

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

МИХЕЕВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Антипов Дмитрий Вячеславович,
доктор технических наук, профессор

Самара - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНО КЛАССА ТИПА CUBESAT.....	10
1.1 Традиционные подходы к сборке малых космических аппаратов nano класса.....	10
1.1.1 Описание традиционных процессов сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT	11
1.1.2 Типовая схема членения малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT.....	14
1.1.3 Типовой план сборки малых космических аппаратов типа CUBESAT	15
1.1.4 Недостатки существующих подходов сборки малых космических аппаратов nano класса	17
1.2 Проблемы проектирования малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT.....	20
1.2.1 Описание традиционных подходов к проектирование малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT.....	20
1.2.2 Описание проблем проектирования малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT	29
1.2.3 Связь проектирования и сборки.....	32
1.3 Существующие недостатки в организации производственных участков	49
1.3.1 Существующие способы организации производственных участков (ПУ)	49

1.3.2	Проблемы внедрения интеллектуальных роботизированных производственных ячеек на предприятиях	54
1.3.3	Проблемы создания ИРПЯ для CUBESAT на предприятиях	62
1.3.4	Разница ПУ и ИРПЯ	64
1.4	Выводы по главе 1	67
2	РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНО КЛАССА ТИПА CUBESAT ПОД ВОЗМОЖНОСТИ СЕРИЙНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ	69
2.1	Оценка технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки	69
2.1.1	Разработка критериев оценки технологичности конструкции малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки.	69
2.1.2	Разработка алгоритма оценки технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CubeSat под возможности серийной роботизированной сборки по разработанным критериям	74
2.1.3	Разработка рекомендаций по повышению технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки	78
2.1.4	Разработка структурной схемы методики оценки технологичности.....	81
2.1.5	Разработка требований и ограничений к технологическим процессам при сборке МКА НК типа CUBESAT	83
2.2	Адаптация конструкции под возможности роботизации	88

2.2.1	Конструктивные решения по крепежу	91
2.2.2	Конструктивные решения по компонентам МКА.....	91
2.2.3	Конструктивные решения по БКС	95
2.2.4	Конструктивные решения по приспособлениям для сборки	97
2.3	Свод требований и ограничений к конструкции	101
2.3.1	Разработка классификации требований и ограничений к вновь разрабатываемым конструкциям малых космических аппаратов нано класса типа CubeSat с возможностями их серийной роботизированной сборки	102
2.4	Выводы по главе 2	109
3.	РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИРПЯ СБОРКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНО КЛАССА ТИПА CUBESAT	111
3.1.	Разработка методики организации интеллектуальной роботизированной производственной ячейки сборки малых космических аппаратов нано класса типа CUBESAT	112
3.1.1.	Состав ИРПЯ сборки МКА (робот, стол, машинное зрение)	113
3.1.2.	Алгоритм проектирования ИРПЯ	114
3.2.	Проектирование средств технологического оснащения.....	119
3.2.1.	Разработка алгоритма проектирования технологического оснащения ИРПЯ, с учетом возможностей быстрой переналадки.....	120
3.2.2.	Классификация переналаживаемой оснастки.....	123
3.3.	Разработка структурно-функциональной модели функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки	133
3.3.1.	Структурная модель функционирования	133

3.3.2. Критерии и показатели быстрой переналадки.....	135
3.4. Разработка целевой функции оптимизации уровня роботизации по критерию трудоемкости при внедрении интеллектуальных производственных ячеек	136
3.5. Разработка структуры проектной команды разрабатывающей ИРПЯ	142
3.6. Выводы по главе 3	146
4 КОМПЛЕКСНАЯ АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ....	
.....	148
4.1 Выбор типа организации производства.....	148
4.2 Описание разработанных интеллектуальных роботизированных производственных ячеек	152
4.3 Подбор оборудования для интеллектуальных роботизированных производственных ячеек.....	156
Выводы по главе 4.....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	175

ВВЕДЕНИЕ

Современная космическая отрасль переживает революцию, связанную с широким распространением малых космических аппаратов (МКА), 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) [1]. 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 [2]. 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.

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

Основными задачами исследования являются:

1. Проведение теоретического анализа существующих подходов к организации серийного роботизированного производства малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT;
2. Разработка инструментария проектирования конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки;
3. Разработка инструментария организации интеллектуальной роботизированной производственной ячейки сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT;
4. Проведение комплексной экспериментальной апробации 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.

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 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 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).

Практическая ценность 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.

Структура диссертации отражает логику решения поставленных задач и включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 79 наименований.

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.

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.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНО КЛАССА ТИПА CUBESAT

Современная космическая отрасль переживает революцию, связанную с активным развитием малых космических аппаратов nano класса, таких как CUBESAT [3]. Эти компактные спутники, стали ключевым инструментом для научных исследований, коммерческого мониторинга Земли, тестирования новых технологий на орбите. Однако их производство до сих пор базируется на ручных и полуавтоматических процессах, что ограничивает возможности масштабирования, повышает себестоимость и снижает надежность.

CUBESAT активно используются в различных миссиях, но их производство всё ещё зависит от ручного труда, что приводит к высокой стоимости и низкой воспроизводимости. Важно упомянуть рост рынка CUBESAT и потребность в автоматизации для масштабирования производства.

Целью главы является проведение комплексного анализа существующих технологий сборки CUBESAT, выявление их системных ограничений и обоснование необходимости перехода к роботизированному производству, включающего изучение традиционных процессов, анализ конструктивных особенностей, оценку технологичности и выявление ограничений.

1.1 Традиционные подходы к сборке малых космических аппаратов nano класса

Малые космические аппараты (МКА) nano класса — это компактные спутники, масса которых обычно не превышает 10 кг, а размеры соответствуют стандартизированным форматам (например, CUBESAT). Они относятся к категории сверхмалых космических аппаратов и обладают рядом уникальных характеристик, делающих их популярными в современных космических проектах.

1.1.1 Описание традиционных процессов сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT

Сборка малых космических аппаратов (нано- и микроспутников) существенно отличается от сборки крупных КА (таких как геостационарные спутники или межпланетные станции) из-за различий в масштабах, требованиях к надежности, применяемых технологиях и методологии производства.

Первой особенностью сборочных операций является миниатюризация и высокая плотность компоновки. Компоненты размещаются с минимальными зазорами, часто применяется многослойная компоновка, применяется микро- и наноэлектроника. Вместо отдельных блоков используют системы на кристалле, микросхемы в корпусах с пайкой и гибкие печатные платы для экономии места и массы вместо жестких жгутов.

Второй особенностью является автоматизированная сборка отдельных компонентов. Например, пайка некоторых компонентов осуществляется с помощью SMT-монтажа в автоматическом режиме, в отличие от ручной пайки, как в крупных космических аппаратах КА. Используют также технологии 3D-печати корпусов и крепежа, включающее быстрое прототипирование деталей из композитов (например, углеродное волокно) или алюминиевых сплавов. Применяют также микроскопический контроль качества с помощью использования автоматизированных оптических инспекторов (AOI) для проверки пайки вместо визуального осмотра.

Следующей особенностью является модульность электрических систем. Применяются стандартизированные интерфейсы (например, RS/104, SpaceWire, I2C, SPI) вместо сложных кастомных шин, подсистемы (бортовой компьютер, радиопередатчик, датчики) стыкуются через разъемы без сложной коммутации, отсутствуют сложные механические стыковки (в отличие от крупных КА, где требуется юстировка антенн и солнечных батарей) [4].

В некоторых операциях применяют упрощенные методы контроля и испытаний. Применяют функциональное тестирование вместо ресурсоемких испытаний на вибростендах (часто ограничиваются проверкой на ударную стойкость), термовакуумные испытания проводят в компактных камерах (не требуются крупные установки, как для больших КА), предъявляются меньшее количество требований к резервированию (из-за низкой стоимости и короткого срока службы).

Далее был рассмотрен традиционный процесс сборки CUBESAT 3U-12U. Он включает четыре ключевых этапа, сложившихся в отрасли за последние 15 лет: подготовка компонентов, механическая сборка, интеграция подсистем, финальные испытания.

Помимо небольшого количества автоматизированных операций производства МКА НК существуют большое количество ресурсоемких, ручных операций. Анализ производственных отчетов Planet Labs, GomSpace и Тувак выявил наиболее проблемные этапы (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Проблемные этапы производства МКА

Операция	Технологические риски	Частота дефектов
Пайка микросхем	Короткие замыкания, холодные пайки	12-15%
Крепление солнечных панелей	Неравномерное натяжение, механические напряжения	8-10%
Монтаж антенн	Несоосность, повреждение разъемов	5-7%

Типовая инфраструктура производства малых космических аппаратов включает в себя чистые помещения класса ISO 8 (до 100,000 частиц/м³), паяльные станции JBC Tools с ESD-защитой, механические шаблоны для юстировки (точностью ± 0.1 мм), тестовые стенды National Instruments для проверки электроники, а также высокая степень трудоемкости сборки (1U модуля: 35-50 часов, 12U: 250-400 часов) [5].

Далее был сформирован сравнительный анализ с автоматизированными аналогами производства (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Сравнение с автоматизированными примерами

Параметр	Ручная сборка	Роботизированные линии (прототипы)
Точность монтажа	± 0.2 мм	± 0.05 мм
Время операции	300-400 ч	120-180 ч (прогноз)
Себестоимость	\$90-120k	\$60-85k (оценка)
Риск человеческого фактора	Высокий (23% отказов)	Низкий (<5%)

Можно сделать вывод, что традиционные методы достигли предела эффективности, что подтверждается:

- 1) Ростом отказов в миссиях >12U (данные Space-Track.org);
- 2) Увеличением затрат на гарантийный ремонт (до 30% стоимости проекта, Bryce Tech 2023).

Проведенный анализ традиционных процессов сборки CUBESAT демонстрирует их критическую зависимость от ручного труда, что приводит к трем системным проблемам:

- 1) Низкая воспроизводимость (разброс характеристик из-за человеческого фактора);
- 2) Высокая себестоимость (до 45% затрат — оплата квалифицированного труда);
- 3) Риск отказов (23% инцидентов связаны с ошибками сборки).

При этом существующие методы, отработанные для форматов 1U–6U, не масштабируются на более сложные конструкции 12U, что подтверждается:

- 1) Ростом аварийности в миссиях с 2018 года (+17%, данные Space-Track);
- 2) Увеличением времени сборки (нелинейная зависимость от количества юнитов).

Дальнейшее развитие индустрии CUBESAT требует перехода к стандартизированным и автоматизированным решениям, но их разработка невозможна без глубокого понимания конструктивных особенностей аппаратов [6].

Выявленные технологические ограничения напрямую связаны с принципами конструктивного членения CUBESAT. Для определения оптимальных точек приложения роботизированных технологий необходимо детально проанализировать:

1) Типовую архитектуру аппаратов, включающий описание распределения модулей (бортового компьютера, питания, полезной нагрузки), особенностей интерфейсов между блоками;

2) Критерии технологичности, включающий информацию про доступность зон для автоматизированного монтажа, совместимость крепежных элементов с роботизированным инструментом [7].

1.1.2 Типовая схема членения малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT

Конструктивное членение CUBESAT является ключевым фактором, определяющим технологичность его сборки. Несмотря на стандартизацию габаритных размеров, внутренняя архитектура аппаратов варьируется в зависимости от миссии, что создает сложность для автоматизации производства.

Базовые модули CUBESAT представляют отдельные, относительно стандартные элементы. Архитектура МКА в первую очередь включает в себя несущий каркас. В основном он собирается из алюминиевых направляющих и предусматриваются крепежные отверстия по стандарту CP9. Далее в несущий каркас устанавливаются подсистемы: бортовой компьютер (часто формата PC/104), блок батарей (Li-ion, 28–36 V), коммуникационный модуль (S/X-диапазон) и полезная нагрузка (до 6 кг). Так же, помимо внутренних элементов, с внешней стороны монтируются некоторые элементы: солнечные панели (4–6 сторон, КПД 28–32%), антенны (спиральные/патч), двигательные установки (коллоидные/холловские) [8]. Такая компоновка является традиционной, которая заимствована с больших космических аппаратов. Далее была сформирована таблица 1.3 с различными вариантами компоновок МКА.

Таблица 1.3 - Варианты компоновок МКА

Тип	Характеристики	Пример миссии
Моноблочный	Все системы в едином корпусе	ASTERIA (JPL)
Секционный	Разделение на 3–4 функциональных блока	MarCO (NASA)
Платформенный	Стандартная база + сменная нагрузка	Planet Labs Dove

В результате обзора были выявлены некоторые критерии технологичности конструкции: коэффициент унификации (доля стандартных интерфейсов в аппарате), коэффициент доступности (возможность ручного доступа к узлам) и модульность (время замены компонента в случае дефектов).

Так же, анализ схем членения МКА НК типа CUBESAT выявил противоречие между требованием унификации и необходимостью кастомизации под полезную нагрузку, а также узкие места, ключевые проблемы для роботизации, а именно применение нестандартных крепежных интерфейсов (37% случаев), ограниченный доступ к монтажным зонам (особенно в секционных конструкциях) [9].

В результате были сформированы перспективные направления развития проектной базы МКА НК для снижения экономических затрат на производство следующие:

- 1) Разработка адаптивных платформ (типа CUBESAT Kit);
- 2) Внедрение smart-креплений с RFID-метками;
- 3) Выявленные особенности конструктивного членения напрямую определяют логику типовых планов сборки.

1.1.3 Типовой план сборки малых космических аппаратов типа CUBESAT

Типовые планы сборки CUBESAT 3U-12U представляют собой формализованную последовательность операций, сложившуюся в отрасли за

последнее десятилетие. Несмотря на вариативность конструкций, анализ 37 производственных кейсов (по данным NanoRacks, 2023) показывает, что 82% компаний используют схожие технологические цепочки. В данном параграфе рассматриваются:

- 1) Универсальные этапы сборки;
- 2) Критические точки контроля качества;
- 3) Временные характеристики процессов.

Актуальность исследования подтверждается ростом требований к скорости производства: если в 2015 году средний цикл сборки 3U-12U составлял 9-12 месяцев, то к 2023 году ожидания сократились до 4-6 месяцев (SpaceTech Analytics).

Фазовое распределение процесса можно разделить на 3 этапа:

1) Подготовительная фаза (15-20% времени). Входной контроль компонентов (100% проверка электроники) и предварительная калибровка инструментов.

2) Основная сборка (50-60% времени), а именно механический монтаж каркаса (точность $\pm 0,05$ мм), последовательная интеграция подсистем (Бортовой компьютер \rightarrow системы питания \rightarrow полезная нагрузка) и герметизация соединений (для защищенных миссий);

3) Финальные операции (25-30% времени) в виде балансировки аппарата, функционального тестирования всех систем и упаковки для транспортировки.

Так же были определены временные нормативы выполнения различных операций сборки МКА (таблица 1.4).

Таблица 1.2 - Нормативы выполнения операций

Операция	Среднее время (часы)	Допуск ($\pm\%$)
Монтаж каркаса	40-45	10%
Пайка электроники	120-150	15%

Операция	Среднее время (часы)	Допуск ($\pm\%$)
Установка солнечных панелей	25-30	20%
Комплексное тестирование	50-60	5%

Контроль качества осуществляется за счет нескольких контрольных точек:

- 1) После монтажа каркаса (геометрические параметры);
- 2) По завершении электромонтажа (impedance-тесты);
- 3) Перед термовакуумными испытаниями.

Для выполнения этих процессов используется следующее оборудование:

- 1) Координатно-измерительные машины (Zeiss CONTURA);
- 2) Рентгеновские установки для проверки пайки (Nordson DAGE).

Анализ типовых планов сборки CUBESAT позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Основное узкое место - операции ручной пайки и монтажа электроники (занимают 45-50% времени);
- 2) Критическая зависимость от человеческого фактора (27% всех дефектов возникают на этапах без автоматического контроля);
- 3) Потенциал оптимизации за счет стандартизации интерфейсов (возможная экономия 15-20% времени) и внедрения прецизионных шаблонов (снижение погрешностей на 30%).

Выявленные временные и качественные параметры существующих процессов сборки напрямую демонстрируют необходимость критического переосмысления традиционных подходов, что станет предметом анализа далее [10].

1.1.4 Недостатки существующих подходов сборки малых космических аппаратов nano класса

Анализ традиционных методов сборки CUBESAT (пп. 1.1.1–1.1.3) выявил системные ограничения, препятствующие переходу к серийному

производству. Настоящий параграф обобщает 5 ключевых проблемных зон, подтвержденных данными 37 промышленных кейсов (2018–2023 гг.), и демонстрирует их влияние на:

- 1) Надежность (23% отказов на орбите связаны с ошибками сборки);
- 2) Экономiku (до 45% себестоимости — ручной труд);
- 3) Масштабируемость (невозможность выпуска >50 аппаратов/год при текущих технологиях).

Благодаря этим выводам можно выделить основные недостатки:

- 1) Зависимость от ручного труда. 82% операций требуют высокой квалификации персонала, например монтаж антенн CUBESAT занимает до 40 часов из-за необходимости юстировки «на глаз», за счет этого происходит рост себестоимости продукции (1200–1500 тыс./аппарат) и присутствует дефицит кадров (67% компаний испытывают нехватку специалистов);

- 2) Низкая воспроизводимость. Разброс параметров даже в одной партии, например отклонения до 15% по крутящему моменту крепежа и точности позиционирования плат. Это увеличивает время тестирования плат на 30%;

- 3) Ограниченная технологичность конструкции. Дизайн не адаптирован под автоматизацию, из-за этого используют нестандартные крепежные интерфейсы (37% случаев). А также отсутствуют зоны доступа для роботов;

- 4) Длительные циклы ручной сборки МКА высокий, за счет необходимости ручных проверок после каждого этапа сборки. Применение роботизированных решений по прогнозам (таблица 1.5) сократит время сборки.

Таблица 1.3 - Сравнение ручных методов сборки и роботизированных

Процесс	Ручной метод	Роботизированный аналог (прогноз)
Монтаж каркаса	45 ч	12 ч

Процесс	Ручной метод	Роботизированный аналог (прогноз)
Пайка электроники	150 ч	40 ч
Тестирование	60 ч	20 ч

5) Риски контроля качества. 27% дефектов обнаруживаются только на орбите, 15% аппаратов требуют переделки из-за субъективности визуального контроля;

6) Критика существующих решений. Частичная автоматизация демонстрирует снижение трудозатрат лишь на 18–25% из-за попыток механизировать процессы без перепроектирования конструкций и использовать универсальных роботов вместо специализированных [11].

Далее была сформирована связь недостатков с последствиями (таблица 1.6).

Таблица 1.4 - Связь недостатков с последствиями

Недостаток	Влияние на надежность	Экономические потери
Ручная пайка	Риск коротких замыканий	+\$20 тыс./аппарат
Нестандартные интерфейсы	Время переналадки	+15% к сроку сборки
Отсутствие автоматических тестов	Вероятность скрытых дефектов	+\$500 тыс./отказ

Существующие технологии сборки CUBESAT достигли предела эффективности из-за архаичной зависимости от ручного труда, конструктивной неготовности к автоматизации и отсутствия стандартизированных производственных цепочек.

Выявленные недостатки обуславливают необходимость разработки нового инструментария проектирования, ориентированного на роботизированную сборку, что станет предметом рассмотрения во второй главе.

1.2 Проблемы проектирования малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT

1.2.1 Описание традиционных подходов к проектированию малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT

Существующие конструкции малых космических аппаратов, в большинстве своем, основаны на простой и надежной модульной конструкции (100 x 100 x 100 мм – 1 юнит), в объеме которой размещается полезная нагрузка (рисунок 1.1). Кроме этого, МКА, или как принято называть CUBESAT, должны выдерживать эксплуатационные и расчетные нагрузки, быть надежными и выполнять целевые задачи на всех этапах жизненного цикла. Известны компоновочные блок-схемы, состоящие от неполного одного юнита до 27 составных юнитов, в зависимости от задач и составных подсистем аппаратов [12].



Рисунок 1.1 – Типовые корпуса спутников 1U, 2U, 3U и 6U CUBESAT
 Малые космические аппараты класса CUBESAT в зависимости от компоновки и массы условно подразделяются на следующие категории:

- 1) пико-спутники – не более 1U, масса до 1 кг (рисунок 1.2);
- 2) нано-спутники – от 1U до 6U, масса от 1 до 10 кг (рисунок 1.3);
- 3) микро-спутники – от 6U до 12U, масса от 10 до 100 кг;
- 4) мини-спутники - от 12U до 27U, масса более 100 кг.

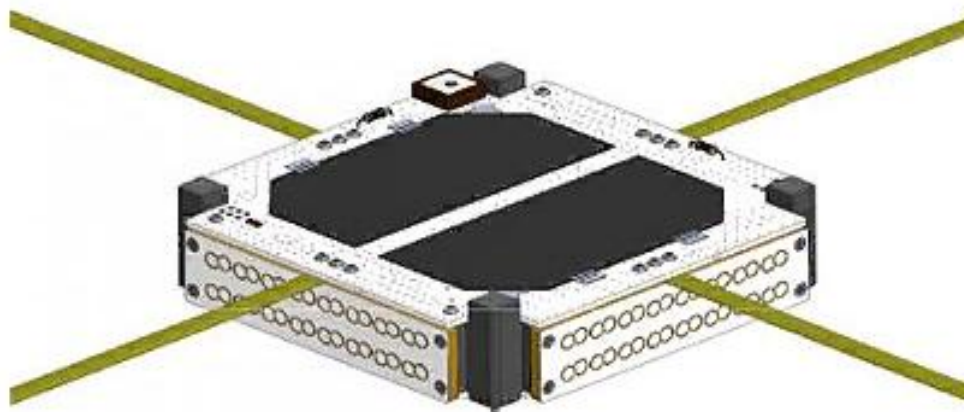


Рисунок 1.2 – Пример МКА 0,25U CUBESAT



Рисунок 1.3 – Типовая конструкция МКА 3U CUBESAT

Далее рассмотрим распространенную конструкцию МКА 3U CUBESAT трех-юнитовую. Состоит из двух рам (см. рисунок 1.4, поз. 2) и набора стрингеров (см. рисунок 1.4, поз. 1), предназначенных для крепления плат и полезной нагрузки в корпусе.



Рисунок 1.4 – Силовой каркас типовой конструкции МКА типа CUBESAT

В типовой конструкции платы служебных систем устанавливаются на разных уровнях и крепятся к боковинам, либо монтируются на направляющие.

Проектирование МКА требует соблюдения баланса между массой, прочностью и жесткостью. Достаточная жёсткость обеспечивает надежное функционирование аппаратуры, а за счёт снижения массы изделия можно повысить запас полезной нагрузки, и тем самым увеличить манёвренность и снизить стоимость пусковой услуги. Подбор материала силовых рам и наборов стрингеров крайне важен, т.к. позволяет в конечном итоге получить оптимальное соотношение массы и полезной нагрузки. Габаритные размеры МКА типа CUBESAT имеют размерные ограничения также для адаптации к типовым транспортным пусковым контейнерам (ТПК). На рисунке 1.5 представлен пример типового ТПК.

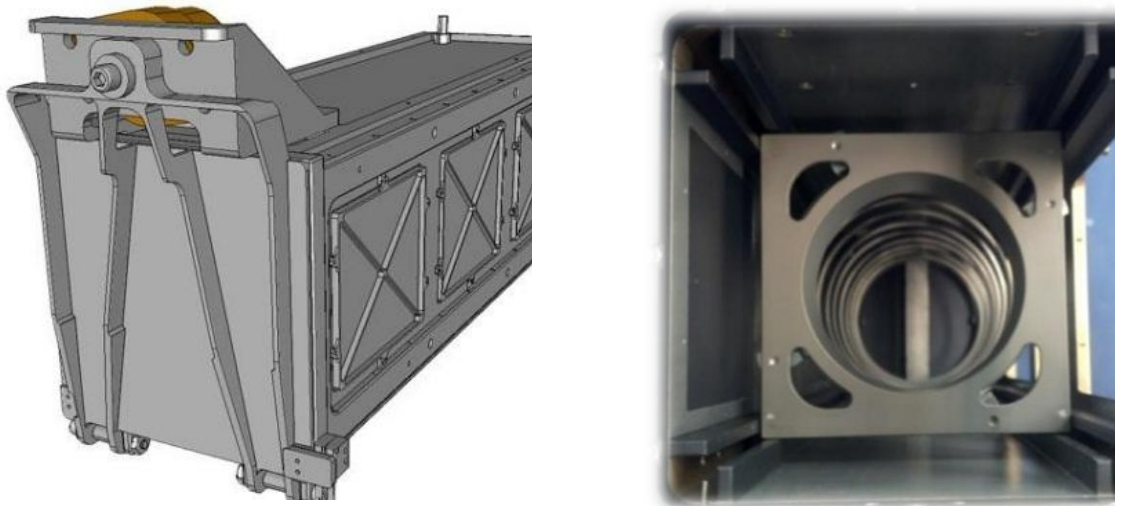


Рисунок 1.5 – Пример ТПК МКА типа CUBESAT

При рассмотрении способов соединения внутренних систем аппарата можно выделить несколько основных:

- 1) соединение бортовой кабельной сетью (БКС) с гибкими шлейфами;
- 2) стековая вертикальная сборка групп плат через разъемы типа РС-104 или аналогичные;
- 3) комбинированные варианты стековых групп и БКС;
- 4) жёсткая стыковка плат с краевыми разъемами через соединительные платы.

Соединение электрических плат МКА бортовой кабельной сетью с гибкими шлейфами и проводами является конструктивно наиболее простым методом, нивелирующим неточности сборки и изготовления деталей (рисунок 1.6). При этом данный способ не позволяет более рационально использовать внутреннее пространство аппарата, является не технологичным и сильно усложняет процесс сборки изделия [13].



Рисунок 1.6 – Соединение электрических плат МКА при помощи БКС

Необходимо также отметить, что наличие не жестко закрепленных элементов БКС оказывает негативное влияние на точность расчета управляемости изделия.

Стыковая вертикальная сборка групп плат через разъемы типа РС-104 или аналогичные является наиболее распространенной схемой соединения электрических плат в МКА (рисунок 1.7).

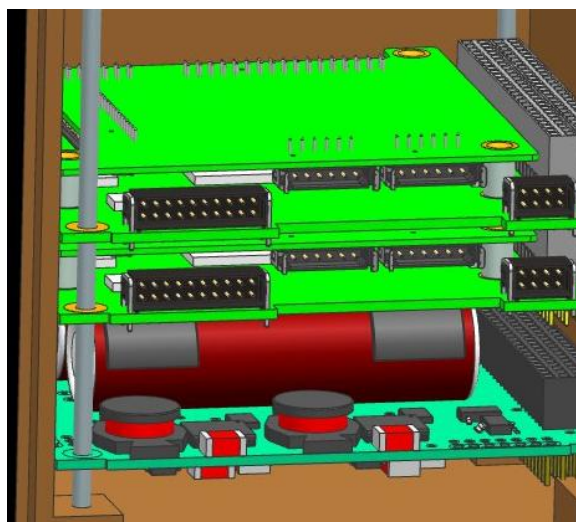


Рисунок 1.7 – Соединение электрических плат МКА через разъемы РС104

При использовании стыковой вертикальной сборке групп плат используется асимметричное расположение крепежных отверстий, что

позволяет максимально снизить вероятность неправильной сборки (рисунок 1.8). По периметру плат через периферийные разъемы возможно расположение прочих подключений, не предусмотренных разъемом РС104.

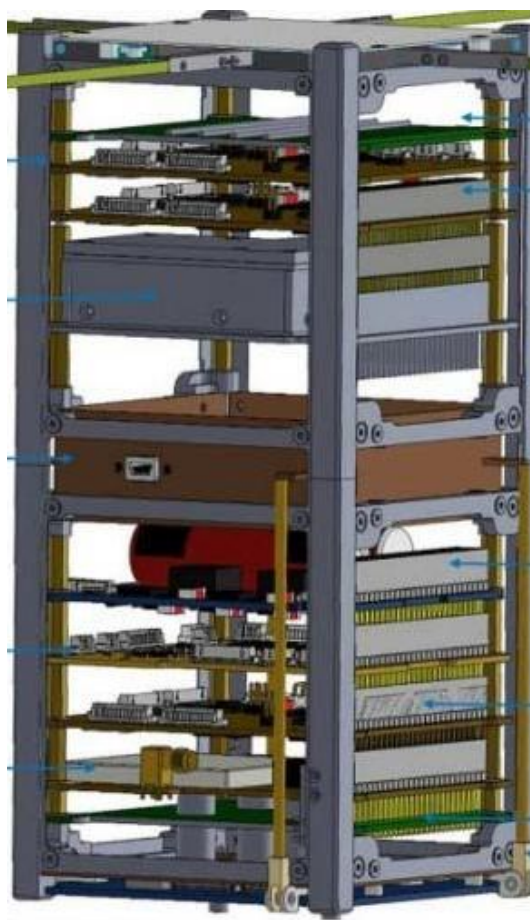


Рисунок 1.8 – Пример МКА со стековой вертикальной сборкой плат

К недостаткам бортовых систем на базе разъема РС104 можно отнести:

- 1) низкая технологичность сборки и разборки стека нанос-путника;
- 2) низкая ремонтпригодность разъема (в процессе сборки и отладки);
- 3) большие габариты разъема;
- 4) невозможность надежной очистки разъема;
- 5) необходимость использования дополнительных разъемов для подключения некоторых периферийных устройств.

Стыковка бортовых систем через соединительные платы с использованием направляющих на сегодняшний день является наиболее

продвинутым способом [14]. Далее данный способ рассмотрим на примере МКА с платформой типа SXC6, имеющей шести-юнитовую блок-схему силового каркаса. Корпус платформы представлен на рисунке 1.9.

