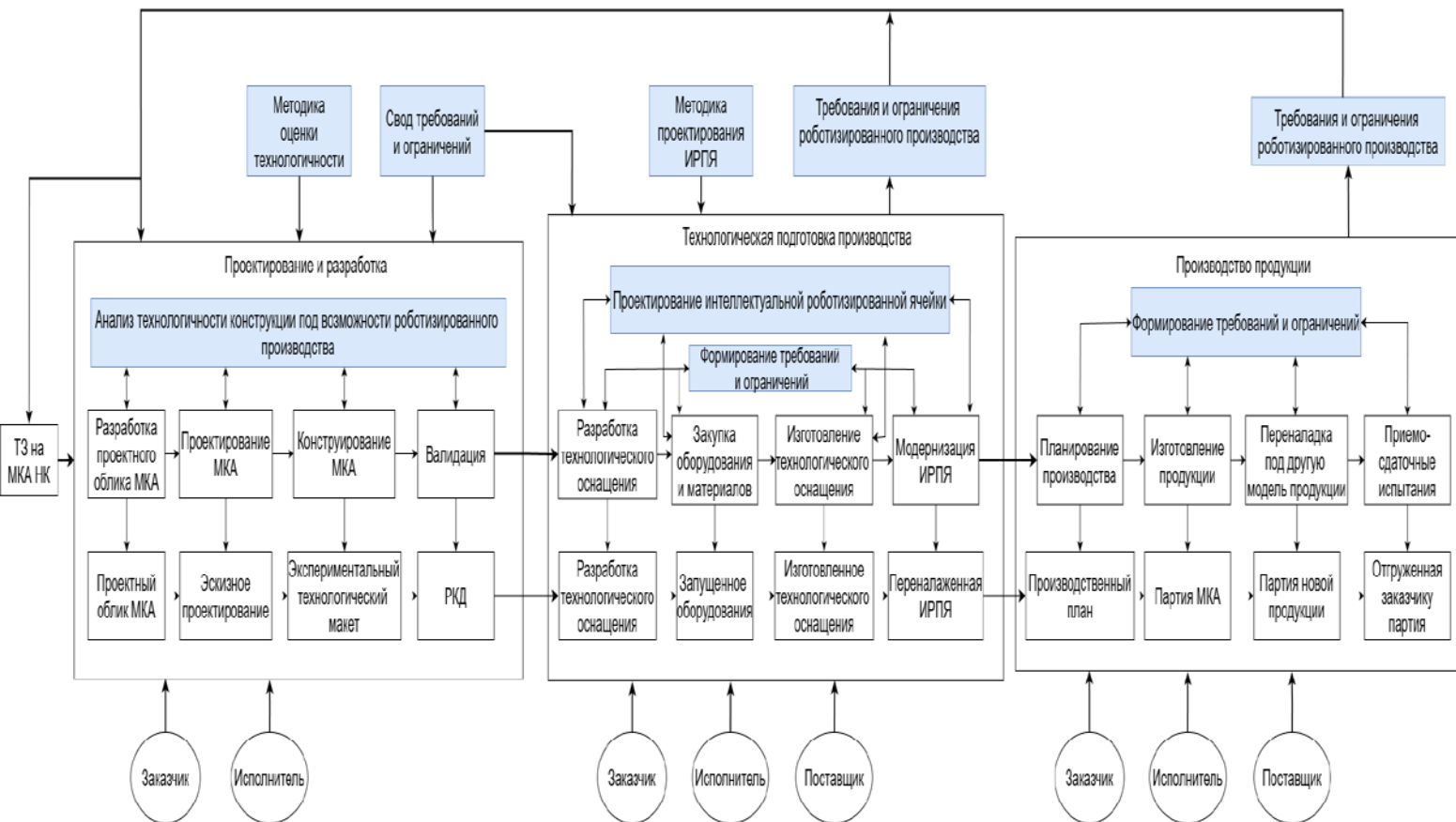


Рисунок 5 – Структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки

$$T_{\text{обсл}}(\mathbf{x}) = \frac{Q}{60} \sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{t_{\text{рем}i} \cdot \lambda_i \cdot T_{\text{год}}}{T_{\text{раб}i}} + \frac{t_{\text{нал}i} \cdot n_{\text{пер}i}}{60} \right) [\text{чел-ч/год}] \quad (3)$$

где Q - годовая программа выпуска изделий, n - общее количество операций в технологическом процессе, xi - индикатор автоматизации: 1, если операция i выполняется ИРПЯ; 0 - если вручную, $t_{\text{рем}i}$ - среднее время одного ремонта (устранения отказа) для ИРПЯ на операции, λ_i - интенсивность отказов оборудования (среднее число отказов в единицу времени), $T_{\text{год}}$ - годовой фонд времени работы оборудования, $T_{\text{раб}i}$ - наработка на отказ (среднее время между отказами), $t_{\text{нал}i}$ - время одной переналадки ИРПЯ (включая замену инструмента, загрузку новой программы и т.п.), $n_{\text{пер}i}$ - количество переналадок в год.