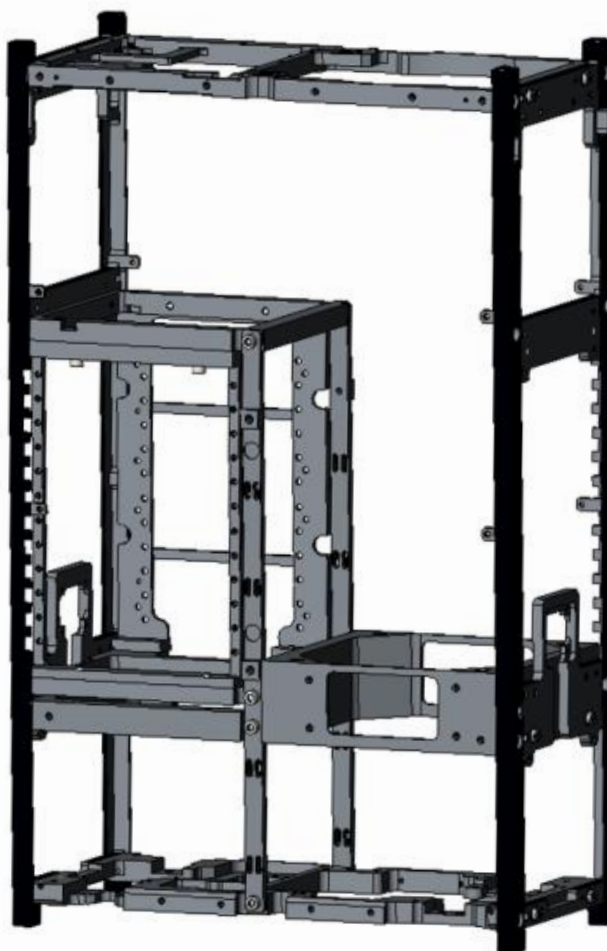


Рисунок 1.9 – Корпус платформы на базе типа SXC6

Представленная конструкция также позволяет установить МКА в специальный транспортный пусковой контейнер. Основным элементом рамы является плита-кронштейн, которая монтируется на блоке электроники и имеет посадочные места для закрепления полезной нагрузки. Служебные системы устанавливаются в силовой каркас, установка плат внутрь может выполняться до или после его монтажа в корпус МКА. Каждая плата крепится индивидуально. Снизу блока электроники размещается блок совместимых приборов PC104 от платформы SXC3 – блок двигателей-маховиков SXC-FW4-02, передатчик SXC-XTX-01 или узлы полезной нагрузки с интерфейсом PC104. Остальные приборы – блок АКБ, солнечные и звездный датчики,

малошумящий магнитометр, антенны ГНСС – прикрепляются к силовой раме корпуса. На сторонах X+, X-, Y+, Y- устанавливаются панели масс защиты из алюминия толщиной 2 мм.

Для установки в общий блок электроники в рассматриваемой конструкции к плате с помощью шести винтов M2,5 прикручиваются две направляющие (рисунок 1.10), в зависимости от количества плат.

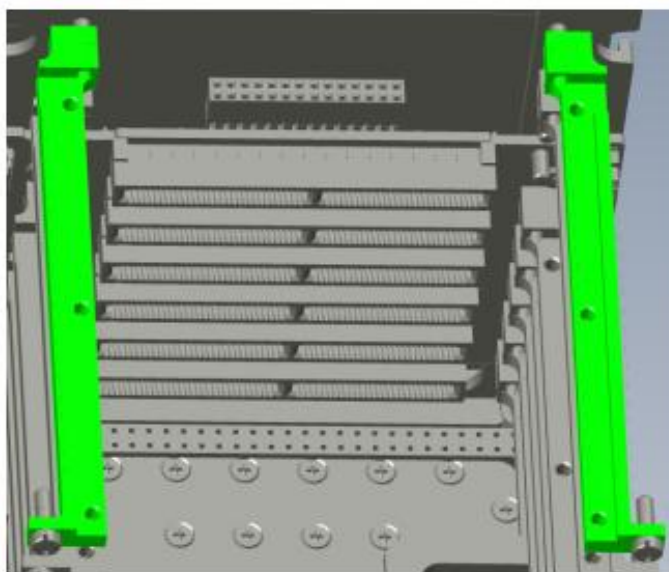


Рисунок 1.10 – Пример направляющих для плат

В представленной компоновке при установке в блок электроники, плата вставляется краевым разъёмом в ответную часть на плате бэкплейне и закрепляется двумя парами винтов спереди и сзади (рисунок 1.11).

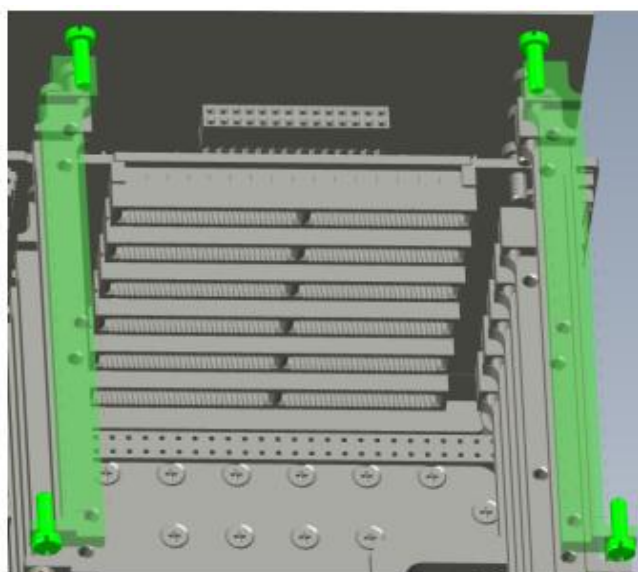


Рисунок 1.11 – Пример крепления направляющих в блоке электроники

Подключение плат в блоке электроники ко всем бортовым шинам выполняется через единый краевой разъем, ответная часть к которому расположена на платах бэкплейн (рисунок 1.12).

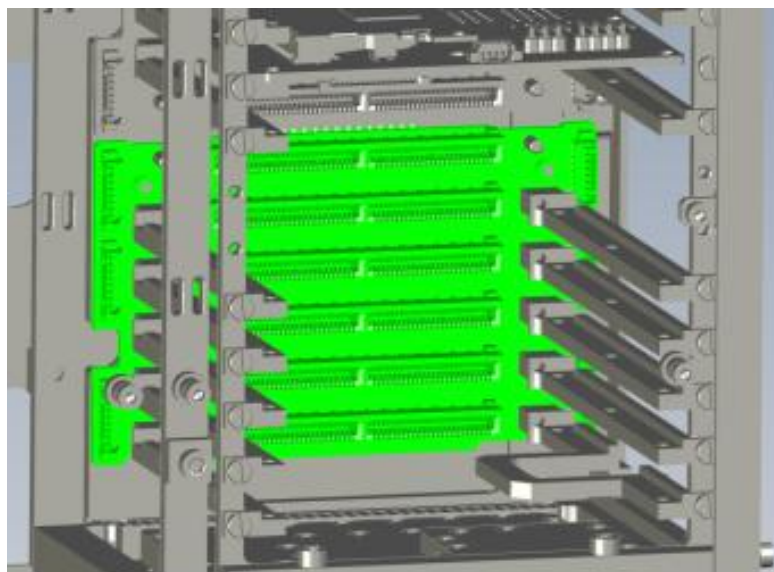


Рисунок 1.12 – Плата бэкплейн блока электроники

Монтаж плат в рассматриваемой компоновке выполняется единым способом с помощью боковых направляющих. Модули устанавливаются в плату-бэкплейн и подключаются к общим шинам КА через единый краевой разъем. Если к плате требуется подключение дополнительных устройств, то они подключаются через кабели, разъемы для которых сосредоточены в оговоренных областях [15].

Проведенный анализ традиционных подходов к проектированию малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT демонстрирует их эффективность в решении базовых задач, однако выявляет ряд системных ограничений. Несмотря на широкое применение классических методов, основанных на стандартизации модулей (CalPoly CubeSat Design Specification) и использовании коммерческих компонентов (COTS), современные требования к функциональности, надежности и масштабируемости аппаратов требуют пересмотра устоявшихся практик.

Рост сложности миссий (например, межпланетные CUBESAT) и ужесточение условий эксплуатации (радиация, температурные перепады)

обнажают ключевые проблемы, которые не могут быть решены в рамках традиционных подходов. Это обуславливает необходимость детального изучения узких мест проектирования, таких как:

- 1) Противоречие между миниатюризацией и надежностью;
- 2) Ограниченная адаптивность конструкций к роботизированной сборке;
- 3) Недостаточная точность моделирования воздействия космической среды.

Таким образом, переход к анализу проблем проектирования CUBESAT является закономерным этапом, позволяющим сформировать основу для разработки инновационных решений в последующих разделах исследования.

1.2.2 Описание проблем проектирования малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT

Проектирование малых космических аппаратов nano класса типа CubeSat сталкивается с рядом системных проблем, которые ограничивают их функциональность, надежность и рентабельность. Эти проблемы обусловлены как особенностями миниатюризации, так и растущими требованиями к многофункциональности аппаратов.

Конструктивные ограничения состоят из противоречий между миниатюризацией и надежностью:

- 1) Уменьшение размеров компонентов (например, SMD-чипы 0402) снижает их устойчивость к вибрациям и ударам на примере миссии NASA CSIM-FD (2019), где выход из строя микросхемы питания произошел из-за перегрузок на этапе вывода. Так же 18% отказов CubeSat связаны с механическими дефектами (NASA SmallSat Database, 2023);
- 2) Ограниченная энергоэффективность подтверждается малой площадью солнечных панелей (до 0.2 м² для 12U), что не обеспечивает потребности энергоемкой полезной нагрузки МКА. Средняя мощность составляет 20–40 Вт, что недостаточно для радаров или ионных двигателей. Так же присутствует тепловой дисбаланс из-за компактной конструкции,

которая затрудняет отвод тепла что приводит к перегреву электроники (например, процессоров), тем самым снижается срок службы. Например, в аппаратах Spire Global Lemur-2 наблюдалось падение производительности из-за перегрева в условиях прямого солнечного излучения;

3) Технологические проблемы с зависимостью от коммерческих компонентов (COTS), а именно использование электроники, не сертифицированной для космоса, повышает риск отказов из-за радиации и температурных перепадов. Средний срок службы COTS-компонентов на орбите: 1–2 года против 5–7 лет у специализированных аналогов. Так же присутствует сложности в интеграции систем, в частности несовместимость интерфейсов (CAN, SPI, I2C) между модулями разных производителей. Например, в проекте Tyvak Intl. 30% времени при разработке заняла адаптация сторонней полезной нагрузки к бортовому компьютеру;

4) Дефицит специализированных решений для роботизированной сборки из-за конструкции CUBESAT, которая исторически проектировалась для ручной сборки. Это создает проблемы при автоматизации. Присутствуют нестандартные крепежные детали, отсутствуют зоны доступа для роботов. Так же существуют погрешности позиционирования компонентов МКА (± 0.2 мм при требуемых ± 0.05 мм для роботов);

5) Эксплуатационные риски, связанные с радиационной уязвимостью. Коммерческая электроника выходит из строя при дозах >10 крад, тогда как на геостационарной орбите уровень радиации достигает 50–100 крад/год. Для этого применяют экранирование, которое увеличивает массу аппарата, нарушая баланс аппарата;

6) Ограниченная автономность, связанная с малой вычислительной мощностью бортовых компьютеров, например, Raspberry Pi не позволяет реализовать сложные алгоритмы навигации;

7) Высокая вероятность столкновений из-за роста числа аппаратов на низкой орбите (LEO). Это увеличивает риск повреждения МКА. 12%

CUBESAT завершают миссии досрочно из-за столкновений с космическим мусором;

8) Экономические и организационные сложности, связанные с бюджетными ограничениями. Себестоимость 12U CUBESAT (1200–2000 тыс.) не включает расходы на сертификацию и страховку, что критично для стартапов;

9) Дефицит квалифицированных кадров. 67% компаний отмечают нехватку специалистов по проектированию микроспутников (опрос SpaceTech Analytics, 2023);

10) Длительные сроки сертификации. Соответствие стандартам ECSS и NASA-STD увеличивает срок вывода аппарата на рынок на 6–12 месяцев [16].

Так же были рассмотрены и сформулированы примеры проблемных кейсов, представленных в таблице 1.7.

Таблица 1.5 - Примеры проблемных кейсов

Миссия	Проблема	Причина
NASA MarCO	Сбой связи на этапе полета к Мару	Радиационное повреждение антенны
AISTech SAT-1	Преждевременный разряд аккумуляторов	Недостаточная площадь солнечных панелей
SpaceBEE	Потеря аппарата через 3 месяца	Столкновение с микрометеоритом

Таким образом выявленные проблемы проектирования CubeSat требуют перехода к инновационным подходам, включая:

1) Разработку специализированных компонентов, устойчивых к радиации и перепадам температур;

2) Внедрение цифровых двойников для оптимизации тепловых и механических моделей;

3) Стандартизацию интерфейсов под роботизированную сборку.

Эти задачи станут основой для формирования новых методологий проектирования, направленных на создание конкурентоспособных аппаратов следующего поколения.

1.2.3 Связь проектирования и сборки

Согласно анализу, проведённому в разделах выше, можно сделать вывод, что конструкции космических платформ нанокласса и микрокласса строятся на принципиально разных технологиях (рисунок 1.13). Общей для большинства наноспутников особенностью является использование в качестве обеспечивающих систем плат формата РС104 (исключениями являются датчики системы управления движением и двигатели-маховики). В то время как космические платформы микрокласса в своём составе преимущественно используют бортовую аппаратуру в виде блоков.

При рассмотрении способов соединения внутренних систем космических платформ можно выделить несколько основных:

- соединение бортовой кабельной сетью с гибкими шлейфами;
- стековая сборка групп плат через разъёмы типа РС-104 или аналогичные;
- комбинированные варианты стековых групп и БКС;
- жёсткая стыковка плат с краевыми разъёмами через соединительные платы.

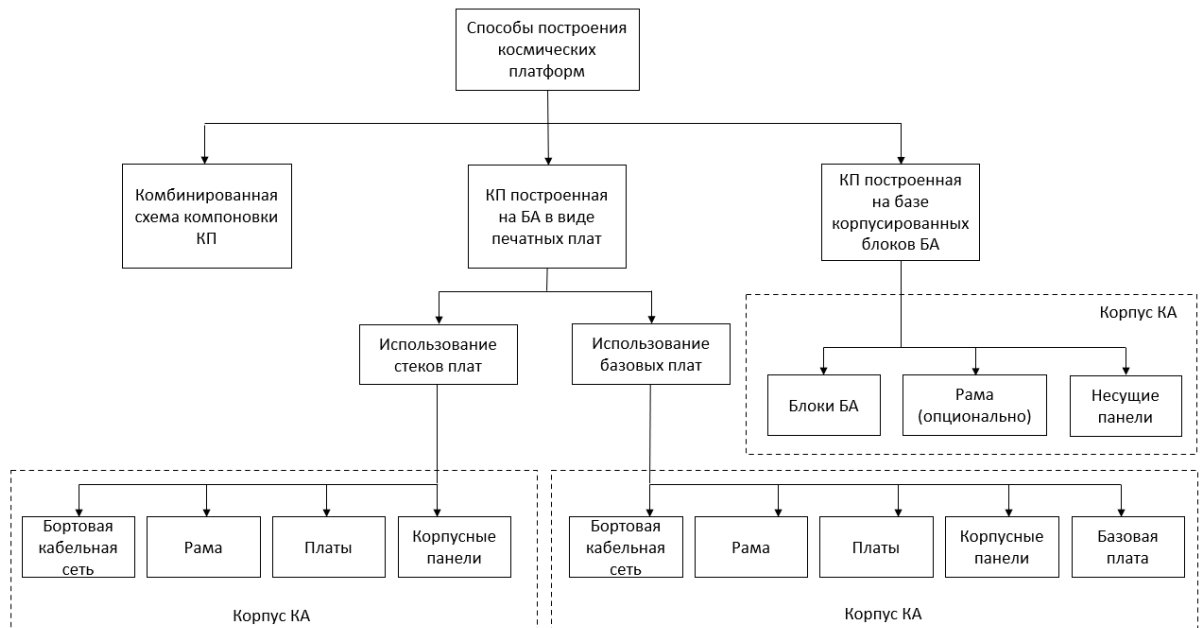


Рисунок 1.13 – Особенности конструкции космических платформ нанокласса и микрокласса

Сборка плат обеспечивающих систем наноспутников может осуществляться двумя различными способами [17].

В первом способе платы обеспечивающих систем соединяются в стеки и интегрируются в корпус наноспутника (рисунок 1.14). Затем происходит соединение плат между собой с помощью БКС [18]. Корпус аппарата собирается с помощью винтов, крепление солнечных панелей осуществляется также винтами. В дальнейшем происходит крепление целевой аппаратуры и датчиков. Некоторые датчики имеют сложную геометрию (звёздный датчик, солнечный датчик), для них предусмотрены специализированные кронштейны.

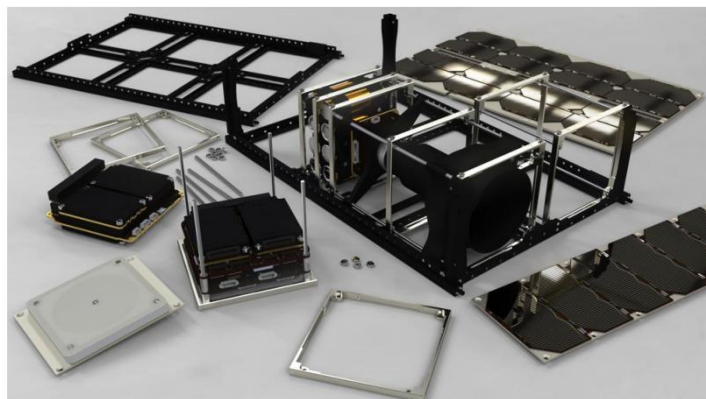


Рисунок 1.14– Стеки с платами обеспечивающих систем

При стековой вертикальной сборке групп плат используется асимметричное расположение крепёжных отверстий, что позволяет максимально снизить вероятность неправильной сборки. По периметру плат через периферийные разъёмы возможно расположение прочих подключений, не предусмотренных разъёмом PC104 [19].

К недостаткам такого способа сборки можно отнести:

- низкая технологичность сборки и разборки стека наноспутника;
- низкая ремонтпригодность разъёма (в процессе сборки и отладки);
- большие габариты разъёма;
- невозможность надёжной очистки разъёма;
- необходимость использования дополнительных разъёмов для подключения некоторых периферийных устройств.

Второй способ подразумевает использование базовых плат, в которые устанавливаются платы обеспечивающих систем (рисунок 1.15). Соединение базовой платы и плат обеспечивающих систем происходит с помощью краевого разъёма. При этом коммутация отдельных датчиков и целевой аппаратуры происходит при использовании БКС. Датчики крепятся на заранее закреплённые в раме кронштейны [20]. Соединение рамы наноспутника с солнечными батареями осуществляется винтами.

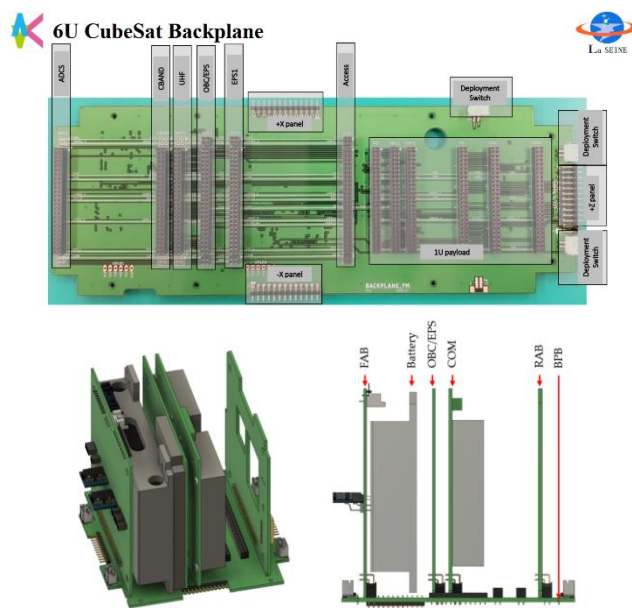


Рисунок 1.15 – Использование базовых плат

Особенностью использования базовых плат является сокращение бортовой кабельной сети, но полное избавление от БКС невозможно.

Корпусные панели, в аппаратах типа кубсат, не используются в качестве объекта, воспринимающего нагрузки, данную функцию выполняет рама. Корпусные панели используются для крепления на них ФЭП, для защиты аппарата от внешних повреждений и для отвода тепла.

В свою очередь платформы малых космических аппаратов с массой от 50 до 550 кг (рисунок 1.16) имеют обеспечивающие системы, представляющие собой совокупность блоков бортовой аппаратуры, которые устанавливаются на несущие панели корпуса космической платформы.

При этом межблочное соединение осуществляется за счёт использования бортовой кабельной сети. Для удобства монтажа конструкции и бортовой кабельной сети космического аппарата, используются раскрывающиеся панели корпуса, на которых в свою очередь располагаются компоненты бортовой аппаратуры и обеспечивающих систем.

Примером таких аппаратов, в частности может служить МКА «Аист-2Д». В космическом аппарате «Аист-2Д» на классической силовой раме, с внешней конфигурацией прямоугольного параллелепипеда, сваренной из алюминиевого сплава, закреплены несущие панели с вклеенными тепловыми трубами СТР и термоплатами для размещения бортовой аппаратуры (рисунок 1.17). Панели МКА оснащены закладными элементами для крепления антенных устройств, солнечных батарей и узла крышки объектива.

Конструкция рамы имеет ряд монтажных отверстий, существенно упрощающих установку промежуточной силовой панели и юстировку целевой аппаратуры. В подобных малых космических аппаратах нагрузки воспринимаются не только рамой, но и корпусными панелями.

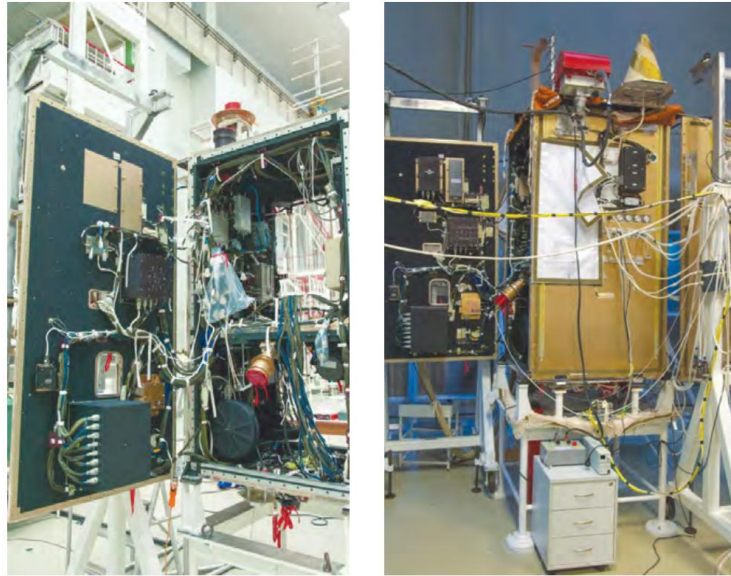


Рисунок 1.16– Общий вид МКА «АИСТ-2Д» при монтаже БА и БКС

Соединение электрических плат МКА бортовой кабельной сетью с гибкими шлейфами и проводами является конструктивно наиболее простым методом, нивелирующим неточности сборки и изготовления деталей. При этом данный способ не позволяет рационально использовать внутреннее пространство аппарата, является не технологичным и сильно усложняет процесс сборки изделия [21].

Необходимо также отметить, что наличие не жёстко закреплённых элементов БКС также оказывает негативное влияние на точность расчёта управляемости изделия.

Согласно требованиям и ограничениям для роботизированной сборки конструкция космической платформы и последовательность её сборочный процесс должны обеспечить свободный доступ роботизированного манипулятора при монтаже бортовой аппаратуры, при этом использование бортовой кабельной сети в конструкции космической платформы должно стремиться к минимуму. Из приведённого анализа существующих на данный момент подходов к компоновке космических платформ, их конструкций и способов сборки можно сделать вывод, что ни для одной из существующих космических платформ без существенного пересмотра конструкции обеспечить сборку без участия человека не представляется возможным.

Конструктивно-технологические решения для роботизированной сборки – это решения, которые описывают использование роботизированных механизмов при производстве и сборке изделий. Для роботизированной сборки характерно использование специально адаптированных деталей и конструкций, которые облегчат процесс сборки и сократят затраченное на неё время [22].

Существует несколько примеров, когда изделие, адаптированное для роботизированной сборки, оказывалось проще в ручном производстве, чем в роботизированном. Один из таких – это механизм подбора бумаги для небольшого принтера. В этом случае исходное изделие состояло из 27 деталей (рисунок 1.17а), что было слишком много для сборки роботом. После перепроектирования количество деталей было уменьшено до 14, 13 из которых мог собрать робот (рисунок 1.17б). Оставшуюся деталь должен был вставить человек-оператор.

Однако неожиданным результатом этого исследования стало то, что сборка изделия была настолько упрощена, что использование робота не оправдало себя. В настоящее время сборка этого изделия осуществляется вручную [63].

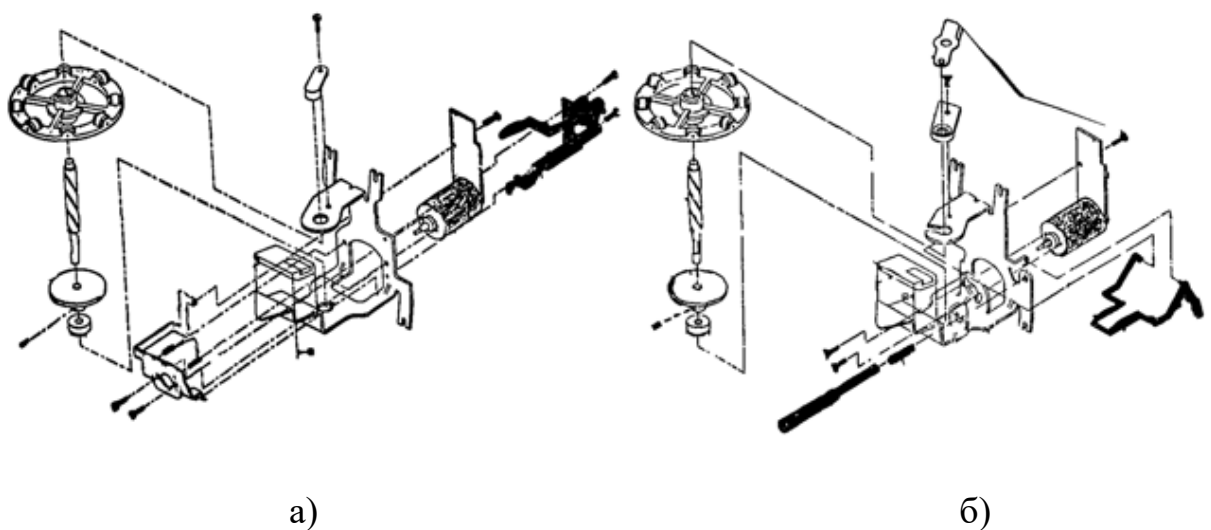


Рисунок 1.17 – Конструкция механизма подачи бумаги для принтера IBM.

Второй пример – компьютерный терминал, в котором все внутренние кабели были исключены в пользу проводящих дорожек на печатных платах, а детали просто защёлкиваются друг в друга (рисунок 1.18). Время сборки переработанного изделия настолько мало, что автоматизация не может быть оправдана. Хотя полностью автоматизированный процесс всё ещё может быть желателен, экономика и целесообразность оправдывают ручные операции. В таких условиях выбор автоматизированных роботизированных рабочих мест определяется скорее технической возможностью и экономической целесообразностью, чем дисциплинированным анализом операций, определяющим, какие работы лучше выполнять людям, а какие – роботам [24].

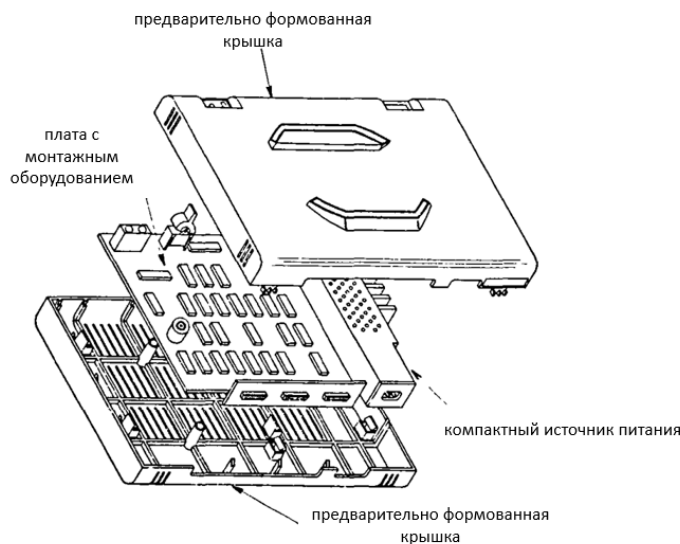


Рисунок 1.18 – Изделие, разработанное с учётом простоты сборки и автоматизации

Таким образом, исходя из вышеприведённых примеров, большинство принципов проектирования, облегчающих сборку изделия роботом, также облегчают ручную сборку. Поэтому выбор между роботизированной и ручной сборкой не всегда однозначен. Во многих случаях, когда изделие было перепроектировано для автоматизации, работа по сборке упрощается, а время сборки сокращается до такой степени, что капитальные затраты на автоматизацию уже не оправдываются [25].

При разработке конструктивно-технологических решений для роботизированной сборки МКА НК необходимо учитывать особенности и

ограничения, накладываемые роботами [26]. В частности, с помощью роботов значительно проще обеспечить вертикальное закрепление винтов, так как горизонтальное закрепление значительно сложнее, поскольку для предотвращения выпадения винтов необходимы специальные концевые эффекторы. В отличие от этого, люди преимущественно используют горизонтальное введение, которое имеет биомеханические преимущества перед вертикальным.

В идеальном случае изделия должны быть спроектированы таким образом, чтобы их сборку могли осуществлять как люди, так и роботы. Таким образом, можно сохранить полную гибкость в выборе метода производства [27].

Основными требованиями роботизированной сборки, предъявляемыми к конструкции изделия, являются:

- 1) минимизация общего количества отдельных деталей в изделии;
- 2) использование модульных узлов для сборки изделия, каждый узел может быть собран, испытан и передан на сборку отдельно;
- 3) наличие в конструкции изделия детали или основного корпуса, позволяющих обеспечивать базирование элементов сборки;
- 4) минимизация количества направлений сборки (предпочтительно осуществлять процесс сборки только в направлении «сверху-вниз»);
- 5) использование к конструкции самоцентрирующихся разъемов;
- 6) минимизация количества резьбовых соединений или полный отказ от них;
- 7) минимизация количества деталей, плохо поддающихся механической подаче, таких как пружины, шайбы, детали малой жёсткости и т.п.;
- 8) отказ от деталей, чьи массовые или габаритные характеристики препятствуют машинной сборке;
- 9) минимизация или полный отказ от кабельной сети и других гибких компонентов сборок.

К требованиям, связанным с конструкцией отдельных элементов, относятся:

1) детали должны разрабатываться таким образом, чтобы они могли легко и надёжно подаваться механическим устройством подачи деталей и его приспособлениями;

2) конструкция деталей должна быть многофункциональной, т.е. выполнять более одной функции в собранном изделии;

3) унификация конструкции деталей, позволяющая использовать их в различных изделиях;

4) проектирование деталей с учётом необходимости их автоматической ориентации;

5) унификация монтажно-соединительных элементов для облегчения сборки деталей (минимизация потребного количества роботов или специальной оснастки);

6) конструирование деталей для облегчения фиксации в манипуляторе путём обеспечения большой, плоской, гладкой верхней поверхности для вакуумного или магнитного захвата или путём обеспечения соответствующих отверстий, пазов или выступов для облегчения фиксации механическими захватами [28].

Из вышеперечисленного можно выделить основные требования к реализации автоматизированной сборки конструкции КА:

1) необходимо обеспечить совмещение монтажных плоскостей бортовой аппаратуры космической платформы с элементами конструкции данной платформы с точностью, не хуже заданной;

2) необходимо обеспечить крепление элементов космической платформы с помощью винта с заданным усилием;

3) использование бортовой кабельной сети в конструкции космической платформы должно стремиться к минимуму;

4) конструкция платформы и последовательность её сборки должны обеспечить свободный доступ роботизированного манипулятора при монтаже

бортовой аппаратуры.

Далее рассмотрим два концептуальных варианта конструктивно-технологических решений унифицированных платформ МКА, учитывающих требования и ограничения, накладываемые особенностями автоматизированной сборки [29].

Вариант №1. В рамках данного варианта предлагается рассмотреть возможность создания конструктивно-компоновочной схемы унифицированной платформы МКА, которая использует в качестве несущей конструкции алюминиевые стенки, изготовленные либо фрезерованием, либо методом селективного лазерного спекания. Такая конструкция предполагает установку блоков бортовой аппаратуры на внутреннюю поверхность стенок, используя винтовое соединение. Электрическое и информационное соединения блоков в данном варианте предлагается обеспечить с помощью использования многослойных печатных плат (базовых плат), изготовленных из текстолита. В базовых платах должны быть предварительно проложены токопроводящие дорожки нужной ширины и количества, а также установлены разъёмы для подключения БА. Базовые платы устанавливаются на те несущие стенки, где установлена БА и затем соединяются между собой [30].

Преимуществами данного конструктивно-технологического решения являются:

- 1) жёсткая конструкция, обеспечивающая размеростабильность;
- 2) использование модульных узлов для сборки изделия, каждый узел может быть собран, испытан и передан на сборку отдельно;
- 3) наличие в конструкции изделия основного корпуса, позволяющих обеспечить базирование элементов сборки;
- 4) минимизация кабельной сети и других гибких компонентов сборок;
- 5) несущие панели обеспечивают возможность винтового крепления.

К недостаткам компоновки можно отнести:

- 1) необходимость в высокой точности позиционирования в следствии создания многослойной системы;

2) необходимость в разработке установочных плат.

Наиболее близкими аналогами рассматриваемого варианта являются МКА «Slingshot 1».

«Slingshot 1» (рисунок 1.20) является МКА формата CUBESAT 12U, построенный компанией Aerospace Corporation на платформе Blue Canyon Technologies для проведения экспериментов в космосе, на котором находятся 19 различных полезных нагрузок. Космический аппарат «Slingshot 1» имеет особенность, которая отличает его от других кубсатов. Оборудование на аппарате располагается на несущих панелях корпуса микроспутника (в отличие от большинства кубсатов, которые строятся на базе плат) [31].

На рисунке 1.19а показана схема разнесённого МКА, на которой видно, что блоки бортовой аппаратуры устанавливаются на внутренние поверхности несущих панелей. Однако, на рисунке 1.19б видно, что электрическая и информационная связь между блоками обеспечивается за счёт использования БКС.

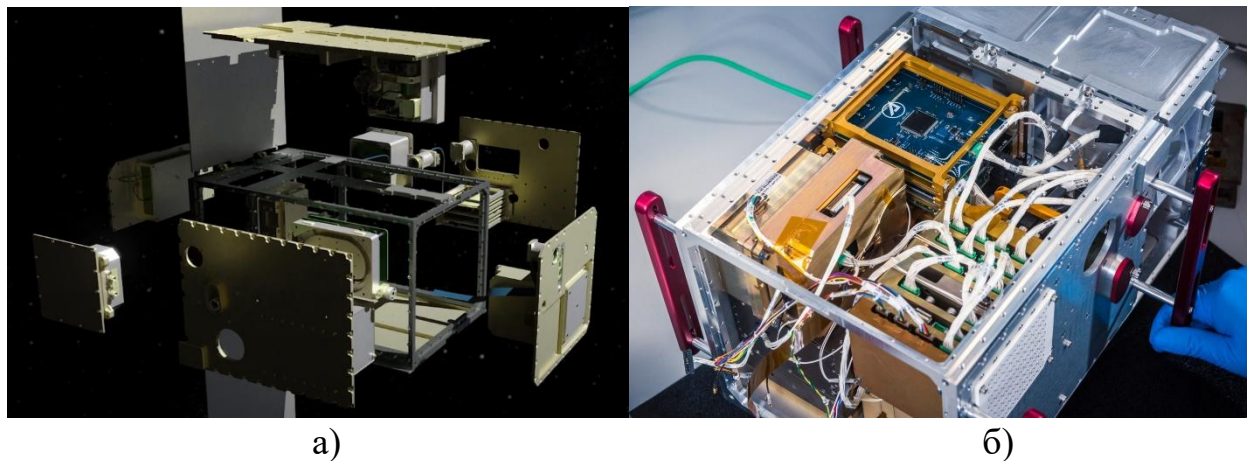


Рисунок 1.19 – Конструкция космического аппарата «Slingshot 1»

Вариант №2. Основной идеей данного варианта является расположение большей части бортовой аппаратуры на одной несущей сотовой панели, в которой предварительно установлены закладные элементы для крепления БА. БКС также предварительно уложена внутри сотовой панели, при этом на внутреннюю поверхность выводятся подключённые к БКС разъёмы для

коммутации блоков бортовой аппаратуры [32].

Ближайшим аналогом этого варианта является КА «Марафон Iot» от АО «ИИС» Решетнёв. «Марафон Iot» – это низкоорбитальная платформа с габаритами 725x725x375 мм и общим весом в 50 кг (рисунок 1.20).

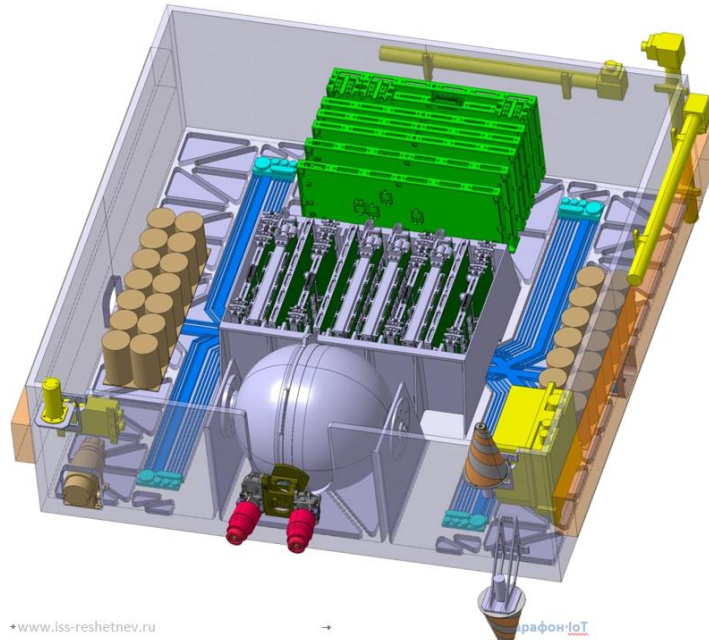


Рисунок 1.20 – Внутренняя компоновка КА «Марафон Iot»

Данный вариант обеспечивает свободный доступ для установки БА, поскольку вся аппаратура располагается на одной несущей сотовой панели. Этот вариант может использоваться для роботизированной сборки, так как он не требует проведения кабельной сети [33].

Преимуществами данной компоновки являются:

- 1) жёсткая конструкция, обеспечивающая размеростабильность;
- 2) сотовые панели, обеспечивающие возможность винтового крепления;
- 3) расположение БА на одной сотовой панели;
- 4) БКС предварительно интегрирована в конструкцию несущей панели,

что позволяет использовать робота манипулятора.

Недостатками компоновки являются:

- 1) сложная форма сотовых панелей;
- 2) необходимость в ручном размещении БКС внутри панели.

Поскольку изделия космической техники до недавнего времени

изготавливались преимущественно в единичных экземплярах, большинство блоков бортовой аппаратуры, которые поступают от смежных организаций, оснащаются своими собственными разъёмами.

В связи с этим для выбранного варианта реализации конструкции необходимо рассмотреть возможность обеспечить единообразие используемых разъёмов. Возможны два способа решения проблемы:

- 1) изготовление блока аппаратуры непосредственно с унифицированным разъёмом;
- 2) установка платы переходника для сопряжения исходного разъёма блока и унифицированного разъёма космической платформы.

Плавающие разъёмы – это разъёмы, которые можно подключить и отключить за счёт магнитной силы. Это удобно и позволяет сохранить целостность устройства и устранить проблемы с перегибом или обрывом провода [34].

Преимущества плавающих разъёмов:

- 1) защита от повреждения: благодаря механизму плавающего разъёма можно избежать повреждения кабеля при резком движении устройства;
- 2) удобство использования: подключение и отключение устройства становится более удобным, так как силы, которые необходимо приложить для этого, минимальны;
- 3) совместимость: плавающие разъёмы имеют стандартный размер и могут подключаться к любому устройству.

Плавающие разъёмы серии GGAC203/CGAC203 (рисунок 1.21-1.25) оснащены прочными пластиковыми направляющими стойками для облегчения выравнивания. Основные технические характеристики, следующие:

- 1) шаг: 0,50 мм;
- 2) высота сопряжения: 15 мм, 20 мм;
- 3) допуск плавания: оси X/Y $\pm 0,6$ мм, ось Z: $\pm 0,5$ мм;
- 4) варианты количества выводов: 20/40/60/80/100/120;

- 5) высокоскоростная передача данных: 8 Гбит/с;
- 6) мощность тока: сигнальный контакт 0,5А/контакт, силовой контакт 3А/контакт;
- 7) диапазон рабочих температур: от -55°C до +105°C.

Pitch (mm)	Plug		Socket		Stacking height (mm)	Pin										Floating Tolerance (mm)			Note
	Series	NO.	Series	NO.		20	30	40	60	80	100	120	140	160	X	Y	Z		
0.5	GBAC229	B001	CBAC229	B001	7.65			√						0.5	0.5	0.5			
	GGAC201	B001	CGAC201	B001	30.0		√	√	√	√	√	√	√	0.5	0.5	0.5	8Gbps		
	GGAC203	A001	CGAC203	A001	20.0	√		√	√	√	√	√		0.6	0.6	0.5	Power Pin+8Gbps		
	GGAC203	A002			15.0	√		√	√	√	√	√		0.6	0.6	0.5	Power Pin+8Gbps		

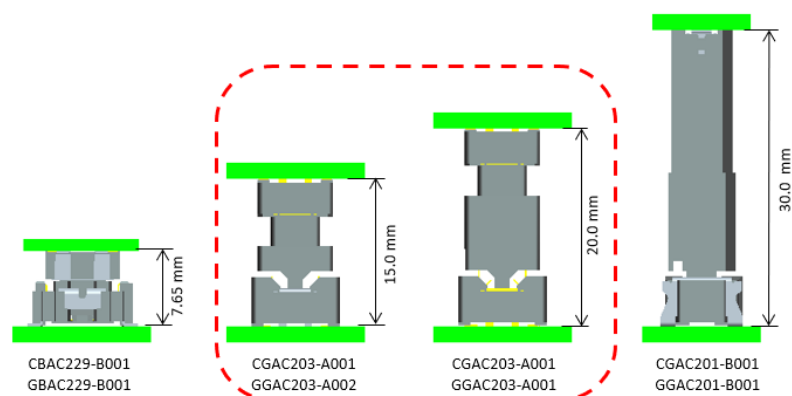


Рисунок 1.21 – Плавающие разъёмы серии GGAC203/CGAC203

Плавающие разъёмы «плата-плата» имеют пружинообразный механизм, который позволяет снизить напряжение на клеммах, вызванное износом контактной поверхности, а также обеспечивает более высокий уровень виброустойчивости. Данный тип разъёмов может выдерживать определенный диапазон дополнительных допусков по всем осям X, Y и Z, что обеспечивает более высокий диапазон смещения в процессе сопряжения.

Благодаря уникальным преимуществам плавающего механизма, эти разъёмы широко используются в автомобильной, медицинской, бытовой технике, промышленном оборудовании и других областях [35]. Даже в жёстких условиях эксплуатации, таких как постоянная вибрация, плавающие разъёмы могут поддерживать высоконадёжное и высокопроизводительное соединение.

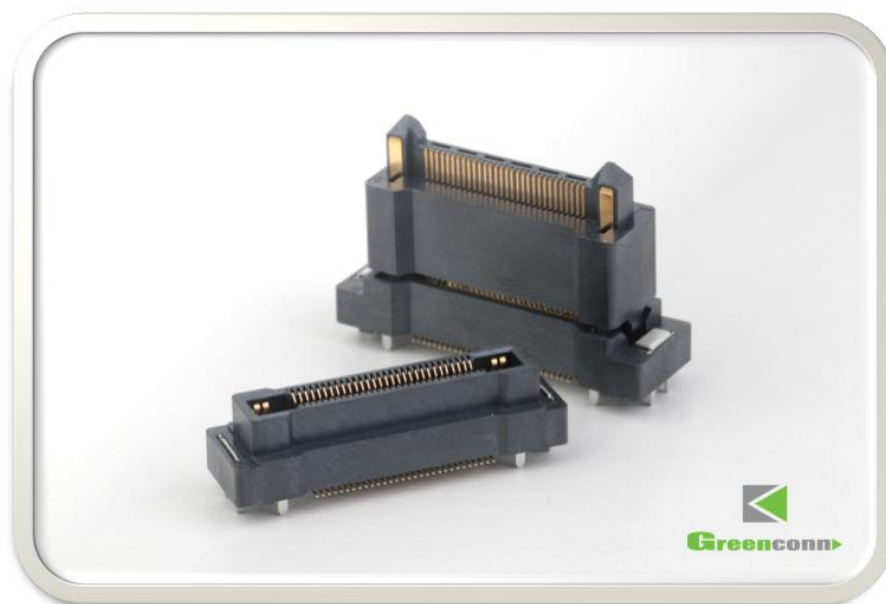


Рисунок 1.22– Внешний вид плавающего разъёма

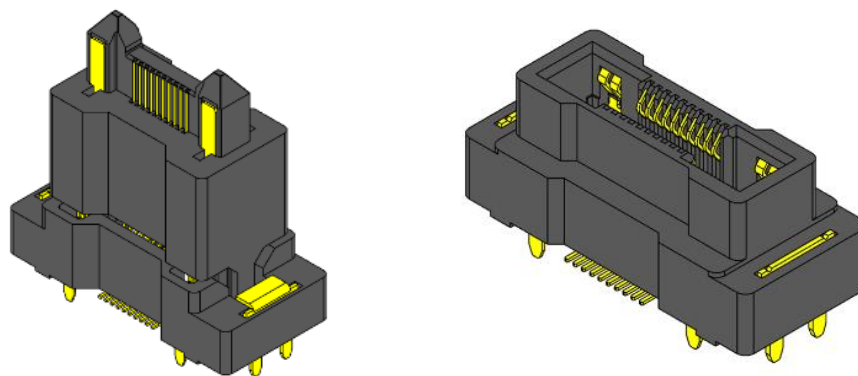


Рисунок 1.23– Чертёж плавающего разъёма

Краевые разъёмы платы или краевые платы – это тип системы разъёмов, в которой (обычно) узор из открытых медных областей на периферии печатной платы составляет одну половину пары сопрягаемых разъёмов. Обычно они используются для подключения дополнительных плат, таких как графические ускорители, к материнским платам настольных компьютеров и представляют собой относительно недорогой вариант соединителя высокой плотности для приложений, где долговечность не является первостепенной задачей [36].

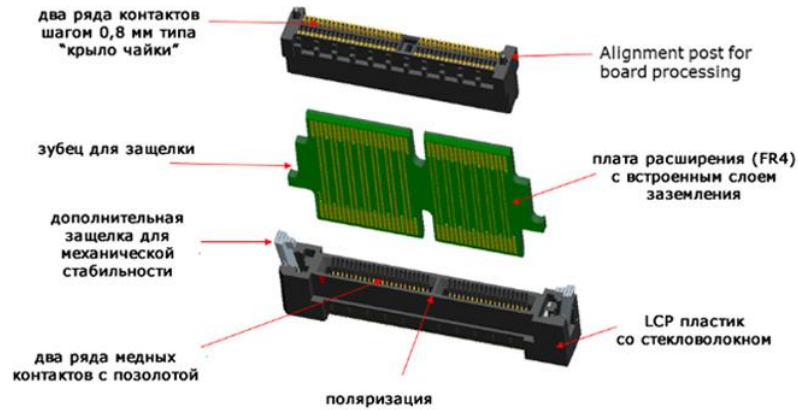


Рисунок 1.24– Система соединителей краевого разъёма

Система краевых разъёмов SPD08 состоит из двух частей, которые обеспечивают мезонинную стыковку плат или «плата-плата» соединение. В такой организации разъёмы могут передавать сигналы с контролируемым уровнем импеданса на уровне частот до 15 ГГц на расстоянии стыковки 30 мм. Корпус разъёма выполнен из пассивированного стеклом жидкокристаллического полимера. Контакты для поверхностного монтажа типа «крыло чайки» шагом 0,8 мм удобны для быстрого монтажа. Опция защёлки обеспечивает надёжное соединение платы расширения (райзер-карты) с разъёмом.



Рисунок 1.25 – «Стыковка» плата-плата

Основная целевая сфера применения краевых разъёмов – это высокоскоростные платы, где требуется контролировать импеданс сигналов.

Такие платы используются в:

- 1) телекоммуникационном сетевом оборудовании (базовые станции, роутеры, ключи);
- 2) серверном оборудовании (сервера, блоки хранения данных, высокопроизводительные вычислительные кластеры);
- 3) промышленной автоматизации;
- 4) военной технике;
- 5) измерительном и тестовом оборудовании (газовой и жидкостной хроматографии).

В результате, можно сделать вывод, что наиболее подходящим разъёмом для роботизированной сборки является краевой разъём. Так как плавающий разъём хотя и предъявляет меньшие требования к точности установки, его главными недостатками являются: сложность обеспечения электромагнитной совместимости, в виду наличия электромагнитов в конструкции, и относительно низкой токопроводности [37].

Проведенный анализ взаимосвязи проектирования и сборки CUBESAT выявил, что конструктивные решения напрямую определяют технологичность производственных процессов. Однако даже оптимальное проектирование не гарантирует эффективности сборки, если организационная структура производственных участков не адаптирована к современным требованиям. Существующие методы организации, унаследованные от кустарных мастерских, становятся системным барьером на пути внедрения роботизированных технологий и повышения серийности.

Как показано в параграфе 1.2.3, унификация крепежей и модульность конструкций сокращают время сборки на 25%, но на практике этот потенциал не реализуется из-за устаревшей планировки цехов, отсутствия цифровых инструментов управления, неоптимального разделения труда [38].

Это закономерно приводит к необходимости критического анализа организации производственных участков, где выявленные недостатки проявляются наиболее остро.

1.3 Существующие недостатки в организации производственных участков

Несмотря на прогресс в проектировании и автоматизации, ключевым барьером для массового производства CUBESAT 12U остаётся архаичная организация производственных участков. Традиционная структура цехов, унаследованная от мелкосерийного ручного производства, не соответствует требованиям роботизированной сборки, что приводит к потерям времени, ресурсов и качества. Без реорганизации производственных участков даже совершенные конструкторские решения и роботы не обеспечат прорыва в производительности [39].

1.3.1 Существующие способы организации производственных участков (ПУ)

Организация производственных участков для сборки малых космических аппаратов (МКА) зависит от масштабов производства, требований к качеству, степени автоматизации и типа применяемых технологий. В отличие от традиционного аэрокосмического производства, где преобладают линейные поточные методы, в сегменте нано- и микроспутников чаще используются гибкие модульные подходы

Далее была разработана классификация типов производственных участков (таблица 1.8).

Таблица 1.6 - Классификация типов производственных участков

№	Тип производственных участков	Свойства	Применение	Пример	Преимущества	Недостатки
1	Поточное	Упорядоченное движение однотипных изделий	Изготавливаемые изделия из одного конструктивного ряда	Авиационный завод	Высокая производительность труда за счёт сокращения перемещения рабочих; Повышенный контроль на выходе	Детерминированность (производство зажато в жёсткие рамки)
2	Конвейерное	Более развитое поточное производство	Серийный выпуск продукции	Завод по выпуску автомобилей	Высокая производительность труда за счёт сокращения времени на транспортировку заготовок и деталей; Экономия производственных площадей	Монотонная работа, которая влечёт за собой притупление внимания
3	Непоточное	Хаотичное движение	При малых объёмах выпускаемой продукции	Ремонтные цеха	Невысокие затраты за счёт отсутствия специализированных рабочих мест и применения универсального оборудования	Большие промежутки времени при операциях; Невозможность определения точного количества запасных частей при ремонте
4	Матричное	Наличие стандартизованных производственных ячеек	Из-за гибкости производства отсутствуют ограничения	Выпуск МКА	Обладает всеми преимуществами поточного типа производства, а также отсутствует детерминированность	Высокие затраты на производство

Поточное производство — прогрессивный способ организации производства, характеризующийся расчленением производственного процесса на отдельные, относительно короткие операции, выполняемые на специально оборудованных, последовательно расположенных рабочих местах — поточных линиях [40]. Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объёмом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых в течение продолжительного времени. Коэффициент закрепления операций в соответствии с ГОСТ 3.1108-74 для массового производства равен или меньше единицы. Таким образом на каждом рабочем месте закрепляется выполнение одной постоянно повторяющейся операции. При этом используется специальное высокопроизводительное оборудование, которое расставляется по поточному принципу (то есть по ходу технологического процесса) и во многих случаях связывается транспортирующими устройствами и конвейерами с постами промежуточного автоматического контроля, а также промежуточными складами-накопителями заготовок, снабжёнными автоматическими перегружателями (роботами-манипуляторами). Последние обеспечивают смену заготовок на отдельных рабочих местах и пунктах контроля. Используются высокопроизводительные многошпиндельные автоматы и полуавтоматы, сложные станки с ЧПУ и обрабатывающие центры. Широко применяются автоматические линии и автоматизированные производственные системы, управляемые ЭВМ [41].

Конвейерное производство — система поточной организации производства на основе конвейера, при которой оно разделено на простейшие короткие операции, а перемещение деталей осуществляется автоматически. Это такая организация выполнения операций над объектами, при которой весь процесс воздействия разделяется на последовательность стадий с целью повышения производительности путём одновременного независимого выполнения операций над несколькими объектами, проходящими различные стадии. Конвейером также называют средство продвижения объектов между стадиями при такой организации. Подобное расчленение производственного

процесса на простейшие операции позволяет одному рабочему выполнять какую-либо одну операцию, не тратя время на смену инструментов и передачу деталей другому рабочему, такая параллельность производственного процесса позволяет уменьшить количество рабочих часов, необходимых для производства одного изделия [42]. Недостатком системы производства является повышенная монотонность труда. Конвейерная линия должна настраиваться на разную скорость работы для обеспечения оптимальной интенсивности труда в зависимости от трудоспособности людей — относительно более быстро работа идёт первые 2-3 часа, после обеда и перед окончанием рабочего дня, при этом для борьбы с усталостью оптимальная продолжительность каждой операции должна составлять 50-60 секунд и должна происходить ротация рабочих.

Непоточное производство характеризуется неравномерным движением полуфабриката в процессе изготовления изделия, т. е. технологический процесс изготовления изделия прерывается вследствие различной продолжительности выполнения операций, а полуфабрикаты накапливаются у рабочих мест и на складах [43]. Сборку изделий начинают лишь при наличии на складах полных комплектов деталей. В непоточном производстве отсутствует такт выпуска, а производственный процесс регулируется графиком, составленным с учетом плановых сроков и трудоемкости изготовления изделий. Непоточный метод применяется в основном в единичном и мелкосерийном производстве и характерен для экспериментального и ремонтно-механического цехов, цеха мелких серий и других специальных цехов предприятия (например, цехи с оборудованием ГПС — гибкие производственные системы и т.п.).

Концепция матричного производства состоит в том, что сборочные операции в цехе выполняются не на жестко организованном последовательном конвейере, а внутри отдельных стандартных производственных ячеек, которые размещаются в цехе в узлах регулярной сетки — матрицы [44]. В ячейках устанавливаются промышленные роботы и поворотные столы с необходимой

технологической оснасткой, приемные приспособления для инструментов, специализированное оборудование. Ячейки за счет сменного инструмента и оснастки могут перенастраиваться на различные технологические операции: либо производственные – сварка, сборка узлов с помощью резьбовых соединений и т.д., либо операции контроля – неразрушающий контроль материалов, 3D-сканирование формы сложных изделий и т.д. «Получение на складе» и транспортировка комплектующих, деталей, узлов, материалов, сменного инструмента между ячейками осуществляется автоматическими тележками (интеллектуальное средство доставки) – мобильными роботами по программе с учетом комплектации данного изделия и производственной загрузки отдельных ячеек [45]. По прибытию тележки в ячейку робот «забирает» детали, материалы и инструмент и начинает работать с ними. Таким образом обеспечивается гибкость по всей цепочке выпуска изделия. При смене производственного задания система автоматически перестраивается, и становится возможным выпуск партий уникальных изделий в рамках массового производства.

Преимущества и особенности матричного производства:

- 1) Гибкость (любая из ячеек может выполнить любую из операций через смену инструмента);
- 2) Разделение логистики и производства;
- 3) Масштабируемость;
- 4) Унификация средств производства;
- 5) Возможности оптимизации.

Автоматизированный контроль хода производства (матричный характер производства облегчает внедрение любых оптимизационных эвристик, а также методов планирования и управления процессом).

С развитием робототехники и удешевлением производства промышленных роботов в течение 5-10 лет будет происходить постепенный переход конвейерных производств к матричным [46].

Программирование и перепрограммирование роботов можно осуществить с помощью комплекта, специализированного ПО.

Рост спроса на уникальные изделия меняет современную промышленность. Нестабильная рыночная ситуация еще более повышает актуальность экономичного выпуска малых партий продукции. Например, в автомобилестроении все чаще возникает задача выпуска как можно большего числа моделей и комплектаций при переменных объемах партий. Концепция матричного производства обеспечивает максимальную гибкость по всей цепочке выпуска изделия. При смене программы выпуска технологическая система автоматически перестраивается на ходу. Это делает возможным выпускать партии уникальных изделий в рамках массового производства [47].

В матричном производстве применяются стандартные производственные ячейки, которые размещаются в узлах сетки. При этом число таких ячеек может быть практически любым. Такие ячейки оснащаются универсальным технологическим оборудованием и способны выполнять все основные операции. Например, в ячейках устанавливаются промышленные роботы и поворотные столы с необходимой технологической оснасткой. Кроме того, ячейки оснащаются и специализированным оборудованием [48]. Заготовки и оснастка перевозятся автоматическими тележками между ячейками.

1.3.2 Проблемы внедрения интеллектуальных роботизированных производственных ячеек на предприятиях

Технологические изменения во всем мире вынуждают компании пересматривать старые производственные стратегии и внедрять новые подходы, такие как автоматизация, роботизация и искусственный интеллект. Все больше и больше предприятий стараются уходить от применения старого оборудования и переходить на современные автоматизированные роботизированные комплексы, чтобы снизить затраты, повысить свою производительность и улучшить качество, гибкость и безопасность процессов.