Применение общей целевой функции позволяет непосредственно оценивать эффект от внедрения интеллектуальных производственных ячеек в терминах экономии живого труда, учитывать все составляющие трудозатрат (технологические, обслуживание, управление), адаптировать модель к особенностям интеллектуального оборудования (снижение времени наблюдения, ускорение переналадок, автоматизация контроля) и принимать обоснованные решения о целесообразном уровне роботизации при заданных бюджетных ограничениях.

Для систематизации подхода так же была разработана классификация переналаживаемой оснастки по пяти признакам: тип оснастки, степень автоматизации переналадки, назначение, уровень стандартизации и тип интерфейса.

Для организации производства была разработана структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, обеспечивающих быструю переналадку и кастомизацию производственных участков (рисунок 5). Модель описывает взаимодействие элементов ИРПЯ, последовательность действий при переналадке и критерии эффективности.

Так же была разработана структура проектной команды и описано взаимодействия сотрудников этой команды между собой. Данная схема представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Схема проектной команды

В результате в третьей главе был разработан комплексный инструментарий организации ИРПЯ для сборки CUBESAT, включая методiku, алгоритмы проектирования ИРПЯ и структурно-функциональную модель функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки.

Четвертая глава представляет собой практическую апробацию и внедрение разработанных инструментов. На базе лабораторного комплекса «Киберфизической фабрики производства малых космических аппаратов» была реализована концепция матричного производства, состоящая из 7 специализированных участков, образующих замкнутый производственный цикл (таблица 1).

Таблица 1 - Перечень участков концептуального роботизированного интеллектуального производства МКА НК типа CUBESAT

№	Название участка
1.	Участок входного контроля компонентов
2.	Участок аддитивного изготовления и механической обработки.
3.	Участок контроля геометрии
4.	Участок контроля и подготовки компонентов
5.	Участок автоматизированной роботизированной сборки
6.	Участок испытаний
7.	Зона упаковки и хранения

Была разработана технологическая планировка всего производства, определяющая расположение и взаимосвязи всех участков: входного контроля, аддитивного изготовления и механической обработки, контроля геометрии, подготовки компонентов, автоматизированной сборки, испытаний, упаковки и хранения (рисунок 7).

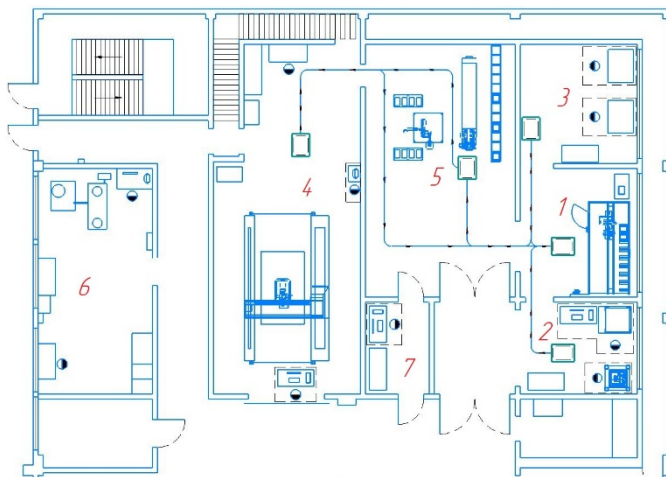


Рисунок 7 – Планировка автоматизированного роботизированного производства

Для каждого участка был подобран и определен перечень технологического оборудования с детальными техническими характеристиками, обеспечивающими требуемые параметры точности и производительности. Среди ключевых единиц оборудования: роботы, линейные оси, система сменного инструмента, автоматизированное заворачивающее устройство, 3D-принтер, ЧПУ-станок, координатно-измерительная машина (КИМ), вибростенд, климатические и вакуумные камеры, а также

автоматизированные мобильные роботы (AMR) для транспортировки комплектующих между участками.