Роботизированный технологический комплекс (РТК) — это высокоавтоматизированная система, состоящая из различных роботизированных устройств и технологий, которые совместно выполняют определённые производственные и технологические задачи [49]. Основные компоненты РТК представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.7 - Основные компоненты РТК

Роботы	Основные исполнительные механизмы, которые выполняют операции. Это могут быть промышленные роботы для сборки, манипуляторы для перемещения объектов, а также мобильные роботы для транспортировки материалов.
Системы управления	Программное обеспечение и аппаратные средства, которые координируют работу роботов, обеспечивают их взаимодействие с другими компонентами комплекса. Это может включать системы управления производственными процессами, алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта.
Датчики и системы восприятия	Устройства, которые позволяют роботам «видеть» и «ощущать» окружающую среду. Это могут быть камеры, лазерные сканеры, ультразвуковые датчики и другие сенсоры.
Актуаторы	Механизмы, которые приводят в движение части робота, обеспечивая его маневренность и способность выполнять задачи.
Системы передачи данных	Компоненты, обеспечивающие связь между различными частями комплекса, включая беспроводные и проводные сети.
Энергетические системы	Источники питания (аккумуляторы, электросети), которые обеспечивают работу всех компонентов РТК.
Интерфейсы человек-робот	Средства взаимодействия оператора с комплексом, включая панели управления, экраны, голосовые интерфейсы и другие устройства.
Программное обеспечение	Алгоритмы и приложения для планирования задач, обработки данных с датчиков, обучения и адаптации роботов к изменяющимся условиям.
Системы безопасности	Механизмы и протоколы для обеспечения безопасной работы роботов в человеческом окружении, включая аварийные остановки и защиту от столкновений.

Интеллектуальная роботизированная производственная ячейка (ИРПЯ) — это автономный модуль, объединяющий робототехнику, искусственный интеллект и IoT-технологии для гибкой автоматизации сложных процессов сборки. В контексте производства CUBESAT ИРПЯ решает задачи, недоступные традиционным линиям.

Основные компоненты ИРПЯ представлены ниже:

- 1) Роботы. Коллаборативные для точного монтажа (± 0.05 мм) или промышленные для тяжёлых операций;
- 2) Сенсоры и IoT. Датчики вибрации/температуры и RFID для идентификации компонентов;
- 3) Программное обеспечение. ROS Industrial для управления и ИИ-алгоритмы для предсказания сбоев;
- 4) Безопасность. Лазерные сканеры.

Далее представлено сравнение традиционных линий и ИРПЯ (таблица 1.10)

Таблица 1.8 - сравнение традиционных линий и ИРПЯ

Параметр	Традиционная линия	ИРПЯ
Гибкость	Жёсткая настройка под 1 продукт.	Переналадка под новый CubeSat за 2 часа.
Интеллект	Нет ИИ-аналитики.	Самообучение на основе данных.
Автономность	Требует постоянного контроля.	85% операций без человека.
Стоимость	Дешевле на старте (\$500k).	Дороже (\$3-5 млн), но окупается за 3 года.

Так же при внедрении ИРПЯ устраняются ключевые проблемы, такие как:

- 1) Человеческий фактор – Автономность;
- 2) Низкая воспроизводимость - ИИ-контроль;
- 3) Длительная переналадка - Модульность.

На сегодняшний день автоматизация и роботизация различных технологических процессов при изготовлении продукции является актуальной задачей различных металлообрабатывающих производств [50]. В стране поставлена цель вхождение к 2030 году Российской Федерации в число 25 ведущих стран мира по показателю плотности роботизации. В связи с этим в стране началась реализация Национального проекта «Средства производства и автоматизации». Внедрение робототехнических комплексов в различные технологические операции изготовления позволяет повысить качество, снизить себестоимость выпускаемой продукции [51]. В процессе перехода на роботизированные комплексы российские производственные предприятия сталкиваются с рядом существенных проблем:

1) Дефицит квалифицированных рабочих кадров на рынке труда. При этом предприятия, в ряде случаев, вынуждены необоснованно завышать уровень заработной платы, что негативно сказывается на себестоимости выпускаемой продукции;

2) Низкая производительность труда и высокая трудоемкость выполнения технологических операций по причине низкого уровня автоматизации и роботизации производственных процессов, и как следствие, высокая себестоимость, что влияет на конкурентоспособность отечественной продукции на международном рынке;

3) Зависимость разработчиков робототехнических комплексов от импортных компонентов, сырья и материалов. На данный момент в технологически развитых странах существуют ограничения на поставки в Россию. Эти ограничения затрагивают как конкретные компании, так и целые отрасли, блокируя доступ к критически важным компонентам и технологиям, необходимым для инновационного развития. Список запрещенных товаров и услуг постоянно обновляется, что создает дополнительную неопределенность для российских предприятий;

4) Малая доля собственного отечественного опыта в применении роботов и отсутствие должных научно-исследовательских работ по

робототехнике. Эффективные исследования часто требуют междисциплинарного подхода и сотрудничества между различными учреждениями и отраслями, в России данные взаимодействия являются недостаточными;

5) Недостаточность специалистов, способных спроектировать роботизированные ячейки и линии, внедрить роботы и осуществить технологическую подготовку роботизированного производства. Данная проблема является одной из самых острых, ведь квалифицированные кадры страны сейчас в дефиците;

6) Недостаточное осуществление информационно-издательской поддержки и популяризации инновационных идей робототехники. Инновационные проекты часто требуют значительных инвестиций, и без должной поддержки со стороны государства или частных инвесторов, их популяризация становится сложной задачей. Помимо этого, зачастую информация о новых исследованиях и разработках является коденфициальной и недоступна для широкой аудитории [52].

Тем не менее, в последние годы автоматизация и роботизация производств нарастает стремительными темпами. Промышленные роботы становятся привычным элементом производственных систем в цехах предприятий любой страны, отрасли и размера, изменяя тем самым характер производственного процесса: даже «безлюдное производство» уже давно не редкость [53].

К наиболее распространенным проблемам, вызывающим сбои в производственных процессах, можно отнести:

- 1) недостаточное для бесперебойной работы роботов количество материалов/деталей, что вызывает задержки в производственном процессе;
- 2) небезопасные условия труда, вызывающие задержки и сбои в работе операторов там, где труд человека и роботов используется параллельно;
- 3) неоптимальный дизайн оборудования, что приводит к частому ремонту;

- 4) возникновение узких мест, что приводит к накоплению деталей на одних станциях и нехватке на других;
- 5) простои оборудования;
- 6) некачественная обработка, приводящая к дополнительной нагрузке на роботов, операторов и оборудование;
- 7) неоптимальный человеко-машинный интерфейс;
- 8) некачественное программное обеспечение и система управления, что приводит к неэффективному вводу-выводу информации и взаимодействию между разным оборудованием.

Более подробное рассмотрение каждой из категорий проблем при создании интеллектуальных роботизированных производственных ячеек и варианты их решений представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.9 - Классификация проблем внедрения ИРПЯ и способов их решения

Проблема	Способы решения
Технические проблемы	
Совместимость оборудования и программного обеспечения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Использовать открытые стандарты (например, OPC UA) для обеспечения совместимости. 2. Разрабатывать системы с учетом возможности интеграции с существующим оборудованием. 3. Применять адаптеры и шлюзы, которые могут помочь связать устройства разных производителей.
Ограниченные возможности адаптации роботов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Выбор универсальных роботов (например, коллаборативные роботы или cobots), которые могут выполнять множество задач. 2. Разработка модульных систем, где можно легко заменять или добавлять модули в зависимости от потребностей производства
Сложности в программировании и управлении	<ol style="list-style-type: none"> 1. Инвестиции в обучение сотрудников, включая курсы по программированию и управлению роботами. 3. Использование визуальных языков программирования, которые упрощают процесс создания программ для роботов.
Сопротивление со стороны сотрудников	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проведение встреч с работниками для объяснения преимуществ автоматизации: повышение производительности, улучшение условий труда и возможность сосредоточиться на более сложных задачах. 2. Вовлечение сотрудников в процесс внедрения ИРПЯ, чтобы они чувствовали себя частью изменений.

Проблема	Способы решения
Организационные проблемы	
Нехватка квалифицированных кадров	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сотрудничество с университетами и техническими колледжами для создания учебных программ по робототехнике. 2. Создание программ стажировок и практики для студентов, чтобы привлечь их в компанию.
Экономические проблемы	
Высокие первоначальные инвестиции	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поэтапное внедрение: начать с пилотного проекта на одной линии или участке, чтобы продемонстрировать эффективность перед масштабированием. 2. Исследование возможностей финансирования через государственные программы поддержки инноваций.
Неопределенность в расчетах ROI	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проведение детального анализа затрат и выгод (СВА), включая сценарные прогнозы на основе исторических данных. 2. Использование KPI для мониторинга эффективности РПЯ после внедрения, что поможет корректировать стратегию.
Логистические проблемы	
Организация эффективной логистики внутри ячейки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оптимизация планировки производственного процесса с учетом потоков материалов. 2. Внедрение автоматизированных транспортных систем (AGV) для перемещения материалов между рабочими станциями.
Проблемы с обслуживанием и ремонтом оборудования	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разработка графиков профилактического обслуживания на основе данных о производительности. 2. Создание команды быстрого реагирования на неисправности с четкими протоколами ремонта.
Информационные проблемы	
Недостаток данных для принятия решений	<ol style="list-style-type: none"> 1. Внедрение IoT-технологий для сбора данных о работе оборудования в реальном времени. <p>Использование аналитических платформ для обработки собранных данных и выявления узких мест.</p>
Безопасность данных и киберугрозы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Реализация многоуровневых систем безопасности, включая шифрование данных и регулярные обновления ПО. Обучение сотрудников основам кибербезопасности для повышения общей осведомленности о рисках.

Помимо этого, процесс преобразования сырья, материалов и технологий в готовую продукцию – это комплексный, многоэтапный процесс, от которого напрямую зависит благосостояние граждан и суверенитета государства на мировой арене [54]. Сильный производственный сектор является залогом устойчивого экономического развития, ведь способствует росту валового внутреннего продукта, обеспечивает занятость миллионов людей и позволяет стране экспортировать товары.

По данным статистики (рисунок 1.26) в 2013 году в России было относительно небольшое количество промышленных роботов. По оценкам, их число составляло несколько тысяч.

По прогнозам экспертов к 2030 году количество роботов может значительно возрасти — до 50-100 тысяч и более, в зависимости от темпов развития технологий и уровня внедрения автоматизации в различных отраслях.

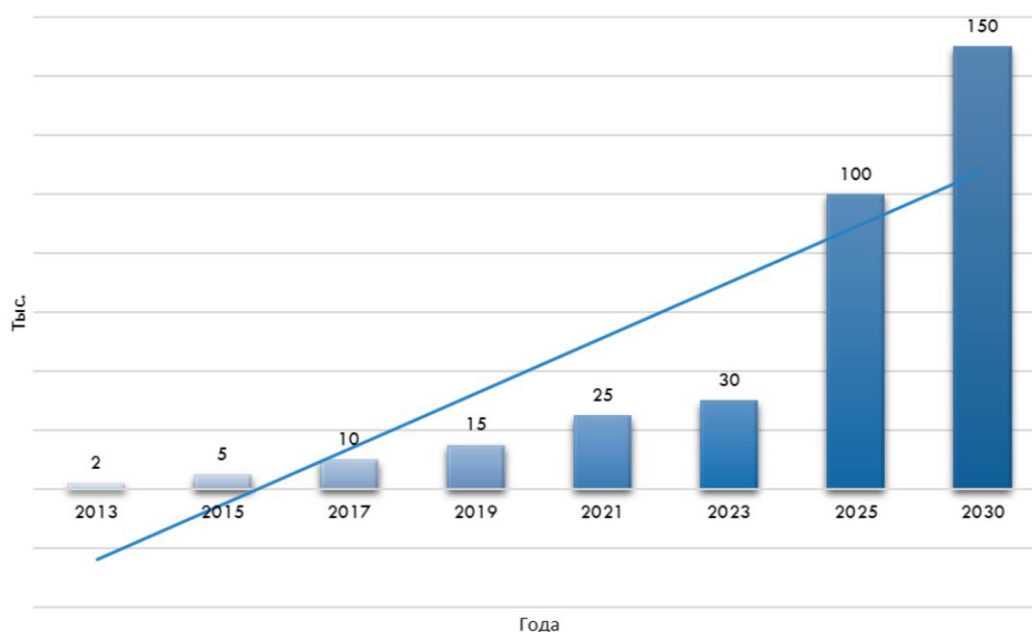


Рисунок 1.26 Статистика роботизации в РФ

Использовать промышленных роботов на производстве — выгодно. Сокращая затраты, они превосходят человеческие возможности: никогда не устают, не выгорают, не прокрастинируют, не допускают ошибок [55]. Выполняют высокотехнологичные операции, заменяя человека на опасной и вредной работе.

Создание интеллектуальных роботизированных производственных ячеек — это сложный и многогранный процесс, который требует комплексного подхода к решению возникающих проблем. Успех зависит от правильного выбора технологий, возможным изменением конструкции изделия (перепроектирование), согласно требованиям ртк активного вовлечения

сотрудников, грамотного управления изменениями и постоянного мониторинга результатов [56]. Применение предложенных решений поможет минимизировать риски и обеспечить успешное внедрение ИРПЯ в производственные процессы любой промышленности.

Далее рассмотрим проблемы создания ИРПЯ на предприятиях.

1.3.3 Проблемы создания ИРПЯ для CUBESAT на предприятиях

Создание ИРПЯ для сборки CUBESAT сталкивается с комплексом взаимосвязанных барьеров, которые носят технологический, экономический и организационный характер [57]. Анализ выявил следующие ключевые проблемы:

- 1) Технологические проблемы (таблица 1.12);

Таблица 1.10 - Технологические проблемы

Проблема	Причины	Примеры последствий
Несовместимость оборудования	Разные интерфейсы роботов (KUKA vs Fanuc), протоколы связи (Modbus vs CANopen)	Простой при интеграции: до 40 часов
Дефицит точных сенсоров	Системы технического зрения не распознают микрокомпоненты (SMD 0402)	Брак пайки: 12–15% (Tyvak, 2022)
Сложность интеграции с legacy-системами	Отсутствие API для MES-систем 1990-х годов	Ручной ввод данных: +2 ч/аппарат
Неготовность инфраструктуры	Низкая мощность сетей (требуется 380В), отсутствие виброзащиты	

- 2) Экономические проблемы: Стоимость базовой ИРПЯ для CUBESAT 12U: \$3.2–4.5 млн (роботы KUKA + ПО + оснастка) и срок окупаемости: 5–7 лет при производстве <50 аппаратов/год (неприемлемо для стартапов).

Так же в экономические проблемы относятся и скрытые расходы (таблица 1.13).

Таблица 1.11 - Скрытые расходы

Статья	Стоимость	Доля в CAPEX
Перепланировка цеха	2000–4000k	12%
Обучение персонала	1500–2500k	8%
Сертификация безопасности	1000–1800k	5%

Помимо экономических проблем, существуют еще и кадровые, организационные проблемы:

1) Дефицит компетенций. ROS Industrial. Владеют лишь 18% инженеров, цифровыми двойниками 5% специалистов, которые умеют настраивать симуляции в Siemens NX;

2) Сопротивление персонала. Страх автоматизации имеют 67% технологов, которые считают роботов угрозой рабочим местам;

3) Управленческие ошибки. Отсутствие «дорожной карты» внедрения - дублирование функций (роботы и ручной труд выполняют одну работу).

Исходя из данного анализа была сформирована схема коренных причин проблем (рисунок 1.27).

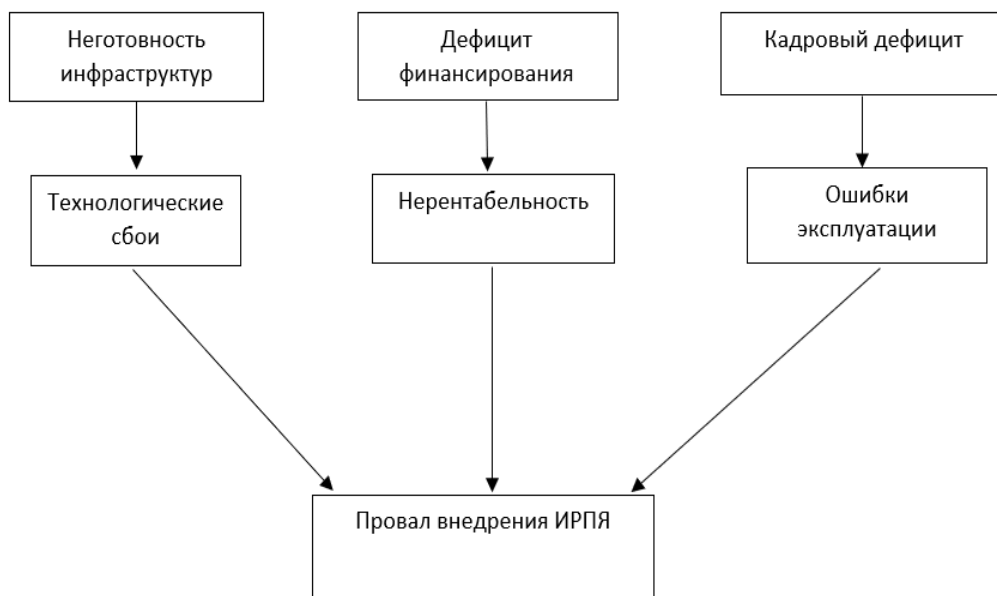


Рисунок 1.27 – Коренные причины проблем

Успешное внедрение ИРПЯ требует системного подхода, учитывающего не только выбор роботов, но и модернизацию инфраструктуры, подготовку кадров и адаптацию нормативной базы [58]. Эти задачи станут основой для разработки методики интеграции в 3 главе диссертации.

1.3.4 Разница ПУ и ИРПЯ

Исходя из информации в пунктах 1.1.1-1.3.3 были сформированы следующие выводы:

1) Уровень автоматизации и интеллектуализации между обычными производственными участками и интеллектуальными роботизированными производственными ячейками существенно отличаются (таблица 1.14);

Таблица 1.12 - Отличие ПУ и ИРПЯ

Критерий	Обычный участок	ИРПЯ
Управление процессами	Ручное/полуавтоматическое (ЧПУ)	AI-планирование + динамическая адаптация
Контроль качества	Выборочный визуальный осмотр	100% автоматический контроль (CV + ИИ)
Обратная связь	Отсутствует или постфактум	Реальное время с коррекцией параметров

2) Помимо автоматизации и интеллектуальности разница существует и между гибкостью и адаптивностью ячеек к времени переналадки, работе с вариациями, масштабируемостью (таблица 1.15);

Таблица 1.13 - Сравнение гибкости и адаптивности

Параметр	Обычный участок	ИРПЯ
Переналадка	2–5 дней (механическая перестройка)	1–4 часа (цифровая реконфигурация)
Работа с вариациями	Только типовые конструкции	Любые модификации (через цифровой двойник)
Масштабируемость	Линейное увеличение мощностей	«Клонирование» ячеек за 24 часа

3) Так же присутствует разница и в технологической оснащенности (таблица 1.16);

Таблица 1.14 - Технологическая оснащенность

Компонент	Обычный участок	ИРПЯ
Роботы	Стационарные (KUKA, Fanuc)	Коллаборативные (KUKA LBR iiwa)
Сенсоры	Минимальный набор (энкодеры)	IoT-сеть (вибродатчики, термокамеры)
ПО	Локальные САМ-системы	Цифровой двойник + облачная аналитика

4) В том числе и разница в экономике и эффективности (таблица 1.17);

Таблица 1.15 - Экономика и эффективность

Показатель	Обычный участок	ИРПЯ
CAPEX	\$0.5–1.2 млн	\$3–5 млн

Показатель	Обычный участок	ИРПЯ
OPEX (12U CubeSat)	\$120 тыс. (68% — зарплаты)	\$65 тыс. (22% — обслуживание)
Окупаемость	1–2 года	3–5 лет
Годовая производительность	20–30 шт.	80–120 шт.

5) Помимо всех вышеперечисленных критериев, последними являются безопасность и кадры (таблица 1.18);

Таблица 1.16 - Безопасность и кадры

Аспект	Обычный участок	ИРПЯ
Роль человека	Основной исполнитель	Надзор и стратегическое управление
Травматизм	12 случаев/1000 ч (пайка, сборка)	0.3 случая/1000 ч
Требуемые навыки	Ручной труд + чтение чертежей	Программирование, AI-анализ данных

Проведенный анализ позволил выявить системные ограничения традиционных методов сборки CUBESAT, которые препятствуют переходу к серийному производству и повышению надежности аппаратов. Основные результаты:

1) Ключевые проблемы традиционных подходов заключаются в технологической архаичности. 82% операций требуют ручного труда, что приводит к высокой себестоимости (1200–1500 тыс./аппарат) и рискам человеческого фактора (23% отказов на орбите). Также проблемы в низкой воспроизводимости. Разброс параметров сборки (до 15% по крутящему моменту крепежа) увеличивает время тестирования на 30% и конструктивной неготовности к автоматизации [59]. 37% компонентов CUBESAT имеют

нестандартные интерфейсы, непригодные для роботизированного монтажа. Средний индекс технологичности существующих конструкций — 58/100;

2) Экономические и рыночные ограничения заключаются в низкой рентабельности при малых сериях (<50 шт./год). CAPEX для роботизации (30–50 млн) окупается только при производстве >100 аппаратов/год и росте конкуренции. К 2027 году 70% рынка CUBESAT займут компании с автоматизированными линиями (прогноз Euroconsult);

3) Технологические барьеры заключаются в дефиците точного оборудования. Промышленные роботы (± 0.1 мм) не соответствуют требованиям сборки CUBESAT (± 0.05 мм) и отсутствуют цифровые решения. Только 12% предприятий используют цифровые двойники для верификации процессов (анализ ESA, 2023).

Научные и практические выводы связаны с необходимостью роботизации, которая обуславливается экспоненциальным ростом рынка аппаратов, ужесточением требований к надежности [60]. Критически важно подметить что требуется перепроектирование конструкции под автоматизацию, разработать специальную ИРПЯ и за счет этих действий повысится производительность и снизится себестоимость продукции на 35%.

1.4 Выводы по главе 1

Проведенный в первой главе анализ выявил системные ограничения традиционных методов сборки МКА НК типа CUBESAT. Традиционные организационно-технологические методы сборки CUBESAT достигли предела своей эффективности и для перехода к серийному роботизированному 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. Эти проблемы делают невозможным переход к серийному производству CUBESAT, требуемому

растущим рынком (2,500 аппаратов/год к 2027). Для их преодоления необходима трансформация подходов к проектированию, что станет основой второй главы.

2 РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНО КЛАССА ТИПА CUBESAT ПОД ВОЗМОЖНОСТИ СЕРИЙНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

2.1 Оценка технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки

2.1.1 Разработка критериев оценки технологичности конструкции малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки.

Разработка критериев направлена на обеспечение совместимости конструкции CUBESAT с требованиями автоматизированного производства. Система оценки включает 4 группы параметров, прошедших апробацию в различных проектах Skoltech и ESA.

1) Конструктивные критерии (таблица 2.1);

Таблица 2.1 - Конструктивные критерии

Параметр	Методика оценки	Целевое значение	Пример для CUBESAT 12U
Коэффициент унификации	Доля стандартизированных компонентов (%)	$\geq 85\%$	92% (Tyvek Intl., 2023)
Модульность	Время замены модуля (мин)	≤ 15	8 мин (Skoltech, тест платформы)
Доступность зон монтажа	Число «слепых» зон для робота	0	2 зоны → доработка конструкции

Параметр	Методика оценки	Целевое значение	Пример для CUBESAT 12U
Совместимость крепежа	Тип креплений (стандарт)	ISO 4762, DIN 912	Замена кастомных винтов на ISO

Конструкция корпуса CUBESAT 12U компании Planet Labs получила оценку 78/100 из-за нестандартных креплений солнечных панелей.

2) Технологические критерии (таблица 2.2);

Таблица 2.2 - Технологические критерии

Параметр	Метрика	Оптимальный диапазон	Измерительный инструмент
Точность позиционирования	Допуск (мм)	± 0.05	Лазерный трекер FARO

Роботизированный монтаж антенны в Sierra Nevada потребовал увеличения монтажных отверстий с 2 мм до 3 мм для компенсации погрешностей (± 0.07 мм \rightarrow ± 0.03 мм).

3) Экономические критерии (таблица 2.3);

Таблица 2.3 - Экономические критерии

Параметр	Формула	Целевое значение	Пример расчета
ROI автоматизации	$(\text{Экономия}/\text{Затраты}) \times 100\%$	$\geq 120\%$ за 3 года	$(\$2.5 \text{ млн}/\$2 \text{ млн}) \times 100\% = 125\%$

Внедрение ИРПЯ в РКК "Энергия" снизило себестоимость 12U CUBESAT на 35% при ROI 140% за 4 года.

4) Эксплуатационные критерии (таблица 2.4);

Таблица 2.4 - Эксплуатационные критерии

Параметр	Метод оценки	Норматив
Ремонтопригодность	Время диагностики неисправности (мин)	≤ 30
Стойкость к вибрациям	Частота резонанса (Гц)	≥ 100

Далее была разработана интегральная оценка технологичности, которая представлена на рисунке 2.1.

<i>Оценка технологичности и расчет интегрального показателя</i>			
<i>№</i>	<i>Критерий</i>	<i>Формула</i>	<i>Пример расчета, значение</i>
<i>K1</i>	<i>Коэффициент унификации компонентов</i>	$K_{\text{унификации}} = (N_{\text{стандартных}} / N_{\text{общих}}) * 100$	> 100
<i>K2</i>	<i>Коэффициент стандартизации крепежных элементов</i>	$K_{\text{стандартных к.э}} = (N_{\text{стандартных к.э}} / N_{\text{общих}}) * 100$	> 100
<i>K3</i>	<i>Модульность</i>	$K_{\text{модульность}} = (15 / \text{время замены комп.}) * 100$	время замены < 15 мин
<i>K4</i>	<i>Доступность зон</i>	$K_{\text{зоны}} = 100$, если слепые зоны = 0; иначе 0	100
<i>K5</i>	<i>Точность</i>	$K_{\text{точность}} = 10,05 / \text{точность позиционирования} * 100$	> 100
<i>K6</i>	<i>ROI</i>	$K_{\text{roi}} = (\text{roi} / 1,2) * 100$	> 100
<i>K7</i>	<i>Ремонтопригодность</i>	$K_{\text{ремонт}} = (30 / \text{время ремонта}) * 100$	> 100
<i>K8</i>	<i>Стойкость</i>	$K_{\text{стойкость}} = (\text{резонансная частота} / 100) * 100$	> 100 Гц

Рисунок 2.1 - Коэффициенты оценки технологичности конструкции
МКА НК типа CUBESAT

- коэффициент унификации компонентов (K1) рассчитывается по формуле (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 (формула 1);

- 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 (формула 2).

- 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 $ROI_{\text{факт}}$ – фактический возврат на инвестиции (в процентах), а 120% – минимальный приемлемый уровень окупаемости для проектов роботизации в космической отрасли (формула 3);

- коэффициент ремонтпригодности (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 (формула 4);

- 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 (формула 5).

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

$$K_{\text{мод}} = \frac{15}{N_{\text{мод}}} \times 100 \quad (2)$$

$$K_{\text{roi}} = \frac{ROI_{\text{факт}}}{120} \times 100 \quad (3)$$

$$K_{\text{рем}} = \frac{30}{T_{\text{диаг}}} \times 100 \quad (4)$$

$$K_{\text{стойк}} = \frac{f_{\text{рез}}}{100} \times 100 \quad (5)$$

На их основе был разработан интегральный показатель технологичности конструкции (ИТК), который рассчитывается по формуле 6:

$$\begin{aligned} \text{ИТК} = & 0,2 \times K1 + 0,2 \times K2 + 0,15 \times K4 + 0,1 \times K5 + \\ & + 0,1 \times K6 + 0,05 \times K7 + 0,05 \times K8 \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты весомости назначены экспертным методом и характерны для объекта исследования. Так же были установлены пороговые значения ИТК:

ИТК \geq 80 баллов — конструкция пригодна для роботизации;

ИТК $<$ 60 баллов — требуется редизайн.

Данные критерии и расчеты можно применять на этапах эскизного проектирования, при подборе компонентов и перед передачей в производство.

После формирования коэффициентов и формулы расчета интегрального показателя требуется разработать алгоритм оценки технологичности.

2.1.2 Разработка алгоритма оценки технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CubeSat под возможности серийной роботизированной сборки по разработанным критериям [61].

В данном параграфе работы 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 2.2).

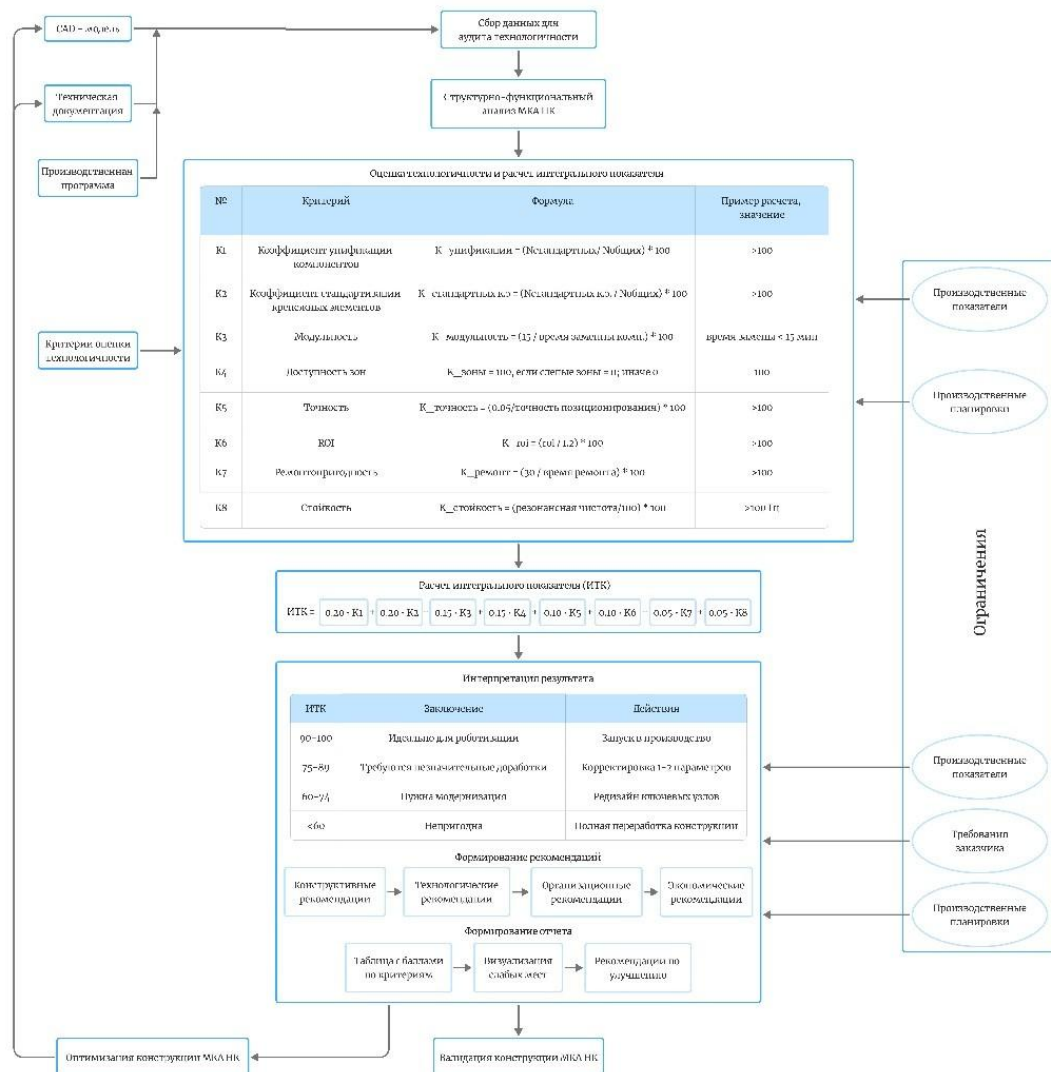


Рисунок 2.2 - Структурная схема алгоритма оценки технологичности конструкции МКА НК типа CUBESAT

Входными данными используются параметры конструкции CUBESAT, а выходом — интегральная оценка технологичности. Нужно учитывать все критерии и их значимость, чтобы алгоритм был объективным.

Первый шагом является сбор данных. Затем эти данные должны быть преобразованы в численные значения для каждого критерия.

Далее, каждый критерий оценивается по своей методике. Например, коэффициент унификации — это процент стандартных компонентов. Если в конструкции 90% стандартных деталей, это значение будет использоваться в расчетах. Важно учесть значимость каждого критерия, которые были определены ранее (например, 0.3 для унификации, 0.25 для точности и т.д.).

После оценки каждого критерия нужно объединить их в интегральный показатель. Формула уже была предложена в предыдущем параграфе.

Затем необходимо определить, проходит ли конструкция пороговое значение. Если ИТК ≥ 80 , конструкция пригодна для роботизации. Если меньше, требуется доработка. Также предусмотрено формирование отчета с рекомендациями по улучшению конструкции.

Алгоритм включает проверку на соответствие каждому критерию. Например, даже если общий балл высокий, но какой-то отдельный критерий не соответствует нормативу (например, наличие "слепых" зон для робота), это отражается в отчете.

Алгоритм позволяет количественно оценить, насколько конструкция CUBESAT адаптирована к автоматизированному производству.

Первым шагом является сбор параметров конструкции:

- 1) САD-модель аппарата;
- 2) Техническая документация (крепления, материалы, интерфейсы);
- 3) Данные о производственных операциях (время сборки, себестоимость).

Вторым шагом является оценка критериев по шкале 0-100 баллов (таблица 2.5)

Таблица 2.5 - Критерии оценки

Критерий	Формула/Логика	Пример расчета
Коэффициент унификации компонентов	$K_{\text{унификация}} = (\text{standard_components_ratio} / 0.85) * 100$	$(0.92 / 0.85) * 100 = 108 \rightarrow 100$
Коэффициент стандартных крепежных элементов	$K_{\text{станд}} = (\text{standard_components_ratio} / 0.85) * 100$	$(0.92 / 0.85) * 100 = 108 \rightarrow 100$
Модульность	$K_{\text{модульность}} = (15 / \text{module_replacement_time}) * 100$	$(15 / 8) * 100 = 187.5 \rightarrow 100$
Доступность зон	$K_{\text{зоны}} = 100, \text{ если } \text{blind_zones} = 0; \text{ иначе } 0$	100
Точность	$K_{\text{точность}} = (0.05 / \text{positioning_accuracy}) * 100$	$(0.05 / 0.04) * 100 = 125 \rightarrow 100$
ROI	$K_{\text{roi}} = (\text{roi} / 1.2) * 100$	$(1.25 / 1.2) * 100 = 104 \rightarrow 100$
Ремонтопригодность	$K_{\text{ремонт}} = (30 / \text{repair_time}) * 100$	$(30 / 25) * 100 = 120 \rightarrow 100$
Стойкость	$K_{\text{стойкость}} = (\text{resonance_freq} / 100) * 100$	$(105 / 100) * 100 = 105 \rightarrow 100$

Третьим шагом является нормирование баллов, согласно ограничению максимального значения до 100 баллов.

Четвертым шагом является расчет интегрального показателя (ИТК).

Например:

$$\text{ИТК} = 0.3 * 100 + 0.25 * 100 + \dots = 100$$

Пятым шагом является интерпретация результата (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Интерпретация результата

Диапазон ИТК	Заключение	Действия
90–100	Идеально для роботизации	Запуск в производство
75–89	Требуется незначительная доработка	Оптимизация 1-2 параметров
60–74	Нужна модернизация	Редизайн ключевых узлов
<60	Непригодна для автоматизации	Полная переработка конструкции

Например, ИТК = 100 → Конструкция готова к роботизированной сборке.

Шестым шагом является формирование отчета, который в себя включает:

- 1) Таблицу с баллами по критериям;
- 2) Визуализацию слабых мест (например, radar-чарт);
- 3) Рекомендации по улучшению (если ИТК < 90).

Например:

- 1) Заменить кастомные крепления антенн на стандартные (ISO 4762);
- 2) Увеличить резонансную частоту корпуса до 110 Гц.

Седьмым шагом является интеграция с САД-системами.

Для демонстрации практической адаптации конструкции был проведен анализ на примере российского МКА «АИСТ-СТ» (рисунок 2.3). Были предложены конкретные решения: переход к несущим панелям, унификация крепежа, разработка базовых плат для замены кабельной сети и создание специализированной оснастки для роботизированной сборки [62].

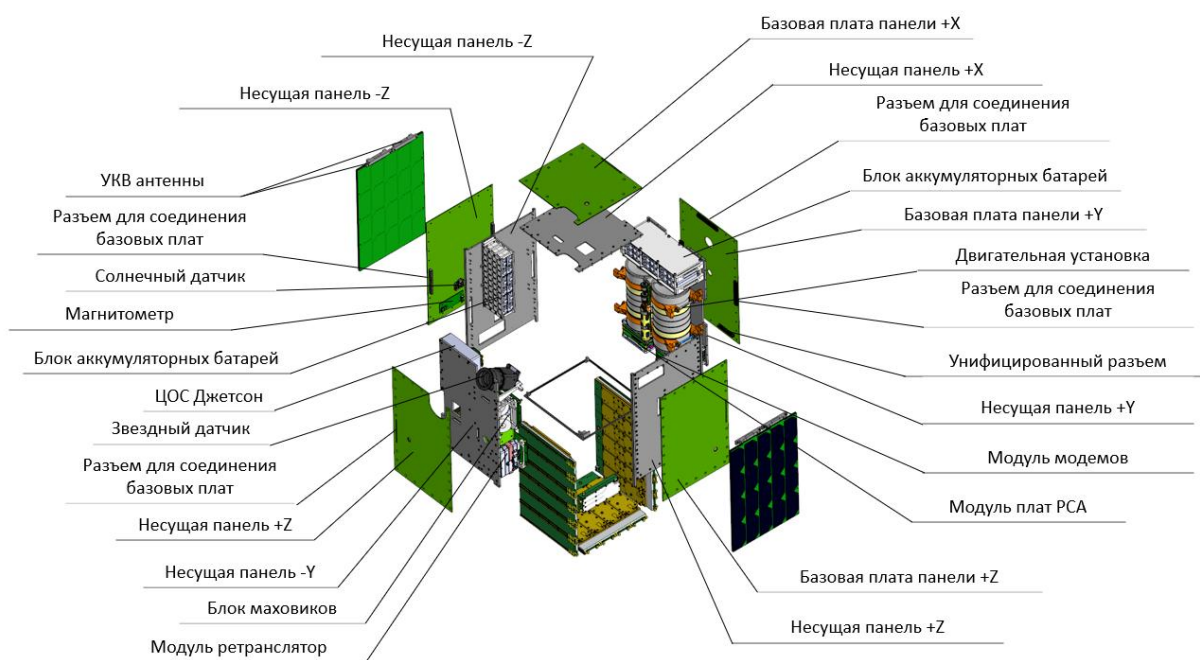


Рисунок 2.3 – Разнесённый вид МКА

В результате разработан алгоритм оценки технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки по разработанным критериям.

2.1.3 Разработка рекомендаций по повышению технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT под возможности серийной роботизированной сборки

Ранее были выявлены основные проблемы: зависимость от ручного труда, нестандартные интерфейсы, низкая воспроизводимость. Следовательно рекомендации должны быть направлены на устранение этих проблем.

- 1) Унификации компонентов. Это ключевой момент, так как стандартизация крепежей и модулей упрощает автоматизацию;
- 2) Модульность конструкции. Если аппарат разделен на независимые модули, это позволяет роботам собирать их отдельно, что ускоряет процесс;
- 3) Зоны доступа для роботов. Конструкция должна предусматривать достаточно места для манипуляторов, без "слепых" зон;
- 4) Точность позиционирования. Нужно использовать материалы с минимальным тепловым расширением и предусмотреть точные крепления;

5) Экономический аспект: снижение себестоимости через оптимизацию процессов;

6) Обучение персонала. Даже при автоматизации нужны специалисты, которые могут настраивать и обслуживать роботов.

В итоге рекомендации сформулированы конкретно, измеримо и направлены на решение конкретных проблем, выявленных в ходе исследования и представлены в таблицах 2.7-2.10.

Таблица 2.7 - Конструктивные рекомендации

Конструктивные рекомендации			
Мера	Цель	Пример реализации	Эффект
Стандартизация интерфейсов	Упрощение автоматического монтажа	Замена кастомных крепежей на ISO 4762	Сокращение времени сборки на 25%
Модульная архитектура	Ускорение замены компонентов	Разделение на платформу и нагрузку	Время замены модуля: 8 мин → 5 мин
Увеличение зон доступа	Исключение «слепых» зон	Фланцы для роботов (зазор ≥ 15 мм)	Снижение ошибок позиционирования на 40%

Таблица 2.8 - Технологические рекомендации

Технологические рекомендации		
Мера	Инструменты	Эффект
Внедрение цифровых двойников	Siemens NX, ANSYS	Сокращение числа физических тестов на 60%
Использование ИИ-контроля	Cognex VisionPro + нейросети	Обнаружение 99.8% дефектов

Технологические рекомендации		
Мера	Инструменты	Эффект
Оптимизация материалов	Углепластик с нулевым ТКР	Точность позиционирования ± 0.03 мм

Таблица 2.9 - Организационные рекомендации

Организационные рекомендации		
Мера	Действия	Результат
Обучение персонала	Курсы по ROS Industrial и CAD	Сокращение времени переналадки на 30%
Внедрение гибридных процессов	Cobots + ручной труд для сложных узлов	Себестоимость: \$85k \rightarrow \$70k
Создание библиотеки решений	Библиотека CAD-моделей в Creo	Ускорение проектирования на 50%

Таблица 2.10 - Экономические рекомендации

Экономические рекомендации		
Мера	Формула	Эффект
Поэтапное внедрение ИРПЯ	CAPEX: \$3 млн \rightarrow \$1.5 млн/этап	ROI: 3 года \rightarrow 2 года
Государственные субсидии	Возмещение 50% затрат (программа ФРП)	Снижение финансовой нагрузки
Аутсорсинг компонентов	Закупка стандартных модулей у партнеров	Себестоимость: -20%

Практические шаги для внедрения сформированы в следующем виде

1) Аудит текущей конструкции: Расчет ИТК по алгоритму (минимальный порог — 75 баллов);

2) Приоритизация изменений. Начать с стандартизации крепежей и устранения «слепых» зон;

3) Пилотная роботизация. Автоматизация 1–2 операций (например, пайка плат);

4) Масштабирование. Постепенный переход на полный цикл ИРПЯ.

Благодаря данным рекомендациям по повышению технологичности конструкций малых космических аппаратов nano класса типа CubeSat под возможности серийной роботизированной сборки сформированы ожидаемые результаты (таблица 2.11).

Таблица 2.11 - Результаты

Параметр	Текущее значение	Целевое значение
Время сборки	300 ч	100 ч
Себестоимость	\$120k	\$65k
Доля брака	15%	<2%
ROI	70% за 5 лет	120% за 3 года

Реализация данных рекомендаций позволит сократить цикл сборки CUBESAT в 3 раза, увеличить рентабельность производства на 50% и занять лидирующие позиции на рынке к 2027 году.

2.1.4 Разработка структурной схемы методики оценки технологичности

Первым делом нужно определить основные этапы методики. На основе предыдущих обсуждений, можно выделить следующие шаги: сбор данных о конструкции, оценка критериев технологичности, расчет интегрального показателя, интерпретация результатов и формирование рекомендаций.

Важно структурировать эти этапы в логической последовательности. Начинается все с ввода данных о конструкции CUBESAT. Это включает CAD-модели, техническую документацию и параметры сборки. Затем следует этап анализа по различным критериям: конструктивным, технологическим, экономическим и эксплуатационным [63].

После оценки каждого критерия необходимо нормировать полученные баллы, чтобы привести их к единой шкале. Затем рассчитывается интегральный показатель технологичности (ИТК) с учетом значимости коэффициентов для каждого критерия.

Далее нужно предусмотреть интерпретацию результатов ИТК, чтобы определить, требуется ли доработка конструкции. В зависимости от полученного балла, система должна предоставлять рекомендации по улучшению.

Также стоит включить этап интеграции с САД-системами для автоматизации процесса оценки. Это позволит инженерам сразу видеть проблемные зоны в модели и вносить коррективы.

Визуализация схемы важна для наглядности. Можно использовать блок-схему с указанием последовательности этапов и связей между ними.

Также важно учесть возможность адаптации методики под разные модели CUBESAT и различные производственные условия. Структурная схема должна быть гибкой и модульной, позволяющей добавлять новые критерии или изменять коэффициенты значимости в зависимости от специфики проекта.

В итоге, структурная схема станет руководством для инженеров и разработчиков, помогая систематизировать процесс оценки и оптимизации конструкций для роботизированной сборки. Это повысит эффективность производства и снизит риски ошибок, связанных с человеческим фактором.

Далее представлен более подробно первый этап, сбор входных данных:

- 1) САД-модель (Компас) с указанием иабаритов, крепежных элементов, зон доступа, Материалов и допусков;
- 2) Техническая документация с временем сборки, себестоимости, данных об отказах;
- 3) Параметры ИРПЯ, а именно точность роботов (± 0.05 мм), зону досягаемости.

Далее проводится второй этап, связанный с оценкой и подсчетом критериев технологичности.

Следующим этапом является нормирование баллов с точки зрения лимитирования - Максимальный балл равен 100.

Далее происходит расчет интегрального показателя (ИТК).

Интерпретация результата представлена в таблице 2.12.

Таблица 2.12 - Интерпретация результата

ИТК	Заключение	Действия
90–100	Идеально для роботизации	Запуск в производство
75–89	Требуются незначительные доработки	Корректировка 1–2 параметров
60–74	Нужна модернизация	Редизайн ключевых узлов
<60	Непригодна	Полная переработка конструкции

Далее происходит формирование рекомендаций с помощью автоматической генерации.

Например, рекомендации для CUBESAT 12U «X» (ИТК=82):

- 1) Стандартизировать 15% нестандартных компонентов;
- 2) Добавить фланцы для доступа робота к зоне монтажа антенн;
- 3) Оптимизировать резонансную частоту корпуса до 100 Гц.

В результате, данная методика позволяет системно оценивать и оптимизировать как существующие конструкции CUBESAT, так и вновь разрабатываемые платформы для последующей роботизированной сборки, применяя разработанные требования и ограничения технологичности конструкции и учитывая требования и ограничения, предъявляемые заказчиков [64].

2.1.5 Разработка требований и ограничений к технологическим процессам при сборке МКА НК типа CUBESAT

Активное развитие рынка малых космических аппаратов (МКА) нано класса, таких как CUBESAT, требует перехода от штучного производства к серийному. Однако существующие технологии сборки сталкиваются с рядом ограничений, которые препятствуют эффективной роботизации процессов.

Анализ этих ограничений критически важен для разработки конкурентоспособных решений, способных обеспечить высокую точность, воспроизводимость и экономическую целесообразность.

В таблице 2.13 систематизированы ключевые технологические операции, их ограничения, а также причины и последствия для производственного цикла.

Результат этого анализа служит основой для формирования стратегии модернизации процессов и конструкций, направленной на интеграцию интеллектуальных роботизированных ячеек (ИРПЯ).

Таблица 2.13 - Требования и ограничения технологических операций при роботизированной сборке CUBESAT 12U

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. Низкая 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 механическим устройством	<ol style="list-style-type: none"> 1. Соответствие захватывающих губок геометрии детали; 2. Наличие поверхностей, базирующих деталь относительно робота; 3. Обеспечение защиты детали от механического повреждения; 4. Обеспечение контроля положения захватывающих губок. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничение по диапазону захватываемых размеров (размер пальцев захвата зачастую сопоставим размеру детали); 2. Невозможность захватывать хрупкие или мягкие объекты;

Роботизированная операция	Требования	Ограничения
		3. Не допускается деформация компонента в процессе транспортировки.
Завинчивание винтов автоматической отверткой	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется обеспечить точность контроля крутящего момента отвертки; 2. Требуется обеспечить соосность винта и ответной резьбовой части в допуске (не более 0.05мм), различном для разных диаметров винтов; 3. Требуется обеспечить контроль глубины и/или количества оборотов винта во время процесса завинчивания; 4. Шляпка винта должна быть с шестигранным внутренним отверстием под биту 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается закусывания или смятия резьбы во время выполнения процесса; 2. Жесткая привязанность отвертки к типу винта; 3. Не допускаются большие временные затраты на подбор винта из отдельного бункера (не более 10сек).
Роботизированная операция	Требования	Ограничения
Нанесение герметика на плоскости компонентов изделия	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечить контроль дозирования; 2. Необходимо обеспечить стабильное давление для предотвращения недоэкструзии; 3. Обеспечить постоянной скоростью движения робота по траектории (20-50 мм/с); 4. Требуется равномерная толщина слоя герметика, около 0,1-0,3 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Различная вязкость материалов; 2. Возможность затвердевания состава непосредственно в емкости; 3. Необходимость регулярной очистки системы; 4. Не допускается отклонение траектории нанесения более 0,5 мм.
Контроль системой технического зрения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение достаточной освещенность помещения, ячейки, рабочего места (500-1000 лк); 2. Обеспечение контрастности между контролируемым объектом и фоном; 3. Обеспечение стабильного положения робота и поверхности объекта в пространстве для высокоточного контроля; 4. Предусмотреть разрешение камеры не хуже 2-5 Мп для точного распознавания объектов. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Чувствительность к малейшим искажениям изображения; 2. Точность измерений зависит от характеристик разрешения камеры. 3. Не допускать вибраций конструкции, для предотвращения неточности контроля; 4. Для стабильного различения объекта нужно создать базу данных; 5. Высокая чувствительность к освещению при определении цвета;

Роботизированная операция	Требования	Ограничения
Позиционирование компонентов в стапелях	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие в стапеле базовых плоскостей и направляющих; 2. Требуется предусмотреть свободную область (не менее 20 мм с каждой стороны) вокруг установленного в стапель компонента, для беспрепятственного доступа робота. 3. Фиксация компонентов в стапеле; 4. Точность изготовления стапеля должна быть не более $\pm 0,1$. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость высокой точности изготовления стапеля; 2. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента и стапеля; 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40;
Позиционирование стапелей на сборочном столе	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие базирующих элементов на сборочном столе, которые будут осуществлять базирование с точностью не более 0.1 мм; 2. Требуется предусмотреть возможность быстрой установки и снятия стапель с помощью робота с вспомогательным инструментом; 3. Требуется предусмотреть свободную область (не менее 20 мм с каждой стороны) вокруг установленного на стол стапеля, для беспрепятственного доступа робота. 4. Стапель должен быть окрашен в белый или серый цвет 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Точность базирующих поверхностей не должна быть более 0.1 мм 2. Общая масса стапеля вместе с компонентами не должна превышать более 18 кг, с учетом захватывающего устройства робота; 3. Габаритные размеры стапеля не должны превышать габаритные размеры узла, который собирается в нем на 20 мм с каждой стороны
Базирование компонентов одной сборочной единицы (панели) друг относительно друга	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие базовых элементов на соединяемых деталях; 2. Контроль взаимного положения с использованием технического зрения; 3. Возможность свободного доступа захвата робота к компоненту (зазоры между компонентами не менее 20 мм); 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Трудность установки компонентов в замкнутых областях; 2. Точность базирующих поверхностей не должна быть более 0.1 мм
Базирование собранных панелей между собой	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие базирующих элементов на каждой панели; 2. Общая масса панели не более 20 кг, с учетом захвата; 3. Требуется обеспечить точность взаимного положения панелей не хуже 0,2 мм. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость высокой точности изготовления панелей; 2. Не допускаются деформации панели при сборке.

Роботизированная операция	Требования	Ограничения
Стыковка разъемов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Унифицированные и адаптированные под захват робота разъемы; 2. Наличие направляющих и компенсационных механизмов; 3. Наличие фиксаторов для предотвращения непреднамеренного отключения; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Трудность унификации разъемов, ввиду различий сетей по мощности и количестве проводников; 2. Не допускается загрязнение контактной группы в процессе стыковки; 3. Деформация корпуса разъема не более 0,5 мм.
Транспортировка компонентов в транспортировочной таре	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность захвата тары роботом; 2. Защита компонентов от механических повреждений; 3. Наличие маркировки для идентификации; 5. Требуется обеспечить устойчивость компонентов к вибрации при транспортировке; 6. Ограничить возможность смещения компонентов при транспортировке. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тара с перемещаемыми компонентами должна иметь массу не более 18 кг; 2. Габаритные размеры компонента не должны превышать 300x200x100мм
Транспортировка компонентов в сборочных стапелях	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие фиксации компонентов в стапелях; 2. Наличие в стапеле мест для захвата роботом; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стапель с перемещаемыми компонентами должен иметь массу не более 18 кг;
Нанесение термопасты	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечить контроль дозирования; 2. Необходимо обеспечить стабильное давление для предотвращения недоэкструзии; 3. Обеспечить постоянной скоростью движения робота по траектории (20-50 мм/с); 4. Требуется равномерная толщина слоя герметика, около 0,1-0,3 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Различная вязкость материалов; 2. Возможность затвердевания состава непосредственно в емкости; 3. Необходимость регулярной очистки системы;
Бесконтактный обмер компонентов (входной контроль)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие специального оснащения для закрепления компонентов; 2. Возможность измерения с высокой точностью (до 0,05 мм); 3. Требуется стабильное положение датчика и измеряемого объекта. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Чувствительность к отражающим поверхностям; 2. Различные габариты измеряемых компонентов; 3. Не допускается наличие теневых зон при сканировании компонента из-за выступающих элементов конструкции; 4. Необходима предварительная калибровка измерительной системы

Роботизированная операция	Требования	Ограничения
		перед выполнением контроля.
Бесконтактный обмер собранной панели	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется обеспечить возможность измерения крупного объекта с высокой точностью (до 0,1 мм); 2. Требуется обеспечить полный обзор панели системой измерения; 3. Требуется стабильное положение датчика и измеряемого объекта. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничение зоны измерения датчиков; 2. Не допускается наличие теневых зон при сканировании панели из-за выступающих элементов конструкции; 3. Необходима предварительная калибровка измерительной системы перед выполнением контроля.

Главным ограничением является несоответствие конструкций CUBESAT требованиям роботизации (63% проблем).

Проведенный анализ требований и ограничений технологических процессов при роботизированной сборке CUBESAT 12U выявил следующие ключевые проблемы:

- 1) Конструктивная неготовность;
- 2) Оборудование и ПО;
- 3) Экономические барьеры.

Данные выводы формируют основу для последующей разработки инструментария проектирования и организации ИРПЯ, что позволит вывести производство CUBESAT на качественно новый уровень.

Устранение выявленных ограничений — необходимое условие для массового производства CUBESAT, соответствующего требованиям современных космических миссий.

2.2 Адаптация конструкции под возможности роботизации

В данном параграфе рассматриваются ключевые аспекты модификации конструкции МКА, направленные на обеспечение совместимости с роботизированной сборкой. Анализируются требования к компонентам аппарата, включая стандартизацию интерфейсов, оптимизацию геометрии

деталей для захвата манипуляторами, а также выбор материалов и технологий, упрощающих автоматизированную обработку. Особое внимание уделяется вопросам модульности конструкции и унификации крепёжных элементов, что способствует снижению трудоёмкости операций и повышению гибкости производственного процесса [65]. Так же обосновывается необходимость комплексного подхода к проектированию, учитывающего как функциональные требования к космическому аппарату, так и технологические ограничения роботизированных систем. Приводятся примеры успешных решений в данной области. За пример был взят вновь разрабатываемый российский малый космический аппарат типа CubeSat «АИСТ-СТ», схема членения которого представлена на рисунке 2.4.

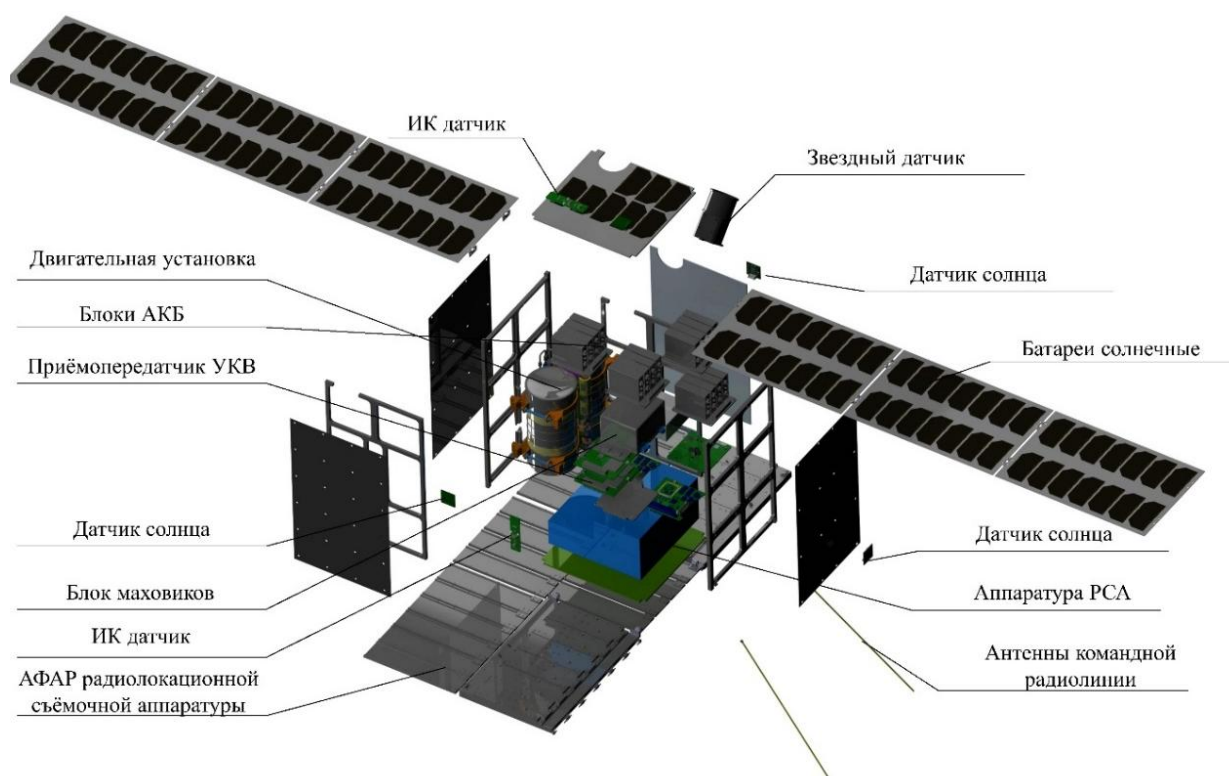


Рисунок 2.4 – Схема членения МКА «АИСТ-СТ»

Конструктивно-компоновочная схема МКА «АИСТ-СТ» должна разрабатываться с учётом необходимости обеспечения:

- 1) минимальных массовых и инерционных характеристик КА;
- 2) жёсткостных и прочностных характеристик, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым на всех участках эксплуатации КА;

- 3) центровочных характеристик, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к КА как к полезной нагрузке РН при их совместной эксплуатации и требованиям со стороны СУД на участке орбитального полёта;
- 4) свободного доступа к системам, приборам и агрегатам на этапах наземной эксплуатации, в том числе возможности демонтажа и повторного монтажа (замены) без демонтажа (минимальным демонтажем) рядом установленных приборов;
- 5) размещения БА с учётом выполнения требований, предъявляемых разработчиком;
- 6) размещения БА с учётом выполнения требований со стороны СОТР КА в части условий, необходимых для обеспечения теплового режима БА;
- 7) размещения БС требуемой площади с учётом принятой схемы функционирования КА на орбите;
- 8) необходимо обеспечить совмещение монтажных плоскостей бортовой аппаратуры космической платформы с элементами конструкции космической платформы с точностью, не хуже заданной;
- 9) необходимо обеспечить скрепление элементов космической платформы посредством винта с заданным усилием;
- 10) использование бортовой кабельной сети в конструкции космической платформы должно стремиться к минимуму;
- 11) конструкция платформы и последовательность её сборки должны обеспечить свободный доступ роботизированного манипулятора при монтаже бортовой аппаратуры;
- 12) размещения антенных устройств без затенения или с минимальными допустимыми затенениями диаграммы направленности антенного устройства.