На созданном функциональном прототипе ИРПЯ успешно выполнены ключевые операции сборки типового CUBESAT.

Достигнута точность позиционирования в пределах ± 20 мкм и повторяемость операций на уровне 99.5%.

Сравнительный анализ показал, что внедрение технологии при серийности от 50 шт./год позволяет снизить себестоимость сборки до 40% и сократить время цикла сборки в 2-3 раза по сравнению с ручными методами.

Экспериментальная апробация подтвердила эффективность разработанных решений: достигнута высокая точность сборки, сокращены время и стоимость производства, что доказывает готовность технологии к серийному внедрению.

В заключении изложены основные результаты и выводы исследования, подтверждающие положения, выносимые на защиту, определены перспективы дальнейшего изучения проблемы.

Основные результаты и выводы

В результате проведенного исследования решена важная научная задача, направленная на повышение производительности процессов производства малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT, и достигнута цель диссертационного исследования за счет разработки, отработки и внедрения организационно-технологических решений серийного роботизированного производства.

Основные результаты:

1. Разработана методика оценки технологичности конструкции малых космических аппаратов nano класса под возможности роботизированной сборки, включающая в себя усовершенствованный алгоритм оценки технологичности конструкции под возможности роботизации, отличающаяся от существующих тем, что разработаны новые критерии оценки технологичности конструкции для малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT с учетом особенностей при серийной роботизированной сборки. Существующие технологии сборки CUBESAT достигли предела эффективности. Дальнейшее развитие индустрии требует перехода к роботизированному производству, что невозможно без перепроектирования конструкции аппаратов и реорганизации производственных процессов. Апробация показала снижение себестоимости сборки на **25-30%** и сокращение трудоемкости операций на **40-60%**. Это напрямую повышает экономическую эффективность производства малых космических аппаратов, делая их более доступными;

2. Разработан свод требований и ограничений (классификатор) к конструкции малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT, адаптированного под роботизированную сборку, отличающийся от существующих новыми группами конструктивных, технологических требований и ограничений к конструкции, а также требований и ограничений к технологическим операциям. Внедрение данных требований и ограничений позволяют создать конструкцию CUBESAT, адаптированную для роботизированных процессов производства, что является необходимым условием для последующей автоматизации процессов сборки и снижения трудоемкости выполнения технологических операций.

3. Разработана методика проектирования интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, являющаяся частью общего процесса организации производства, включающая создания цифрового двойника ячейки для отработки рациональных технологических решений и написание управляющих программ для робототехнического оборудования. Комплексная методика, подкрепленная использованием цифрового двойника, позволяет **в 3 раза** быстрее создать гибкую и

масштабируемую производственную систему, способную обеспечить высокую точность и повторяемость процессов сборки CUBESAT;

4. Разработана структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, включающая разработанную организационную структуру команды проекта по созданию интеллектуальных роботизированных производственных ячеек и отличающаяся от существующих действиями, являющимися отличительными особенностями роботизированного производства ракетно-космической техники. Комплексное внедрение этих разработок обеспечивает прорыв в технологии производства отечественных малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT, позволяя перейти к их серийному и экономически целесообразному выпуску.

В результате проведенного исследования достигнута основная цель – повышение производительности процессов сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT в **4 раза**, по сравнению с проектировочными решениями под ручную сборку, за счет разработки, отработки и внедрения организационно-технологических решений серийного роботизированного производства.

Получены справки о внедрении результатов диссертационного исследования на предприятии ООО «ТЕСВЕЛ» - Производственно-инжиниринговая компания; ООО «РСК» - развивающееся российское предприятие по производству кабельной продукции для различных сфер применения, в том числе для аэрокосмической отрасли. Получена справка о внедрении результатов диссертационного исследования в учебном процессе Самарского университета им. С.П. Королева.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. **Михеев, М.А.** Разработка технологии 3d печати корпусных деталей МКА НК / Д.В Антипов, **М.А. Михеев**, В.И. Панин, В.В. Жуков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2023. - Т. 25. № 4. — С. 110-113.

2. **Михеев, М.А.** Конструкторско-технологические решения аддитивного производства корпусных деталей МКА НК / Д.В. Антипов, **М.А. Михеев**, В.И. Панин, А.М. Шульга // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2023. - Т. 25. № 4. — С. 104-109.