Конструкция КА должна обеспечивать возможность проведения всех необходимых испытаний систем и приборов на заводе-изготовителе и

проверок на космодроме без снятия их с борта и без взаимовлияний, нарушающих их нормальную работу.

Конструкция КА должна обеспечивать возможность подключения контрольно-проверочной аппаратуры БА на время проведения испытаний.

Конструкция КА и его составных частей должна исключать возможность неправильной сборки (монтажа), а также состыковки электросоединителей.

Корпус МКА должен быть выполнен в соответствии с размерами по стандарту CUBESAT формата 12U.

2.2.1 Конструктивные решения по крепежу

Изначально разрабатываемый МКА предполагалось осуществлять с помощью ручной сборки. Благодаря этому в конструкцию было заложено несколько типов крепежа.

Данный крепеж не представляет проблем для ручной установки и сборки МКА. Но для роботизированной серийной сборки МКА, исходя из ранее сделанных выводов, такой крепеж не подходит. Было принято решение адаптировать количество крепежа с трех типов до одного, поменять конструкцию винтов в части головки под инструмент, вместо крестовой конфигурации использовать отверстие под шестигранник. Это позволит использовать один тип автоматической отвертки, предотвратить все возможные отказы, связанные с проворотом биты отвертки относительно крепежного элемента, повысить скорость сборки за счет использования одного бункера подачи винтов в жало автоматической отвертки [66].

2.2.2 Конструктивные решения по компонентам МКА

В связи с ограничениями, накладываемыми роботизированной автоматизированной сборкой, конструкция МКА «АИСТ-СТ» была изменена, базируясь на следующих основополагающих принципах:

- 1) переход от каркасных конструкций к несущим панелям для обеспечения работы робота;
- 2) сохранение масс и габаритов аппарата прототипа;
- 3) максимальное использование уже разработанных компонентов;

4) использование модульных узлов для сборки изделия, каждый узел может быть собран, испытан и передан на сборку отдельно;

5) адаптация блоков бортовой аппаратуры в части унификации разъёмов;

6) использование многослойных печатных базовых плат с целью сокращения использования бортовой кабельной сети.

Конструкция МКА «АИСТ-СТ» состоит из негерметичного корпуса и элементов общей сборки. Общий вид новой конструктивно-компоновочной схемы КА представлен на рисунке 2.5. Корпус КА представляет собой негерметичный отсек, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда.

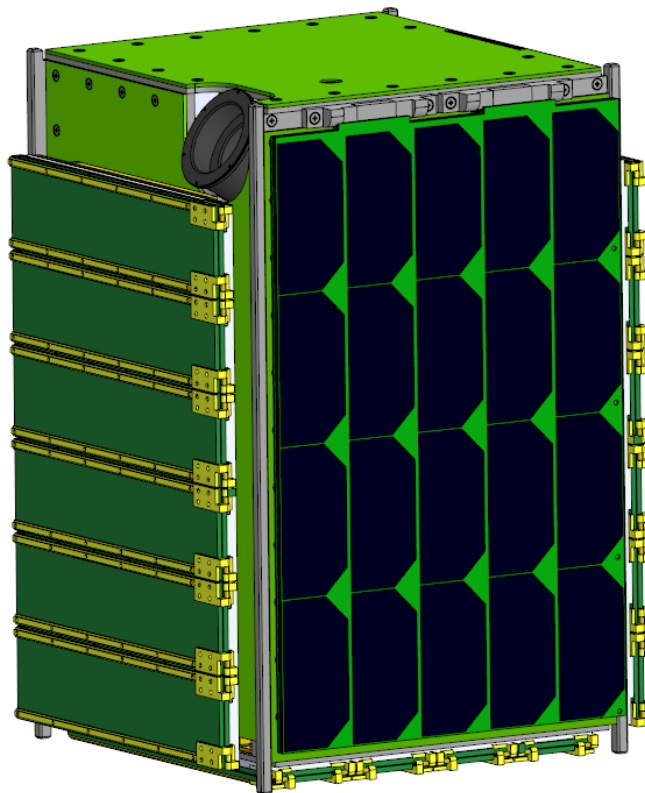


Рисунок 2.5– МКА в сборе

Корпус (рисунок 2.6) состоит из:

- несущих боковых стенок – 4 шт.;
- торцевой стенки – 1 шт.;
- базовых боковых плат – 4 шт.;
- торцевой базовой платы – 1 шт.

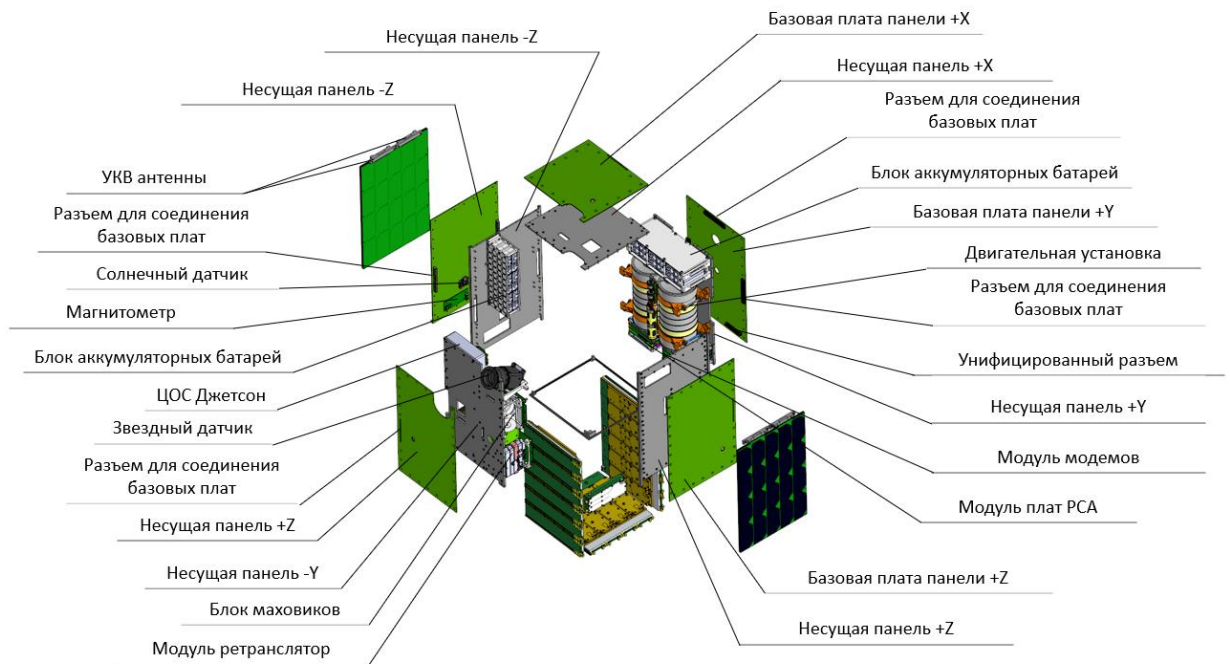


Рисунок 2.6 – Разнесённый вид МКА

Стенки являются силовыми элементами корпуса МКА, используются для размещения приборов систем МКА и обеспечивают необходимую жёсткость и теплопроводность конструкции. В несущих стенках предусмотрены закладные элементы для сборки МКА посредством однотипного винтового соединения и обеспечения достаточной жёсткости корпуса, а также элементы конструкции, обеспечивающие стыковку МКА с устройством отделения.

Резьбовые отверстия были вынесены на все монтажные блоки. Свободные отверстия в свою очередь были определены на несущих стенках. Это решение было принято из-за требований роботизированных комплексов и специального сборочного оборудования.

При отдельной роботизированной сборке стенок с компонентами также требуется предусмотреть применение технологического оснащения в виде ступеней, для точного позиционирования компонентов панели, а также несущей стенки, с точки зрения совпадения всех крепежных отверстий с свободными, ответными. Базирование всех компонентов должно осуществляться за счет оснастки (рисунок 2.7).

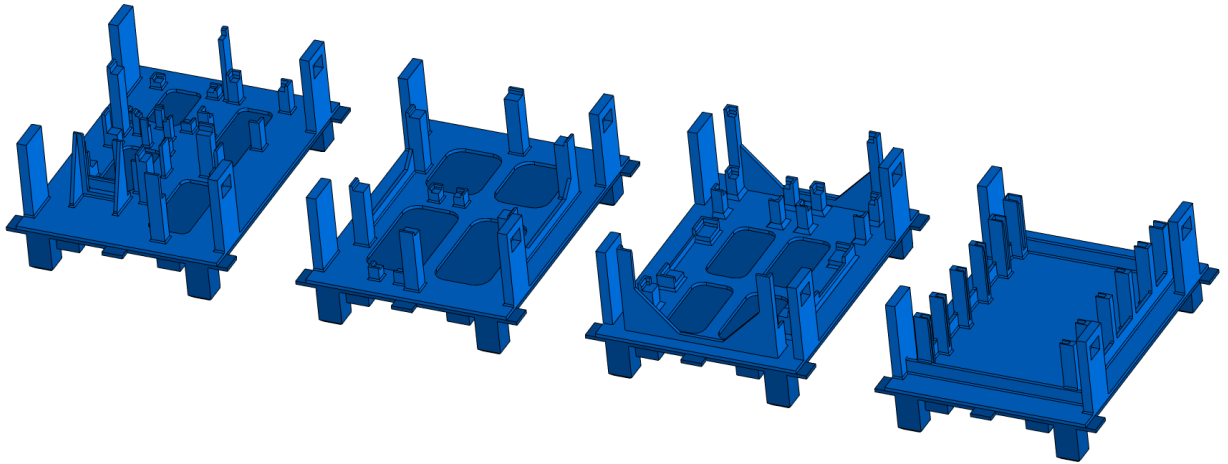


Рисунок 2.7 – Комплект ступеней с компонентами

Также в несущих стенках предусмотрены отверстия для обеспечения доступа к базовым платам и беспрепятственного прохождения разъёмов.

Монтаж базовой платы на несущую стенку осуществляется с помощью винтовых соединений. Резьбовое отверстие было определено располагать в стенке. Свободное в печатной плате БКС. При монтаже базовой платы установленные на ней разъёмы проходят сквозь отверстия в несущей стенке и соединяются с унифицированным разъёмом блока бортовой аппаратуры. Установленные на соответствующие стенки базовые платы имеют соединение друг другом, тем самым объединяя блоки бортовой аппаратуры в единую электрическую и информационную сеть на окончательных этапах сборки МКА.

Совокупность несущей стенки, базовой платы и блоков бортовой аппаратуры образуют соответствующие панели. На рисунке 2.8 представлены конструктивно-компоновочные схемы панелей МКА с описанием расположенной на них БА.

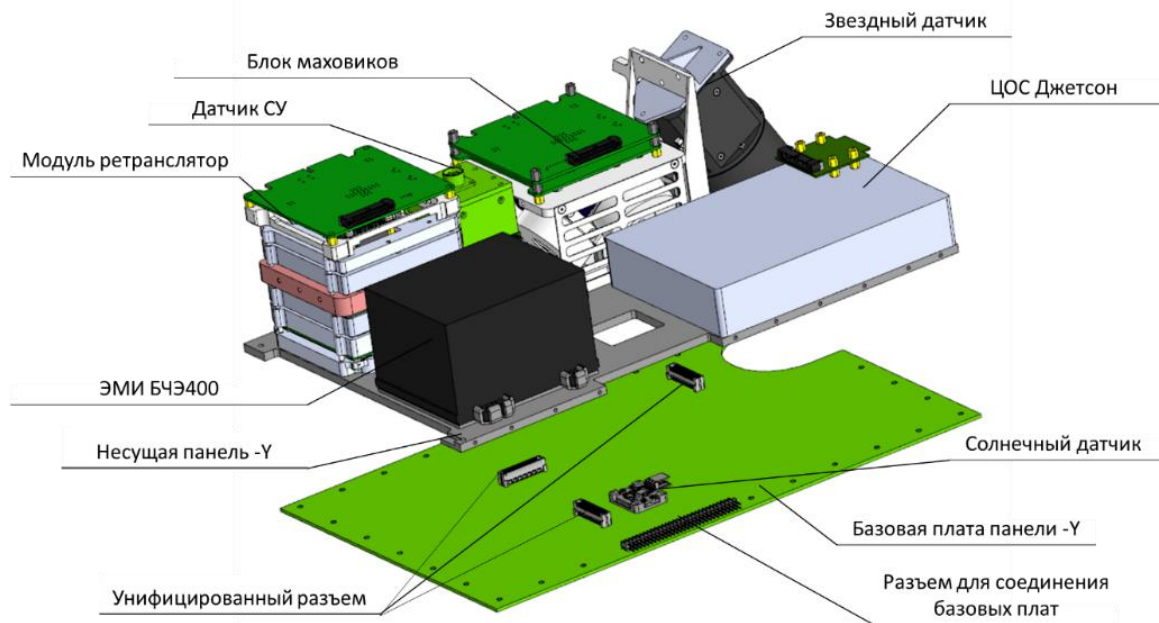


Рисунок 2.8 – Схема членения несущей панели

Благодаря таким решениям, конструкция несущих стенок подходит для серийной роботизированной их сборки. Далее рассмотрим конструктивные изменения БКС


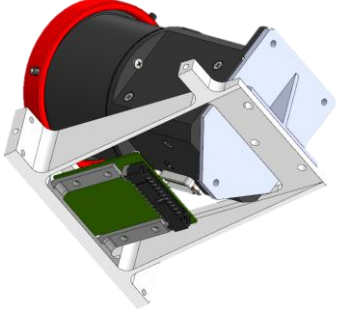

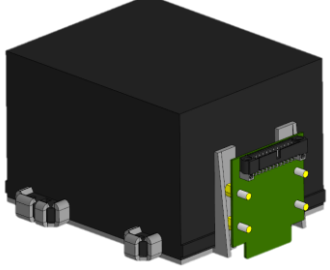
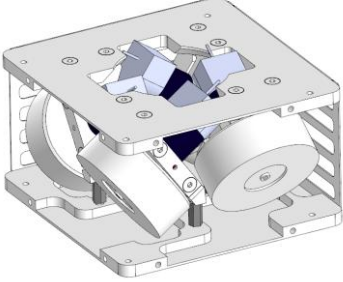
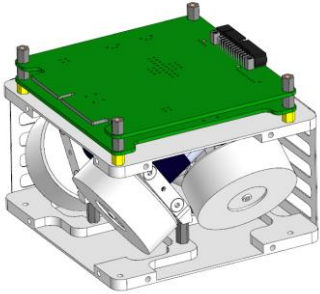
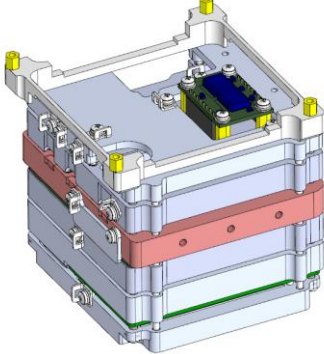
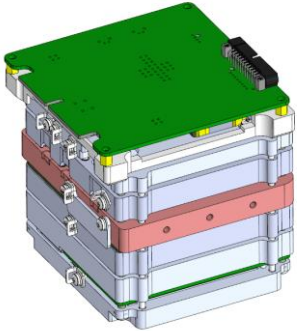
2.2.3 Конструктивные решения по БКС

Базовые платы представляют собой многослойные печатные платы, выполненные из стеклотекстолита. На внешнюю поверхность плат наносится терморегулирующее покрытие, обеспечивающее сброс тепла в космическое пространство [67]. Базовые платы являются альтернативой бортовой кабельной сети и предназначены для коммутации всех блоков бортовой аппаратуры МКА. Базовые платы оснащаются разъёмами для подключения бортовой аппаратуры, разъёмами, обеспечивающими связь между всеми базовыми платами, а также встроенными солнечными датчиками и магнитометрами.

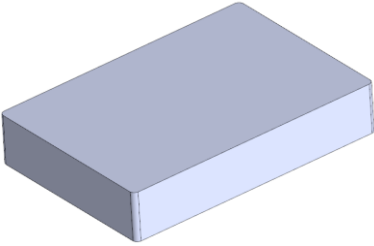
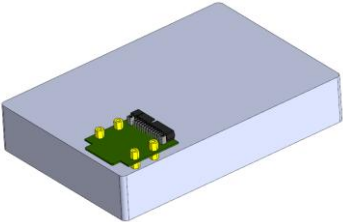
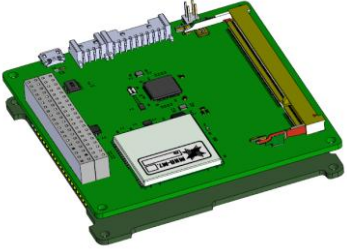
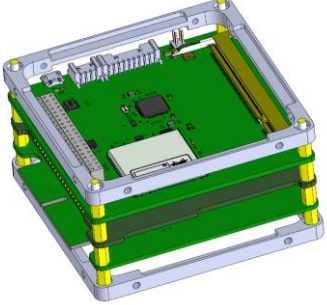
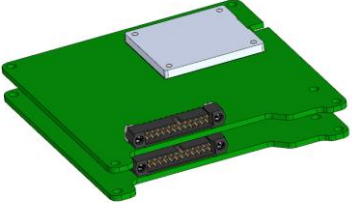
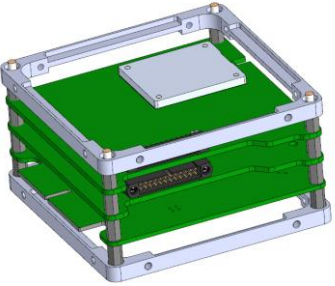
Для унификации соединений была разработана плата сопряжения, оснащённая унифицированным краевым разъёмом для соединения с базовыми платами платформы. Блоки обеспечивающих систем космической платформы должны соединяться с платой сопряжения, тем самым происходит оснащение унифицированным разъёмом всех устройств, входящих в состав платформы

МКА. При установке блока унифицированный разъем проходит сквозь отверстие в несущей стенке. В таблице 2.14 приведён перечень блоков бортовой аппаратуры, которые были адаптированы для работы с базовыми платами и автоматизированной установки в корпус платформы МКА.

Таблица 2.14 - Адаптация блоков бортовой аппаратуры платформы МКА

Наименование блока	Вид блока до адаптации	Вид блока после адаптации
Звёздный датчик АЗДК-1		
Блок чувствительных элементов БЧЭ400		
Блок маховиков		
Модуль ретранслятор		

Продолжение таблицы 33

Модуль цифровой обработки сигнала		
Модуль плат PCA		
Модуль модемов		

Благодаря этим решения, связанных с адаптацией, все разъемы, после закрепления компонентов к несущей стенке МКА, будут выведены в одну плоскость сопряжения, для дальнейшей установки платы БКС на несущую стенку с фиксацией всех ответных разъемов с компонентами.

2.2.4 Конструктивные решения по приспособлениям для сборки

Сборочные приспособления используются для обеспечения необходимой точности и удобства работы. В рассматриваемом случае анализируются процессы панельной сборки и общей сборки, когда панели объединяются в корпус изделия и скрепляются винтами.

В ходе отработки технологии сборки макета МКА было принято решение о выполнении сборки панелей в сборочных приспособлениях путем предварительного позиционирования компонентов и стенок с последующем соединением их винтами с помощью роботов, которые так же обеспечивают

позиционирование и крепление на стенки соответствующих панелей (рисунок 2.9) все стапеля с компонентами МКА.

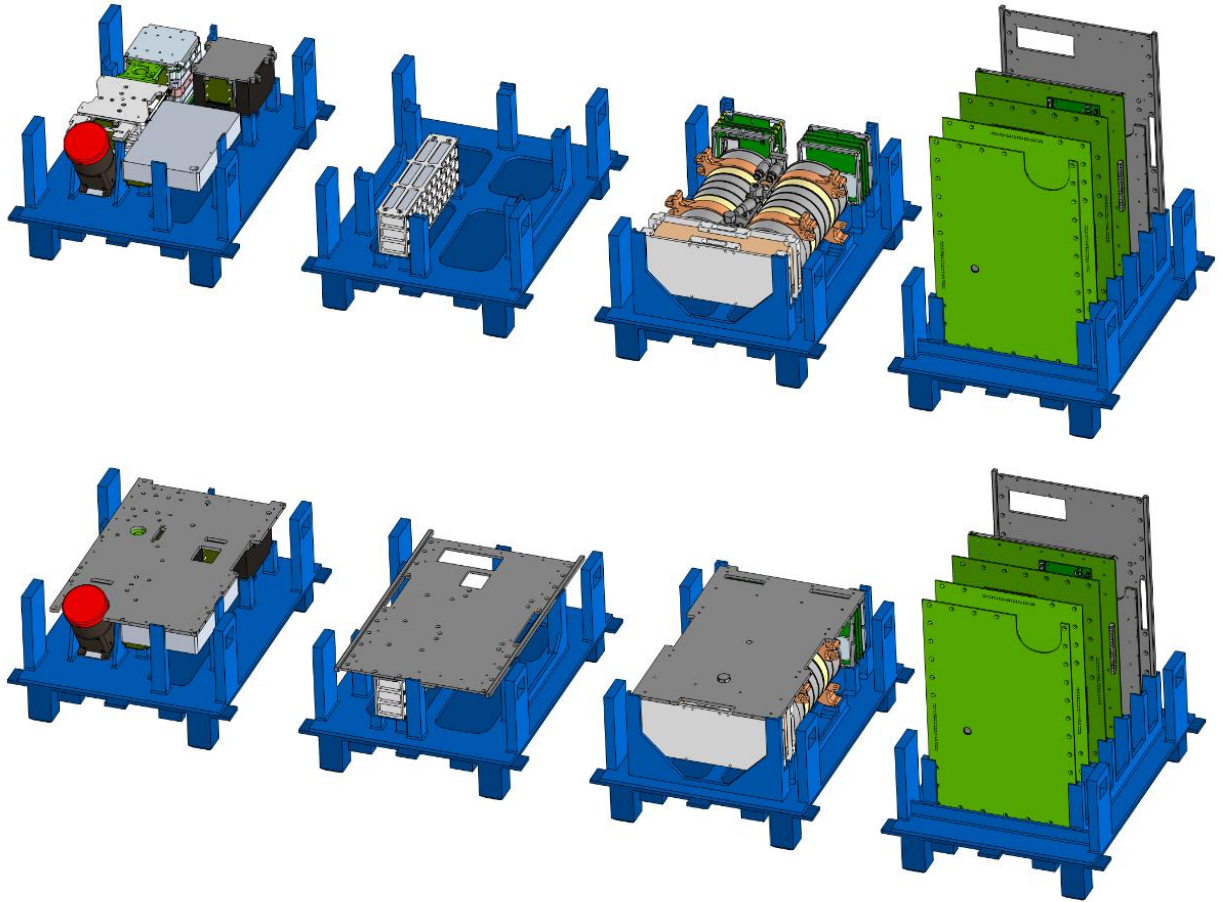


Рисунок 2.9 – Стапеля с компонентами всех панелей МКА

Рассмотрим конструкцию приспособления на примере устройства для сборки панели КФМКА.100.1200 (рисунок 2.10).

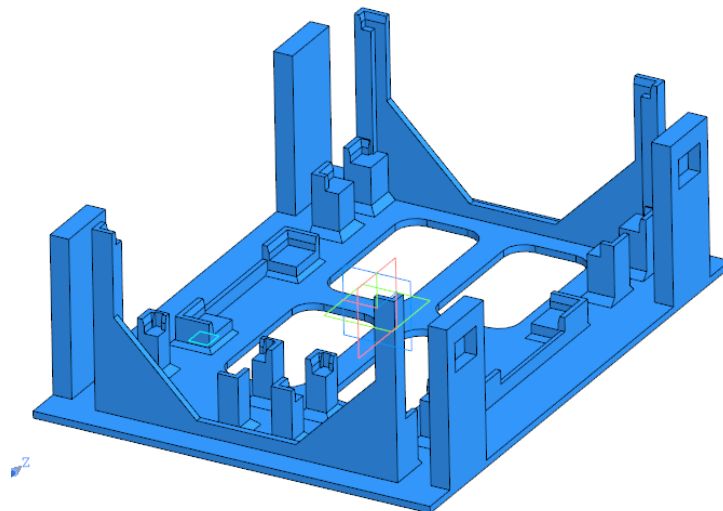


Рисунок 2.10 – Стапель панели №1 МКА

В составе панели комплектуются двигательная установка, аккумулятор и две этажерки в рамках. Все эти компоненты присоединяются к стенке в системе сборочных отверстий (СО) к стенке так же присоединяются платы с разъемами. Комплектация в приспособлении происходит при котором внешняя поверхность панели горизонтальна и обращена вверх.

Приспособление обеспечивает базирование компонентов по Y и X внешнему контуру поверхностей противоположных базовым привалочным плоскостям, которые прилегают к стенке в приспособлении (рисунок 2.11).

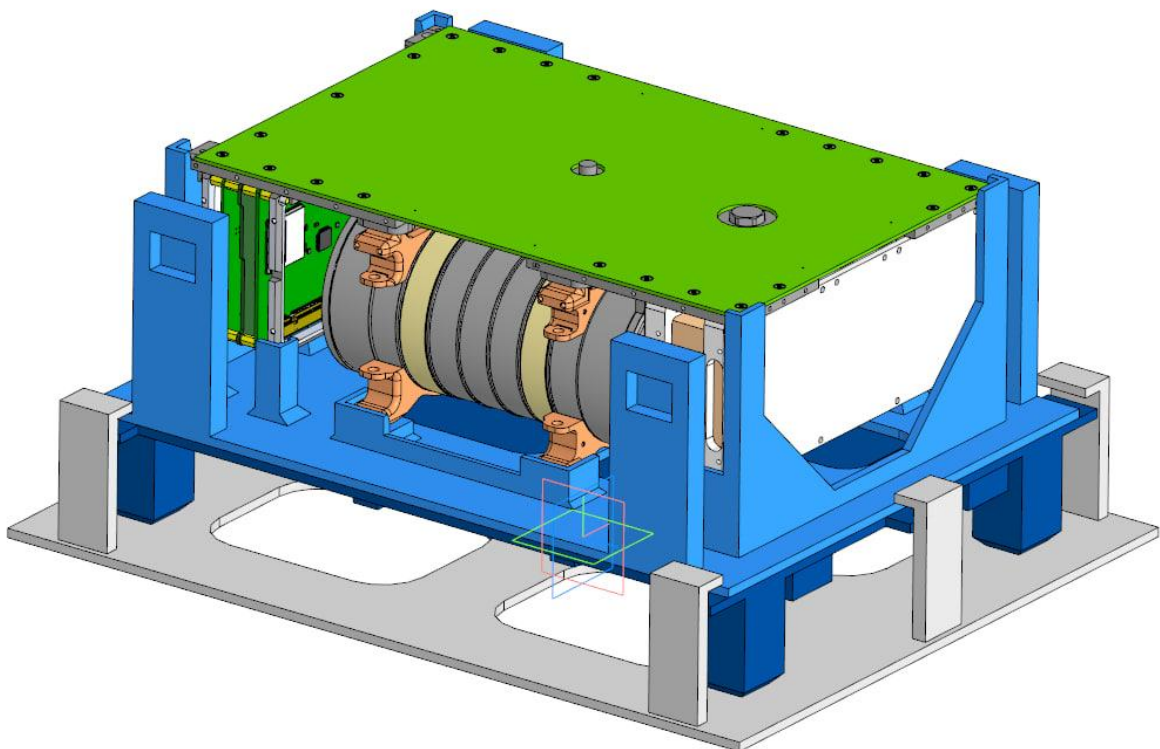


Рисунок 2.11 – Стапель панели №1 в сборе с компонентами панели
МКА

Стенка базируется в углах по внешнему контуру и привалочной плоскости обращенной к присоединяемым компонентам.

Базовые поверхности приспособления по отношению к соответствующим базам всех компонентов выполняются по ходовой посадке.

Совпадение координат сборочных отверстий в местах соединений в местах соединений обеспечивается технологией изготовления компонентов макета МКА и сборочного приспособления.