3. **Михеев, М.А.** Разработка технологической схемы роботизированной сборки малых космических аппаратов типа cubesat / Д.В. Антипов, В.А. Звягинцев, **М.А. Михеев**, В.И. Панин, А.А. Ткаченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. - № 1. – С. 347-356.

4. **Михеев, М.А.** Разработка управляющей программы робота для завинчивания винтов при сборке малого космического аппарата с применением спуткам программы и разработанного постпроцессора / Д. В. Антипов, М.А. Михеев, А.А. Ибятулина, А.Р. Рахматуллин, И.С. Клепак // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2025. - № 9. — С. 209-218.

5. **Михеев, М.А.** Разработка инструментария проектирования конструкций малых космических аппаратов nano класса типа cubesat под возможности серийной роботизированной сборки / Д.В. Антипов, **М.А. Михеев** // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. - 2025. - № 6. – С. 214-223.

6. **Михеев М.А.** Разработка структурно-функциональной модели функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки / **М.А. Михеев** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2026. - Т. 28. № 2. — С. 110-121.

Патенты:

7. Патент № 2824224. Способ автоматизированной сборки космических аппаратов / И.С. Ткаченко, М.А. Иванушкин, **М.А. Михеев**, В.А. Звягинцев, А.А. Ткаченко. - № 2024102402, заявл. 16.11.2023 опубл. 20.08.2024.

8. Патент № 2825163. Устройство конструкции унифицированной космической платформы, ориентированной на автоматизированную сборку / И.С. Ткаченко, М.А. Иванушкин, Ю.Д. Лысенко,

М.А. Михеев, О.Д. Жалдыбина, М.Р. Морданов. - № 2024102398, заявл. 16.11.2023 опубли. 03.09.2024.

9. Патент № 235524. Универсальный роботизированный оператор станков с числовым программным управлением / **М.А. Михеев**, А.А. Ткаченко, А.К. Крюкова, Г.И. Рыжов, П.С. Гвоздева - № 2025100959, заявл. 24.12.2024 опубли. 30.07.2025.

10. Патент № 2846773 Способ изготовления беспилотных летательных аппаратов / Д.В. Антипов, Р.С. Загидуллин, А.К. Крюкова, М.А. Михеев, А.А. Ткаченко - № 2024112423, заявл. 03.05.2024 опубли. 01.10.2025.

Публикации в других изданиях и материалы конференций:

11. **Михеев, М.А.** Разработка технологии и создание эскизного макета приспособления для основной роботизированной сборки малого космического аппарата нано-класса «АИСТ-СТ» [Текст] / Д.В. Антипов, **М.А. Михеев** // Совместная III Отраслевая научно-практическая конференция «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» и VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения»). — 2024. — С. 156-159.

12. **Михеев, М.А.** Имитационная модель процесса комплектования, подборки и сборки компонентов МКА [Текст] / Д.В. Антипов, **М.А. Михеев** // Созвездие Роскосмоса: траектория науки : совместная III Отраслевая научно-практическая конференция и VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения») : сборник трудов. – Самара, 2024. – С. 302-305.

13. **Михеев, М.А.** Интеграция 1С склада с роботизированным комплексом хранения компонентов [Текст] / Д.В. Антипов, **М.А. Михеев** // Созвездие Роскосмоса: траектория науки : совместная III Отраслевая научно-практическая конференция и VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения») : сборник трудов. – Самара, 2024. – С. 169-172.

14. **Михеев, М.А.** Разработка устройства доработки вертикально-фрезерного станка 676П для реализации процесса сварки трением с перемешиванием / Д. В. Антипов, М.А. Михеев, А.А Ткаченко, Г.И. Рыжов, А.К. Крюкова, П.С. Гвоздева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. № 8. — С. 275-280.

15. **Михеев, М.А.** Разработка концепции универсальной платформы беспилотного летательного аппарата на основе применения метода QFD / **М.А. Михеев**, А.А. Ткаченко // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3. – № 4. – С. 14-21.

16. **Михеев, М.А.** Разработка модели гибкой производственной ячейки для серийного изготовления беспилотных летательных аппаратов [Текст] / **М.А. Михеев**, А.А. Ткаченко // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2024. – Ч. 1. – С. 18-20.

17. **Михеев, М.А.** Разработка концепции универсальной платформы БПЛА на основе применения метода функции развёртывания качества [Текст] / **М.А. Михеев** // Гражданская авиация: XXI век: сборник трудов XVI Международной молодежной научной конференции. – Ульяновск: УИ ГА, 2024. – С. 158-159.