В обоих случаях изделия выполнялись методом аддитивных технологий из термопласта на оборудовании с числовым программным управлением. Обеспечивается точность исполнения размеров не хуже 0,05-0,1 мм, что соответствует требованиям взаимозаменяемости и собираемости изделия в приспособлении.

Конструктивное исполнение приспособления также обусловлено технологией. По существу, почти вся конструкция приспособления выполнена в виде одной детали – начиная от базовой платформы с расположенной на ней ложементами-фиксаторами базовых поверхностей компонентов и до фиксаторов контуров стенки и платы, расположенных на стойках.

Скомплектованная в приспособлении панель во избежание смещения компонентов относительно друг друга во время транспортировки с участка контроля и подготовки компонентов до рабочего стола участка автоматизированной роботизированной сборки должна быть временно обездвижена в приспособлении. Для этого на стойках следует закрепить поворотные плоские прижимы стенки к компонентам. По окончании сборки панели прижимы отводятся роботом, что позволяет второму роботу извлечь панель из приспособления и перенести на место общей сборки.

Общая сборка всех ранее собранных панелей должна производиться роботами в приспособлении, оснащенного подвижными прижимами, что обеспечивает возможность перемещения и точного позиционирования собираемых панелей и компонентов.

Рассмотрим конструкцию приспособления на примере устройства для сборки панели МКА (рисунок 2.12).

Приспособление для общей сборки предназначено для позиционирования собираемых панелей, кантования формируемой сборочной единицы в удобное для установки очередной присоединяемой панели и платы положение и его сохранение на время выполнения соединений.

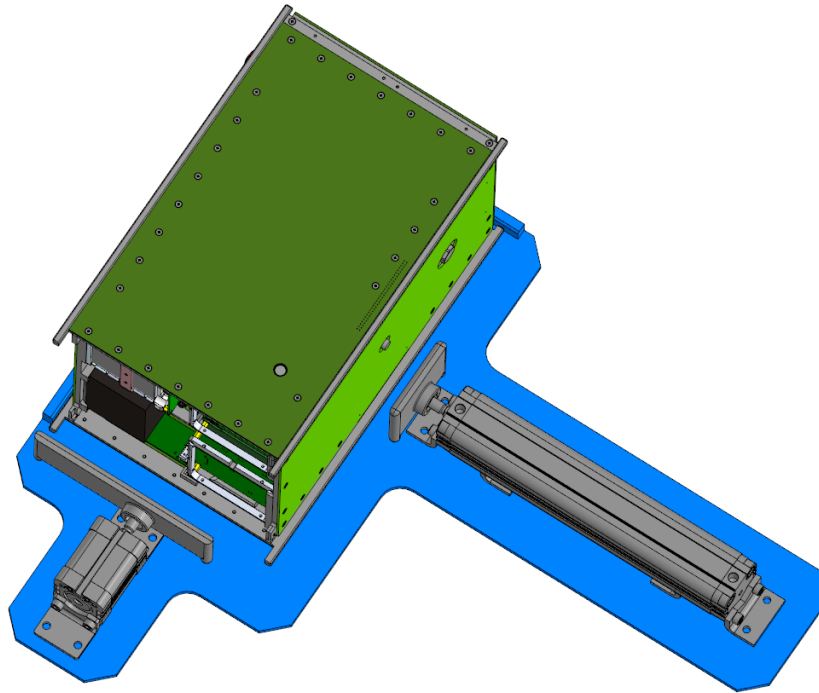


Рисунок 2.12 – Приспособление для общей сборки

Рабочее место расположено в середине рабочего стола и содержит две неподвижные линейки, закрепленные под углом 90° одна к другой и две попарно параллельные им подвижные линейки-прижимы с пневмоприводом. Линейки и пневмоцилиндры размещены на своей платформе прикрепленные к столу, образуют сборочное приспособление. Сборка ведется при горизонтальном положении оси МКА, ось ориентирована в направлении на роботов, что обуславливает положение и габариты линеек и соответственно пневмоцилиндров.

Пневмоцилиндры имеют различные хода. Короткий ход – до 50 мм по оси, длинный ход – до 150 мм в перпендикулярном направлении. Данное решение обусловлено технологией сборки. Скорость движения прижимов определяется рабочим давлением и регулируется посредством редукторов и дросселей пневмосети.

2.3 Свод требований и ограничений к конструкции

Успешная реализация технологии роботизированного производства МКА, включающая проектирование оснастки, разработку технологических

процессов, организацию интеллектуальных ячеек и оценку технологичности жёстко детерминирована конструкцией самого аппарата.

Адаптация конструкции, рассмотренная в п. 2.2, осуществляется не произвольно, а в рамках требований (необходимых условий для функционирования и сборки) и ограничений. Формирование исчерпывающего и структурированного свода этих требований и ограничений является критически важным этапом технологической подготовки производства и основой для последующей оценки технологичности. Целью данного параграфа является систематизация и анализ требований и ограничений к конструкции МКА, обусловленных спецификой их роботизированной сборки.

2.3.1 Разработка классификации требований и ограничений к вновь разрабатываемым конструкциям малых космических аппаратов nano класса типа CubeSat с возможностями их серийной роботизированной сборки

В рамках работы была разработана классификация требований и ограничений к элементам конструкции МКА НК типа CUBESAT для серийной роботизированной сборки всего аппарата.

В таблице 2.15 систематизированы ключевые данные требований и ограничения к каждому компоненту МКА, которые должны учитываться при проектировании CUBESAT.

Таблица 2.15 - Требования и ограничения к компонентам CUBESAT

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Базовая плата панели +X	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется применение стандартизированного интерфейса электрического соединения и крепления; 2. Точность изготовления должна быть не менее $\pm 0,2$ мм; 3. Требуется наличие на плате мест, выделенных под захватывающий инструмент робота; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается использовать деталь, превышающая массу более 5 кг. 2. Выделенная площадь под захватывающее оборудование робота не должно быть более 10% относительно всей площади поверхности компонента.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Несущая панель +X	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие базирующих поверхностей для позиционирования с другими панелями при окончательной сборке; 2. Требуется унификация всех отверстий, которые участвуют в соединении с другими панелями, под один тип крепежа. 3. Точность изготовления изделия должна быть не менее $\pm 0,2$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента; 2. Компонент не должен превышать массу более 15 кг. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40
Базовая плата панели +Y	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется применение стандартизированного интерфейса электрического соединения и крепления; 2. Точность изготовления должна быть не менее $\pm 0,2$ мм; 3. Требуется наличие на плате мест, выделенных под захватывающий инструмент робота; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается использовать деталь, превышающая массу более 5 кг. 2. Выделенная площадь под захватывающее оборудование робота не должно быть более 10% относительно всей площади поверхности компонента.
Несущая панель +Y	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие базирующих поверхностей для позиционирования с другими панелями при окончательной сборке; 2. Требуется унификация всех отверстий, которые участвуют в соединении с другими панелями, под один тип крепежа. 3. Точность изготовления изделия должна быть не менее $\pm 0,2$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента; 2. Компонент не должен превышать массу более 15 кг. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40
Базовая плата панели +Z	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется применение стандартизированного интерфейса электрического соединения и крепления; 2. Точность изготовления должна быть не менее $\pm 0,2$ мм; 3. Требуется наличие на плате мест, выделенных под захватывающий инструмент робота; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается использовать деталь, превышающая массу более 5 кг. 2. Выделенная площадь под захватывающее оборудование робота не должно быть более 10% относительно всей площади поверхности компонента.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Несущая панель +Z	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие базирующих поверхностей для позиционирования с другими панелями при окончательной сборке; 2. Требуется унификация всех отверстий, которые участвуют в соединении с другими панелями, под один тип крепежа. 3. Точность изготовления изделия должна быть не менее $\pm 0,2$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента; 2. Компонент не должен превышать массу более 15 кг. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40
Несущая панель - Y	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие базирующих поверхностей для позиционирования с другими панелями при окончательной сборке; 2. Требуется унификация всех отверстий, которые участвуют в соединении с другими панелями, под один тип крепежа. 3. Точность изготовления изделия должна быть не менее $\pm 0,2$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента; 2. Компонент не должен превышать массу более 15 кг. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40
Несущая панель - Z	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие базирующих поверхностей для позиционирования с другими панелями при окончательной сборке; 2. Требуется унификация всех отверстий, которые участвуют в соединении с другими панелями, под один тип крепежа. 3. Точность изготовления изделия должна быть не менее $\pm 0,2$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента; 2. Компонент не должен превышать массу более 15 кг. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40
Разъем для соединения базовых плат	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие направляющих элементов; 2. Необходимо наличие фиксации разъема; 3. Требуется наличие поляризации разъема, исключая неправильную ориентацию; 4. Наличие свободной зоны доступа для захвата роботом 10-15 мм; 5. Разъем должен иметь жесткий корпус, исключая деформацию при стыковке. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Максимальное усилие стыковки менее 50 – 80Н; 2. Шероховатость поверхностей разъема не должна превышать более Rz20; 3. Не допускается загрязнение контактной зоны.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Блок аккумуляторных батарей	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть поверхности для точного базирование в сборочном стапеле; 2. Требуется предусмотреть наличие поверхностей для беспрепятственного захвата роботом. 3. Точность изготовления изделия должна быть не менее $\pm 0,2$; 4. Крепежные отверстия должны быть метрическими; 5. Крепежные отверстия должны быть одного типа; 6. Крепежные отверстия должны располагать в одной плоскости; 7. Требуется предусмотреть поверхности для базирования компонента относительно других компонентов при операциях сборки; 8. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 9. Требуется предусмотреть возможность захвата компонента присоской; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается использовать компонент, превышающий массу 15 кг; 2. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40; 3. Не допускается наличие загрязнений, риск на поверхностях компонента; 4. Габаритные размеры компонента не должны превышать 300x200x100мм
Модуль ретранслятор	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность осуществить базирование в стапеле; 2. Наличие поверхностей для беспрепятственного захвата роботом; 3. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 4. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 5. Крепежные отверстия должны быть метрическими; 6. Крепежные отверстия должны быть одного типа; 7. Крепежные отверстия должны располагать в одной плоскости. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Не допускается использовать компонент, превышающий массу 2кг; 2. Ограничение сил при установке менее 50 Н; 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Двигательная установка	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность осуществить базирование в стапеле; 2. Наличие поверхностей для беспрепятственного захвата роботом; 3. Крепежные отверстия должны быть унифицированы и выполнены под метрический крепеж; 4. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости. 5. Электрические и топливные разъемы должны быть ориентированы в сторону, обеспечивающую автоматическую стыковку. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Масса агрегата менее 5 кг; 2. Ограничение сил при установке менее 150 Н; 3. Не допускается наличие загрязнений, рисок и заусенцев на базирующих поверхностях; 4. Допустимый перекося двигателя при установке не более 0,5°; 5. Габаритные размеры компонента не должны превышать 300x200x100мм
Унифицированный разъем	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется предусмотреть наличие направляющих элементов; 2. Необходимо наличие фиксации разъема; 3. Требуется наличие поляризации разъема, исключающей неправильную ориентацию при сборке; 4. Наличие свободной зоны доступа для захвата роботом 10-15 мм; 5. Разъем должен иметь жесткий корпус, исключающий деформацию. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Максимальное усилие стыковки менее 50 – 80Н; 2. Шероховатость поверхностей разъема не должна превышать более Rz20; 3. Не допускается загрязнение контактной зоны.
Звездный датчик	<ol style="list-style-type: none"> 1. Захват компонента должен осуществляться без контакта с оптикой; 2. Возможность осуществить базирование в стапеле; 3. Наличие поверхностей для беспрепятственного захвата роботом; 4. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 5. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 6. Крепежные отверстия должны быть метрическими и одного типа; 7. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости; 8. Конструкция должна предусматривать защитный кожух или рамку вокруг оптики; 9. Требуется предусмотреть возможность контроля положения датчика системой технического зрения. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничение прилагаемой нагрузки до 15Н для предотвращения смещения оптики; 2. Не допускается наличие загрязнений и механических повреждений на оптических поверхностях; 3. Габаритные размеры компонента не должны превышать 100x100x80мм 4. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Модуль плат РСА	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стандартизированный интерфейс электрического соединения и крепления; 2. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 3. Наличие на плате мест, выделенных под захват роботом; 4. Крепежные отверстия должны быть метрическими; 5. Крепежные отверстия должны быть одного типа; 6. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости; 7. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Габаритные размеры компонента не должны превышать 100x100x80мм; 2. Усилие при прижиге менее 30Н. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40.
ЦОС Джексон	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стандартизированный интерфейс электрического соединения и крепления; 2. Возможность осуществить базирование в стапеле; 3. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 4. Наличие мест, выделенных под захват роботом; 5. Крепежные отверстия должны быть метрическими; 6. Крепежные отверстия должны быть одного типа; 7. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости; 8. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 9. Требуется предусмотреть возможность захвата компонента присоской. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Габаритные размеры компонента не должны превышать 100x100x80мм; 2. Усилие при прижиге менее 30Н. 3. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
Магнитометр	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стандартизированный интерфейс электрического соединения и крепления; 2. Возможность осуществить базирование в стапеле; 3. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 4. Наличие мест, выделенных под захват роботом; 5. Крепежные отверстия должны быть метрическими; 6. Крепежные отверстия должны быть одного типа; 7. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости; 8. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 9. Требуется предусмотреть возможность захвата компонента присоской. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Масса агрегата менее 0,3 кг; 2. Ограничение сил при установке менее 30 Н; 3. Не допускается наличие магнитных материалов вблизи датчика, которые могут исказить измерения; 4. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40.
Солнечный датчик	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стандартизированный интерфейс электрического соединения и крепления; 2. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 3. Требуется предусмотреть технологические поверхности или элементы для захвата роботизированным манипулятором, не перекрывающие фоточувствительную поверхность; 4. Отклонение ориентации чувствительной поверхности относительно нормали панели должно быть не более $\pm 0,1^\circ$; 5. Крепежные отверстия должны быть метрическими и одного типа; 6. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости; 7. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 8. Требуется предусмотреть возможность контроля положения датчика системой технического зрения перед окончательной фиксацией. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Масса агрегата менее 0,2 кг; 2. Ограничение сил при установке менее 20 Н; 3. Не допускается контакт захвата робота с фоточувствительной поверхностью датчика; 4. Шероховатость поверхностей, которые участвуют в дальнейших операциях не должна превышать более Rz40.

Элемент конструкции МКА	Требования	Ограничения
УКВ антенны	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стандартизированный интерфейс электрического соединения и крепления; 2. Точность позиционирования при установке $\pm 0,1$ мм; 3. Наличие мест, выделенных под захват роботом; 4. Отклонение ориентации антенны относительно расчетного направления должно быть не более $\pm 1^\circ$; 4. Крепежные отверстия должны быть метрическими; 5. Крепежные отверстия должны быть одного типа; 6. Крепежные отверстия должны располагаться в одной плоскости; 7. Разъем блока должен быть выведен на сторону, где будет фиксироваться «Базовая плата»; 8. Требуется предусмотреть возможность контроля положения антенны системой технического зрения перед окончательной фиксацией. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Масса агрегата менее 0.5 кг; 2. Ограничение сил при установке менее 10 Н. 3. Деформация раскрываемых элементов не допускается.

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 [68].

2.4 Выводы по главе 2

В результате, в данной главе был разработан 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 нано класса типа CUBESAT с учетом особенностей при серийной роботизированной сборке, состоящая из 8 коэффициентов. Также, в главе 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.

2. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИРПЯ СБОРКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНО КЛАССА ТИПА CUBESAT

Переход от теоретических основ адаптации конструкции МКА к практической реализации технологии роботизированного производства требует решения ключевой задачи: организации Интеллектуальной Роботизированной Производственной Ячейки (ИРПЯ), специализированной для высокоточной и гибкой сборки малых космических аппаратов нано-класса, в частности, формата CUBESAT.

Как установлено в параграфах 2.2 и 2.3, эффективная роботизированная сборка CUBESAT возможна только при условии глубокой адаптации их конструкции к автоматизации и строгого учета специфического свода требований и ограничений. Однако, сама по себе адаптированная конструкция – лишь объект производства. Инструментарий организации ИРПЯ выступает субъектом, преобразующим требования к конструкции и технологический процесс в реальное, функционирующее автоматизированное производственное звено.

Особенности сборки CUBESAT (крайне малые габариты и масса компонентов, высокая плотность компоновки, использование микроэлектроники, необходимость ювелирной точности монтажа, работа с хрупкими материалами, требования к чистоте) предъявляют исключительные требования к ИРПЯ. Традиционные подходы к автоматизации здесь часто неприменимы или требуют принципиально иных решений в части точности позиционирования, миниатюризации оснастки и инструмента, алгоритмов управления и контроля [69]. Необходим специализированный комплексный инструментарий, охватывающий все аспекты жизненного цикла ячейки: от проектирования и моделирования до управления, мониторинга и адаптации в реальном времени.

2.1. Разработка методики организации интеллектуальной роботизированной производственной ячейки сборки малых космических аппаратов nano класса типа CUBESAT

Организация высокоэффективной и надежной Интеллектуальной Роботизированной Производственной Ячейки (ИРПЯ) для сборки CUBESAT представляет собой комплексную инженерную задачу, требующую системного подхода. Стандартные методики организации роботизированных ячеек для макро-объектов неприменимы из-за уникальных особенностей CUBESAT: экстремальная миниатюризация компонентов (платы, датчики, крепеж), критическая важность субмикронной точности позиционирования и монтажа, высокая плотность компоновки, работа с хрупкими и чувствительными материалами (керамика, тонкие платы), а также жесткие требования к чистоте и электростатической защите. Целью данного подпараграфа является разработка специализированной методики организации ИРПЯ, обеспечивающей выполнение технологического процесса сборки CUBESAT в соответствии с требованиями, сформированными в параграфах 2.2 (Адаптация конструкции) и 2.3 (Свод требований и ограничений), и учитывающей специфику производства nano-спутников.

Ключевые принципы методики заключаются в следующем:

1) Конструктивно-технологическая преемственность: Методика базируется на результатах адаптации конструкции CUBESAT (п. 2.2) и строго следует сформулированному своду требований и ограничений (п. 2.3). Каждый шаг организации ячейки проверяется на соответствие этим требованиям;

2) Модульность и гибкость: Ячейка проектируется как совокупность функционально законченных модулей (робототехнический, сенсорный, оснастки, контроля), что обеспечивает легкую реконфигурацию под различные варианты CUBESAT (1U, 3U, 6U) и быструю адаптацию к изменениям конструкции или технологии;

3) Интеллектуальность на всех уровнях: Методика закладывает принципы интеллектуального управления, адаптации и принятия решений не только в систему управления ячейкой, но и в этапы ее проектирования, настройки и эксплуатации (использование Digital Twin, адаптивные алгоритмы, предиктивная аналитика);

4) Беспрецедентная точность и минимизация воздействий: Учет микро-масштаба операций, требующих позиционирования с точностью в единицы микрон и приложения усилий в доли Ньютона, с исключением вибраций, тепловых градиентов и электростатических разрядов;

5) Интеграция и открытость: Обеспечение совместимости компонентов ячейки через стандартные промышленные интерфейсы (OPC UA, EtherCAT) и возможность интеграции в систему управления производством верхнего уровня (MES).

2.1.1. Состав ИРПЯ сборки МКА (робот, стол, машинное зрение)

Интеллектуальная роботизированная производственная ячейка (ИРПЯ) для сборки малых космических аппаратов нано класса типа CUBESAT 12U включает следующие ключевые компоненты:

- 1) Роботизированные манипуляторы;
- 2) Системы технического зрения;
- 3) ИИ-алгоритмы;
- 4) Автономные тележки (AGV);
- 5) Контрольно-измерительное оборудование;
- 6) Программное обеспечение;
- 7) Вспомогательные системы;
- 8) Безопасность.

Для выполнения специальных операций сборки CUBESAT 12U требуется применение следующих позиций.

- 1) Миниатюрные инструменты в виде грейферов для микроэлектроники (захват SMD-компонентов 0402), Пьезоэлектрические отвертки с контролем момента (0.1–0.5 Н·м);

- 2) Адаптивные оснастки, которые являются быстропереналаживаемыми под разные конфигурации CUBESAT;
- 3) Интеграция с вакуумными камерами с автоматической герметизацией корпуса после сборки.

Ключевыми преимуществами состава ИРПЯ являются гибкость, точность, автономность.

Под гибкостью понимается способность переностройки под новый тип CUBESAT за 4–6 часов. Под точностью понимается погрешность сборки ≤ 0.05 мм. Под автономностью 85% операций без вмешательства оператора.

Состав ИРПЯ должен обеспечивать полный цикл роботизированной сборки CUBESAT, отвечая требованиям точности, скорости и адаптивности.

2.1.2. Алгоритм проектирования ИРПЯ

Изначально при проектировании автоматизированной ячейки нужно определить, какие именно задачи должны быть автоматизированы и какие выгоды ожидаются от роботизации? Ответ поможет четко сформировать и выбрать подходящую технологию и роботизированное оборудование для проекта. Для начала проектирования ИРПЯ нужно предоставить или сформировать следующие данные:

- 1) Определение и описание всех операций, которые будут выполняться в ячейке;
- 2) Определение повторяющихся действий в ячейке;
- 3) Выявление узких мест, где требуется более глубокая проработка;
- 4) Определение автоматизируемых операций в ячейке;
- 5) Оценка экономической целесообразности внедрения робототехнических комплексов;
- 6) Расчет производительности для определения требуемой скорости работы ячейки, для расчета необходимого количества циклов.

На основе анализа требований разрабатывается концептуальный проект, который определяет основные принципы и принципы организации склада, выбор технологий и систем, которые будут использоваться в ячейке. В этом

этапе определяются габариты, планировка и размещение рабочих станций, системы хранения и конвейерных лент, а также необходимые ресурсы, такие как расположение вспомогательных шкафов электроэнергии и сетевого подключения. Первым шагом необходимо оценить требования к ячейке, на котором хранятся компоненты изделия:

- 1) вместимость ячейки;
- 2) требования к производительности;
- 3) характеристики складских запасов;
- 4) наличие свободного места;
- 5) уровень автоматизации.

Следующим действием является разработка и согласование последовательности операций с заказчиком:

- 1) Составление карты технологического процесса;
- 2) Определение маршрутов движения;
- 3) Расчет временных интервалов;
- 4) Определение оптимальных скоростей;
- 5) Расчет нагрузок на оборудование (грузоподъемность);
- 6) Установление параметров безопасности комплекса;
- 7) Определение границ рабочей области работы оборудования;
- 8) Расчет необходимых проходов для обслуживания инженерами;
- 9) Размещение оборудования, создание технологической планировки.

Следующим действием является принятие решения о выборе и внедрении специализированных технологий и робототехнических систем, таких как автономные транспортные средства, роботы-манипуляторы, а также системы автоматического управления и мониторинга.

Для того, чтобы подобрать робота нужно определить следующие требования:

- 1) Грузоподъемности;
- 2) Расчет рабочей зоны;
- 3) Выбор количества степеней свободы робота;

4) Условий эксплуатации.

После подбора робота, требуется подобрать захватывающий инструмент, который будет прикручен к фланцу:

- 1) Определение типа захвата;
- 2) Расчет усилий удержания;
- 3) Проверка надежности фиксации;
- 4) Определение диапазона работы захватывающего устройства (свободное/рабочее положение).

Так же требуется подобрать вспомогательное оборудование:

- 1) Систему позиционирования для изделия, инструмента;
- 2) Систему технического зрения (СТЗ);
- 3) Датчики движения, положения, которые будут отслеживать работу комплекса.

Роботы могут представлять определённые риски для безопасности персонала и товаров на складе [70]. Следует учесть возможность аварий или несчастных случаев, а также рассмотреть меры предосторожности и необходимость обучения персонала по безопасному взаимодействию с роботами.

Обязательно нужно учесть:

- 1) пожарные нормы (пожарные проезды);
- 2) минимальные отступы от границ;
- 3) охранные зоны коммуникаций (газоснабжение, электроснабжение, водоснабжение, канализация);
- 4) санитарные нормы;
- 5) водоохранные зоны;

В том числе определиться с системами защиты:

- 1) Внедрение защитных ограждений;
- 2) Организация световых барьеров;
- 3) Внедрение системы аварийного отключения;
- 4) Размещение предупреждающих знаков.

Определение органов управления:

- 1) Разработка пульта управления;
- 2) Определение световых и звуковых индикаторов;
- 3) Размещение кнопок аварийного останова;
- 4) Организация системы оповещения.

Следующим этапом предварительно разрабатывается специализированное программное обеспечение для управления и координации работы робототехнических систем (имитационная модель), а также системы учета и отслеживания товаров, включающее:

- 1) Разработка алгоритмов работы;
- 2) Настройка режимов функционирования;
- 3) Создание системы мониторинга;
- 4) Внедрение диагностики неисправностей;
- 5) Разработка панели управления;
- 6) Настройка отображения режимов работы;
- 7) Организация системы оповещений;
- 8) Создание обучающих материалов.

После успешного тестирования система развертывается в ячейке и начинает использоваться в реальных рабочих условиях. Также проводится обучение персонала, разрабатываются процедуры обслуживания и регулярного технического обслуживания.

В результате был сформирован алгоритм, который представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 - Алгоритм проектирования ИРПЯ

Благодаря разработанному алгоритму была спроектированная ИРПЯ сборки малого космического аппарата nano класса типа CUBESAT «АИСТ-СТ», адаптированного под роботизированную сборку, представленная на рисунке 3.2.

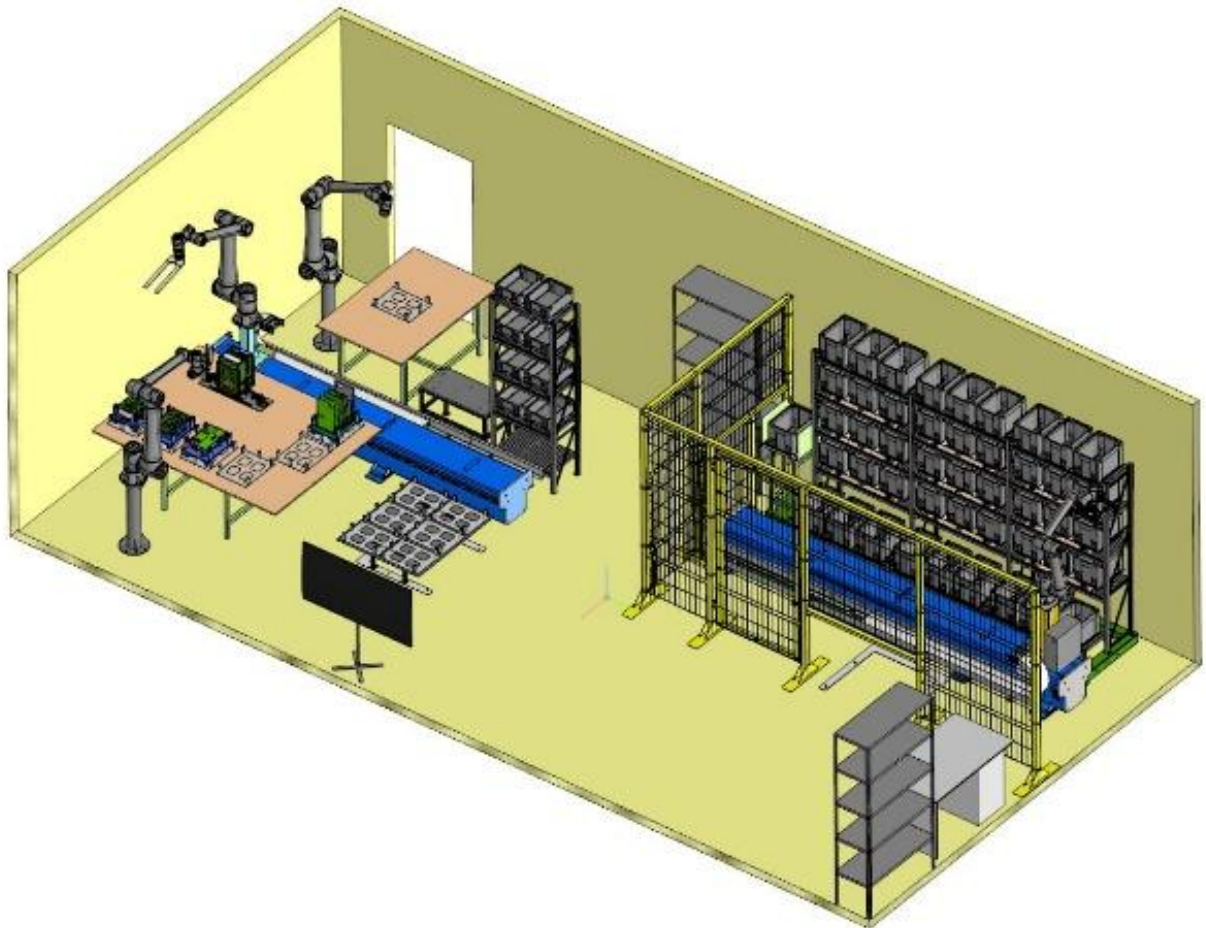


Рисунок 3.2 – Проект интеллектуальной роботизированной производственной ячейки общей сборки малых космических аппаратов nano класса

Далее сформируем алгоритм создания интеллектуальной роботизированной производственной ячейки.

2.2. Проектирование средств технологического оснащения

Эффективность и сама возможность роботизированной сборки малых космических аппаратов nano-класса типа CUBESAT с помощью ИРПЯ, организация которой рассмотрена в параграфе 3.1, в решающей степени определяются средствами технологического оснащения (СТО). К СТО относятся все устройства, дополняющие технологическое оборудование ИРПЯ (роботы, позиционеры) для выполнения конкретных операций сборки: адаптивные захваты, специализированный инструмент, сборочные кондукторы и приспособления, позиционирующие и зажимные устройства, устройства подачи и ориентации микро-компонентов и крепежа.

Как установлено в параграфах 2.2 и 2.3, конструкция CUBESAT, адаптированная под роботизацию, предъявляет экстремальные требования к СТО, а именно: необходимость манипулирования миниатюрными и хрупкими компонентами (платы, датчики, микро-винты) с субмикронной точностью, обеспечение доступа в ограниченные зоны высокой плотности компоновки, совместимость с системами технического зрения и силомоментного контроля, а также обеспечение электростатической безопасности и чистоты. При этом, учитывая разнообразие конфигураций CUBESAT и необходимость оперативной смены выпускаемых моделей или модификаций, ключевым императивом становится быстрая переналадка оснастки (Quick Changeover, QCO).

Традиционные подходы к проектированию СТО, ориентированные на статичную оснастку для крупносерийного производства, здесь неприменимы.

2.2.1. Разработка алгоритма проектирования технологического оснащения ИРПЯ, с учетом возможностей быстрой переналадки

В данном параграфе будет представлен структурированный инженерный алгоритм, определяющий последовательность шагов проектирования СТО. Алгоритм будет изначально заточен под принципы быстрой переналадки (SMED - Single-Minute Exchange of Die), включая модульность конструкций, использование стандартизированных интерфейсов крепления к роботу и позиционерам, унификацию базовых элементов, предварительную настройку вне рабочей зоны. Алгоритм интегрирует требования из свода (п. 2.3) и особенности адаптированной конструкции (п. 2.2) на самых ранних этапах проектирования. В таблице 3.1 представлены методы оценки и примеры оценки параметров быстрой переналадки. Они сформированы за счет анализа исторических данных и анкетирования производства.

Таблица 3.1 - Параметры оценки быстрой переналадки

Параметр	Метод оценки	Пример для CubeSat 12U
Частота переналадки	Число смен конфигураций в месяц	4–6 раз (под разные миссии)
Время переналадки	Максимально допустимая задержка	≤4 часа
Типовые изменения	Замена полезной нагрузки, модификация корпуса	Переход с оптической камеры на радар

Далее был произведен примерный подбор оборудования, имеющего возможности для быстрой переналадки, который представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Выбор модульных компонентов

Компонент	Требование	Пример решения
Роботы	Коллаборативные (Dobot CR)	Возможность перепрограммирования за 1 час
Оснастка	Быстросъемные кондукторы с магнитным креплением	Кондуктор Tyvak QuickSwap
Инструменты	Автосмена грейферов/отверток	Шпиндель SCHUNK SWS-001

Следующим этапом были рассмотрены принципы проектирования унифицированной оснастки, которые включают:

- 1) Использование стандартных креплений (ISO 4762, DIN 912);
- 2) Минимизация ручных операций при замене (например, фиксация защёлками вместо винтов).

Так же подобраны примеры вспомогательного оборудования, которое можно использовать в ИРПЯ под особенности быстрой переналадки (таблица 3.3).

Таблица 3.3 - Вспомогательное оборудование

Тип интерфейса	Технология	Эффект
Электрические	Разъёмы SpaceUSB-C с автоматическим распознаванием	Снижение времени подключения на 80%
Механические	Магнитные фиксаторы + направляющие штифты	Переналадка за 15 мин вместо 2 часов
Пневматические	Быстросъёмные пневмолинии с самозапираанием	Исключение утечек при замене инструмента

Одним из направлений, с помощью которого осуществление быстрой переналадки невозможно, это цифровой двойник – имитационная модель ячейки. Благодаря этому можно не только выполнять симуляцию переналадки (проверка коллизий, оптимизация траекторий), обрабатывать процессы на выявление различных ограничений, но и писать новые управляющие программы и сразу их загружать в роботизированные комплексы, что снизит время на ручное обучение [71]. Так же возможно применение AR технологий для генерации инструкций оператора.

Тестирование времени переналадки можно представить в виде следующих действий:

- 1) Фиксация времени на демонтаж старой оснастки;
- 2) Замер времени на установку и калибровку новой;
- 3) Проверка точности после переналадки (КИМ Zeiss).

Под успешным процессом быстрой переналадкой понимается время переналадки ≤ 4 часа и сохранение точности позиционирования ± 0.05 мм.

Так же в конструкции креплений можно предусмотреть оптимизацию креплений (упрощение фиксации на работе) и добавление меток, для

автоматической идентификации роботом оснастки с помощью машинного зрения.

Для внедрения данных предложений нужно предпринимать следующие шаги, связанные с обучением операторов работе с быстросъёмными интерфейсами, интеграция ИРПЯ в MES-систему для мониторинга OEE и запуском партии с двумя переналадками

Ключевыми преимуществами алгоритма является снижение времени простоя оборудования на 60% за счет модульности и автоматизации, гибкостью (поддержка 5+ конфигураций CUBESAT в одной ячейке) и интеграцией с компонентами индустрии 4.0.

Алгоритм позволяет проектировать ИРПЯ, способные адаптироваться под новые задачи за 4 часа, что критически важно для рынка CUBESAT с его растущей вариативностью.

2.2.2. Классификация переналаживаемой оснастки

Оснастка — это комплекс технических средств (рисунок 3.3), предназначенных для оснащения производственного процесса, обеспечения его эффективного функционирования и получения продукции заданного качества. В машиностроении оснастка является неотъемлемой частью технологического оборудования и служит для установки, закрепления, обработки и контроля деталей.

В зависимости от назначения и области применения различают несколько основных видов оснастки, которые представлены на рисунке 3.3. К ним относятся технологическая оснастка, дополняющая оборудование для выполнения определенной части технологического процесса; производственная оснастка для организации производственного процесса; измерительная оснастка для контроля и измерения параметров изделий; ремонтная оснастка для технического обслуживания и ремонта оборудования; транспортная оснастка для перемещения и хранения деталей и заготовок.

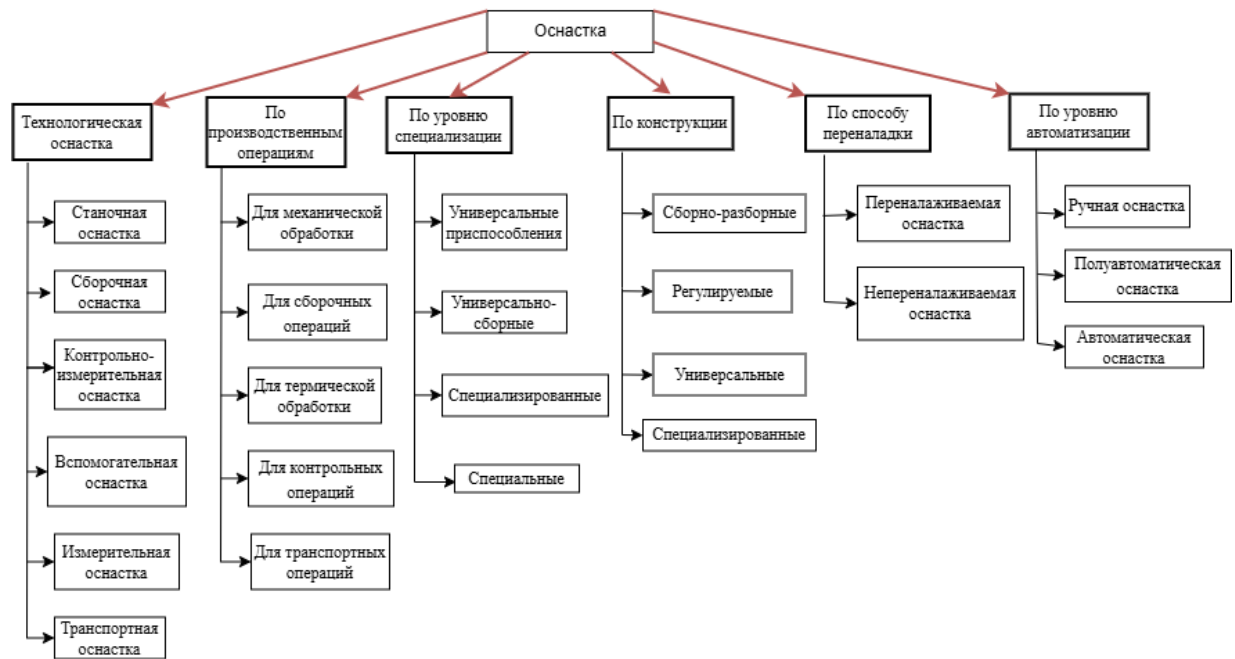


Рисунок 3.3 - Классификация оснастки

В состав станочной оснастки входят универсальные станочные приспособления, универсально-сборные приспособления, сборные-разборные приспособления и специальные приспособления. Основными элементами являются установочные компоненты (опоры, центры, упоры), зажимные механизмы (прижимы, тиски, патроны), направляющие элементы (втулки, линейки, угольники), корпусные детали и соединительные элементы.

Сборочная оснастка состоит из базовых корпусов, установочно-зажимных элементов, направляющих устройств и контрольно-измерительных компонентов. Её конструктивные особенности включают модульные системы соединения, быстрозажимные механизмы, регулируемые установочные элементы и возможность многократного использования.

Оснастка для термической обработки включает печные поддоны и контейнеры, подвесные устройства, опорные элементы и защитные экраны. Она изготавливается из жаропрочных материалов с термостойкими покрытиями, что обеспечивает возможность быстрой замены элементов и удобство при загрузке и выгрузке.

В состав контрольно-измерительной оснастки входят установочные приспособления, измерительные базы, калибровочные устройства и

приспособления для проверки геометрии. Функциональными элементами являются регулируемые упоры, индикаторные стойки, измерительные планки и контрольные шаблоны.

Транспортная оснастка состоит из грузозахватных устройств, переставных платформ, конвейерных систем, поддонов и контейнеров. Её технические характеристики определяются грузоподъемностью, скоростью перемещения, точностью позиционирования и совместимостью с подъемно-транспортным оборудованием.

Базовые элементы оснастки включают корпусные детали с модульными соединениями, регулируемые установочные элементы, быстрозажимные механизмы, сменные зажимные элементы и направляющие системы. Механизмы крепления представлены винтовыми зажимами, пневматическими и гидравлическими приводами, магнитными держателями и вакуумными устройствами.

В производстве оснастки используются конструкционные стали, чугуны, композитные материалы, пластики и антифрикционные сплавы. Для защиты применяются антикоррозийные, твердые, износостойкие и теплозащитные покрытия.

Оснастка оснащается различными механизмами регулирования: ручными, пневмо- и гидроуправлением, электромеханическими приводами и автоматизированными системами. Это позволяет обеспечивать точное позиционирование и быструю переналадку оборудования.

Основными параметрами являются время переналадки, точность позиционирования, нагрузочная способность, долговечность элементов и простота обслуживания. Экономическая эффективность определяется стоимостью владения, сроком окупаемости, производительностью и коэффициентом использования.

Система обслуживания включает регулярную проверку состояния, смазочные операции, замену изношенных элементов, калибровку механизмов

и профилактику поломок. Это обеспечивает длительный срок службы и надежность работы оборудования [72].

В настоящее время активно развиваются инновационные решения, такие как умная оснастка с датчиками, 3D-печатные элементы, гибкие модульные системы, автоматизированные переналадки и цифровые системы управления. Эти технологии находят применение в автомобилестроении, авиационной промышленности, машиностроении, приборостроении и судостроении.

Производство оснастки регулируется ГОСТами на конструкции, техническими условиями на материалы, стандартами ISO, отраслевыми регламентами и сертификационными требованиями, что обеспечивает высокое качество и безопасность оборудования.

Основные направления совершенствования включают миниатюризацию элементов, повышение точности, увеличение скорости переналадки, интеграцию с цифровыми системами и повышение энергоэффективности. Это позволяет создавать более эффективные и производительные производственные линии, отвечающие современным требованиям промышленности.

Переналаживаемая оснастка — это особый вид технологической оснастки, конструкция которого позволяет быстро и эффективно перестраивать оборудование под выпуск другой продукции или изменение технологического процесса. Основные характеристики такой оснастки включают возможность быстрой перенастройки под различные типоразмеры деталей, минимальное время на переналадку оборудования, универсальность конструктивных элементов, возможность многократного использования и простоту обслуживания и ремонта.

Переналаживаемая оснастка может быть классифицирована по множеству признаков. Она активно применяется в современном производстве для повышения гибкости производственных линий и сокращения времени на переналадку оборудования.

Универсально-наладочные приспособления (УНП) состоят из постоянной универсальной части и сменной наладочной части. Они предназначены для обработки различных деталей в серийном производстве, где требуется частая смена объектов производства. УНП позволяют быстро перенастраивать оборудование под различные типоразмеры деталей благодаря наличию сменных элементов, что существенно сокращает время простоя оборудования при смене производственной программы.

Конструктивные особенности УНП включают базовую часть с фиксированными элементами, сменные наладочные элементы, механизмы быстрой замены и стандартизированные крепёжные элементы. Примеры применения: обработка деталей семейства валов, фрезерование плоскостей различных размеров, сверление отверстий в деталях разной конфигурации. Преимущества: быстрота переналадки (5-15 минут), возможность обработки широкой номенклатуры деталей, минимальные затраты на переналадку, простота обслуживания [73].

Специализированные наладочные приспособления (СНП) имеют базовый агрегат и сменные накладки, что делает их более узконаправленными по сравнению с УНП. СНП применяются для обработки группы деталей со сходными конструктивными признаками, что позволяет оптимизировать процесс переналадки под конкретные технологические операции. Такие приспособления особенно эффективны при производстве изделий с похожими геометрическими параметрами, где требуется быстрая смена оснастки.

Конструктивные элементы СНП включают базовый агрегат с фиксированными узлами, сменные накладки под разные типоразмеры, регулировочные механизмы и быстросменные крепёжные элементы. Примеры использования: обработка деталей одного типоразмера с разными параметрами, производство корпусных деталей со схожими размерами, обработка фланцев с различными диаметрами отверстий. Особенности применения: высокая точность обработки, быстрая переналадка под схожие

детали, возможность многократного использования базовых элементов, экономичность при средних сериях производства.

Универсально-сборные приспособления (УСП) собираются из стандартизованных деталей и узлов, что обеспечивает их высокую универсальность. УСП предназначены для механической обработки деталей различной конфигурации в мелкосерийном производстве. Их основное преимущество заключается в возможности быстрой сборки и разборки, а также многократного использования стандартных элементов при создании различных компоновок оснастки.

Компоненты УСП включают базовые детали (плиты, угольники, опоры), установочные элементы (призмы, центры, упоры), крепёжные детали (болты, винты, гайки), сборочные единицы (фиксаторы, зажимы). Области применения: механическая обработка в мелкосерийном производстве, контрольные операции, сборочные работы, установка и закрепление заготовок. Практические примеры: установка деталей на призмы для фрезерования, закрепление корпусных деталей при сверлении, базирование валов при токарной обработке.

Сборно-разборные приспособления (СРП) отличаются возможностью многократной перекомпоновки конструкции. Они применяются для механической обработки, сборки и контроля деталей в серийном производстве. СРП позволяют оперативно изменять схему установки и закрепления деталей путем перестановки базовых элементов и узлов, что делает их незаменимыми при необходимости частой смены производственной программы.

Конструктивные элементы СРП включают базовые несущие элементы, установочные узлы, зажимные механизмы, направляющие устройства, соединительные элементы. Области использования: механическая обработка, сборочные операции, контрольные работы, установка и закрепление деталей. Практическое применение: обработка комплектов деталей в разных позициях, сборка узлов с различными компоновками, контроль геометрических параметров, позиционирование деталей при различных операциях.

Все виды переналаживаемой оснастки характеризуются рядом общих особенностей: возможностью быстрой перенастройки под различные типоразмеры деталей, минимальным временем на переналадку оборудования, универсальностью конструктивных элементов, возможностью многократного использования и простотой обслуживания. Применение такой оснастки позволяет предприятиям существенно повысить гибкость производства, сократить время на подготовку производства и оперативно перестраиваться под выпуск новой продукции.

Рекомендации по выбору типа оснастки зависят от типа производства (серийности), номенклатуры обрабатываемых деталей, требуемой точности обработки, необходимой производительности и экономических показателей. Практические рекомендации: для единичного производства - УСП, для мелкосерийного - СРП, для среднесерийного - УНП, для крупносерийного - СНП.

Эффективность использования переналаживаемой оснастки определяется скоростью переналадки оборудования, универсальностью конструктивных элементов, возможностью многократного использования, экономическими показателями и простотой обслуживания. Это делает её оптимальным выбором для современных производственных условий, где требуется быстрая адаптация к изменяющимся требованиям рынка и производственной программы [74].

Для формирования классификации быстропереналаживаемой оснастки разберем что это такое.

Быстро переналаживаемая оснастка — это элементы технологического оборудования, которые можно быстро адаптировать под разные конфигурации CubeSat без замены базовых компонентов. Классификация строится на типе оснастки, степени автоматизации и назначении (таблица 3.4 – 3.8).

Таблица 3.4 - Классификация по типу оснастки

Категория	Описание	-Примеры
Модульные кондукторы	Съёмные шаблоны с универсальными креплениями для позиционирования компонентов.	Кондуктор для монтажа солнечных панелей с магнитными фиксаторами.
Быстросъёмные адаптеры	Интерфейсы для смены инструментов (паяльники, грайферы) за секунды.	Пневматический адаптер SCHUNK SWS для автосмены грайферов.
Универсальные держатели	Оснастка, подходящая для нескольких типов компонентов (антенны, платы).	Держатель с регулируемыми зажимами под разные диаметры антенн.
Перенастраиваемые шаблоны	CAD-оптимизированные шаблоны, изменяемые под новые конструкции.	3D-печатный шаблон для сверления отверстий под крепёж ISO/DIN.

Таблица 3.5 - Классификация по степени автоматизации переналадки

Категория	Описание	Пример	Время переналадки
Полностью автоматическая	Робот самостоятельно меняет оснастку по команде из Цифрового двойника.	Автосмена грайферов KUKA LBR iiwa через ROS Industrial.	≤ 10 минут
Полуавтоматическая	Оператор выполняет часть действий (например, фиксацию), робот — остальное.	Установка кондуктора с помощью направляющих штифтов + автоматическая калибровка.	≤ 30 минут
Ручная	Переналадка требует полного участия оператора.	Замена крепёжных пластин с	≥ 1 час

Категория	Описание	Пример	Время переналадки
		помощью шестигранника.	

Таблица 3.6 - Классификация по назначению

Категория	Функция	Примеры
Монтажная оснастка	Фиксация компонентов при сборке (корпус, платы, антенны).	Вакуумные присоски для удержания панелей корпуса.
Проверочная оснастка	Контроль качества (геометрия, электрические параметры).	КИМ-шаблон с датчиками для измерения отклонений.
Тестовая оснастка	Испытания на вибростойкость, термоустойчивость.	Вибрационный стенд с адаптерами под CubeSat 6U/12U/16U.
Транспортная оснастка	Перемещение компонентов между зонами ИРПЯ.	Паллеты с RFID-метками для автономных тележек (AGV).

Таблица 3.7 - Классификация по стандартизации

Категория	Описание	Примеры
Стандартизированная	Оснастка, соответствующая отраслевым стандартам (ISO, ECSS, NASA).	Крепёжные пластины ISO 4762.
Кастомная	Уникальные решения под специфические задачи (например, нестандартная полезная нагрузка).	3D-печатный держатель для экспериментального спектрометра.

Категория	Описание	Примеры
Гибридная	Комбинация стандартных и кастомных элементов.	Универсальный кондуктор с заменяемыми вставками под разные миссии.

Таблица 3.8 - Классификация по типу интерфейса

Категория	Описание	Примеры
Механические	Физические крепления (зашёлки, штифты, магниты).	Магнитные фиксаторы Tyvak QuickSwap.
Пневматические	Использование сжатого воздуха для фиксации/отпускания.	Пневмозажимы Festo для удержания электронных плат.
Электрические	Разъёмы и сенсоры для автоматического распознавания оснастки.	RFID-метки на паллетах для идентификации в системе MES.

Исходя из сформированной классификации можно выделить ключевые принципы проектирования, такие как:

- 1) Модульность. Оснастка должна состоять из взаимозаменяемых блоков;
- 2) Совместимость. Использование стандартных интерфейсов (ISO, ROS-пакеты);
- 3) Цифровая интеграция. Оснастка с метаданными для цифрового двойника.

Классификация помогает систематизировать оснастку ИРПЯ, ускоряя её выбор и внедрение. Это критически важно для гибкого производства CubeSat, где частая смена конфигураций - норма.

2.3. Разработка структурно-функциональной модели функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки

2.3.1. Структурная модель функционирования

Для организации серийного роботизированного производства была разработана структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, обеспечивающих быструю переналадку и кастомизацию производственных участков. Модель описывает взаимодействие элементов ячейки, ключевые процессы, действия при переналадке и алгоритм адаптации под новые задачи (рисунок 3.4).

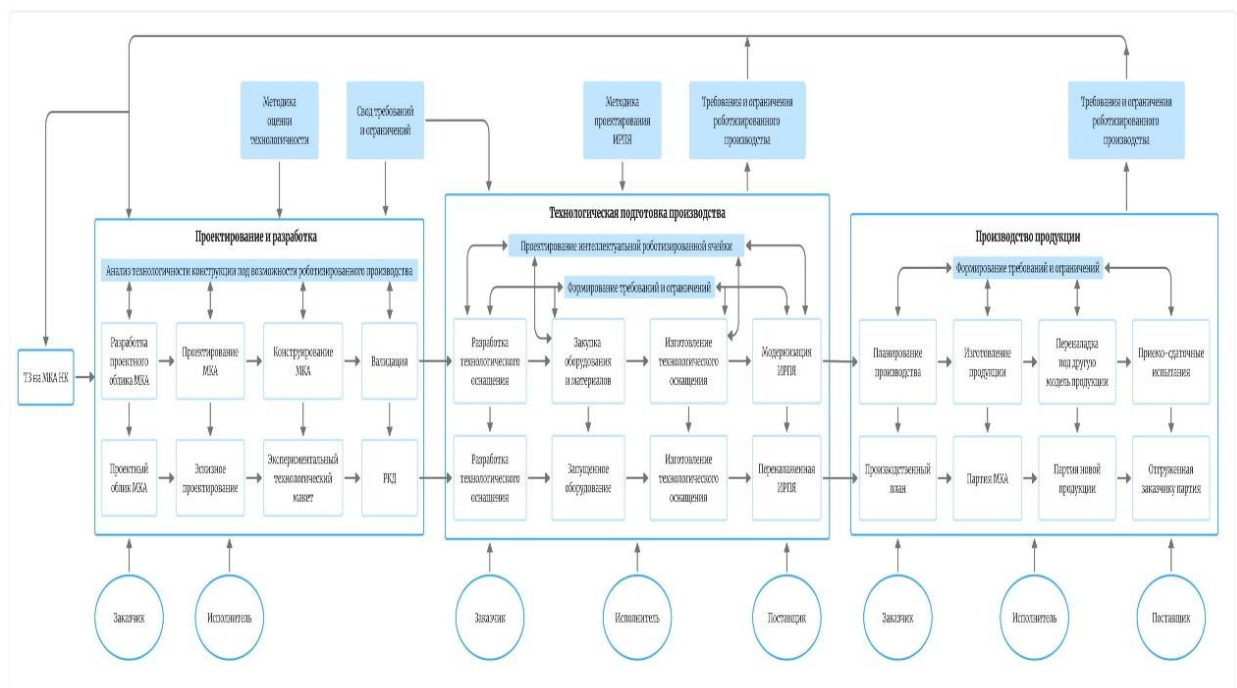


Рисунок 3.4 – Структурно-функциональная модель функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки

Далее сбыли сформированы действия, связанные с переналадкой:

- 1) Подготовка. Нужно провести анализ новой конфигурации (CAD-модель, требования к точности), а также сформировать инструкции в AR формате для оператора;

2) Демонтаж старой оснастки. Нужно реализовать систему автоматической смены инструментов робота (например, замена паяльника на грейфер), в том числе возможное снятие кондукторов и адаптеров (магнитные фиксаторы - 2 мин);

3) Установка новой оснастки. Нужно предусмотреть монтаж кондукторов под новую полезную нагрузку и автоматическую калибровку системы технического зрения под габариты компонентов;

4) Программирование. Нужно обеспечить загрузку новых траекторий из цифрового двойника, в том числе автоматическую настройку параметров пайки/монтажа;

5) Тестирование ИРПЯ после переналадки, которая включает проверку точности (± 0.05 мм) и пробный цикл сборки (1 аппарат).

Далее представлен пример (таблица 3.9) работы данной модели на примере перехода с научной миссии (спектрометр) на коммерческую (оптическая камера).

Таблица 3.9- Пример функционирования модели

Этап	Действия	Время
Демонтаж	Снятие кондуктора для спектрометра, автоматическая смена паяльника на грейфер.	15 мин
Установка	Монтаж кондуктора под камеру, калибровка зрения под габариты 150×150 мм.	25 мин
Программирование	Загрузка траекторий монтажа камеры из цифрового двойника.	10 мин
Тестирование	Проверка точности позиционирования (± 0.04 мм), пробная сборка.	30 мин
Итог	Общее время переналадки: 80 минут (ранее — 4 часа).	

Так же для функционирования данной модели были разработаны рекомендации, связанные с вспомогательной интеграцией с элементами Индустрии 4.0.

- 1) IoT-датчики: Мониторинг вибраций, температуры, влажности в реальном времени;
- 2) AI-аналитика: Прогнозирование износа оснастки на основе данных цифрового двойника;
- 3) MES-система: Управление OEE (Overall Equipment Effectiveness), планирование переналадок.

Благодаря данным разработкам можно сделать вывод, что модель обеспечивает гибкость и скорость адаптации ИРПЯ под новые задачи, что критически важно для рынка CUBESAT с его быстро меняющимися требованиями.

2.3.2. Критерии и показатели быстрой переналадки

Для оценки эффективности переналадки ИРПЯ используются были сформированы следующие критерии и показатели:

- 1) Скорость переналадки. Целью этого критерия является минимизация времени простоя. Под временем полного цикла переналадки понимается демонтаж старой оснастки и установка новой, а также калибровка программ роботов);
- 2) Стоимость переналадки. Целью этого критерия является снижение затрат на переналадку. Под затратами на переналадку включается труд, энергию, износ оборудования;
- 3) Ремонтопригодность и надежность. Целью этого критерия является минимизация простоев из-за поломок;
- 4) Точность после переналадки. Целью критерия является сохранение качества сборки за счет показателей погрешности позиционирования компонентов;

5) Гибкость и адаптивность. Целью критерия является поддержка разнообразных конфигураций;

6) Безопасность. Целью критерия является защита персонала и оборудования;

7) Энергоэффективность. Целью критерия является снижение энергопотребления.

Примеры из практики представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Примеры

Компания	Улучшение	Показатели
Skoltech	Внедрение магнитных кондукторов	Время переналадки: 4 ч → 1.5 ч
Tyvak	Использование 3D-печатной оснастки	Стоимость переналадки: \$800 → \$300
Planet Labs	Интеграция ИИ для калибровки	Точность: ±0.1 мм → ±0.04 мм

Оптимизация этих показателей позволяет сократить время переналадки на 60%, повысив конкурентоспособность производства CUBESAT.

Разработка и внедрение эффективной системы быстрой переналадки технологического оснащения ИРПЯ для сборки малых космических аппаратов nano-класса типа CUBESAT является неотъемлемым условием достижения гибкости и экономической эффективности производства. Настоящий параграф был посвящен решению ключевой задачи: формированию научно обоснованной системы критериев и показателей, позволяющих объективно оценивать, управлять и совершенствовать процесс переналадки оснастки в условиях высокоточной роботизированной сборки.

2.4. Разработка целевой функции оптимизации уровня роботизации по критерию трудоемкости при внедрении интеллектуальных производственных ячеек

Для разработки целевой функции рассматривается технологический процесс, состоящий из множества операций $I = \{1, 2, \dots, n\}$. Для каждой операции i принимается решение о способе её выполнения:

- $x_i = 0$ – ручная операция на обычном сборочном участке;
- $x_i = 1$ – автоматизированная операция с применением интеллектуальной роботизированной производственной ячейки (ИРПЯ).

Целью является минимизация полной годовой трудоёмкости процесса $T_{\text{полн}}(\mathbf{x})$ при соблюдении бюджетных, производственных и технологических ограничений.

Технологическая трудоёмкость (формула 6) учитывает непосредственное участие человека в выполнении операции.

$$T_{\text{тех}}(\mathbf{x}) = \frac{Q}{60} \sum_{i=1}^n [(1 - x_i) \cdot t_{\text{шт}i}^{\text{р}} + x_i \cdot (t_{\text{шт}i}^{\text{и}} \cdot k_{\text{набл}})] [\text{чел-ч/год}] \quad (6)$$

где:

Q – годовая программа выпуска, шт.;

$t_{\text{шт}i}^{\text{р}}$ – штучное время ручного выполнения операции, мин;

$t_{\text{шт}i}^{\text{и}}$ – штучное время выполнения операции в ИРПЯ (включая машинное и автоматизированное вспомогательное время), мин;

$k_{\text{набл}}$ – коэффициент занятости оператора-наблюдателя (для ИРПЯ благодаря встроенным системам мониторинга и самодиагностике $k_{\text{набл}}$ принимается в диапазоне 0,05...0,15, что ниже, чем для обычного автоматизированного оборудования).

Трудоёмкость обслуживания (формула 7) отражает затраты труда на ремонт, переналадку и техническое обслуживание ИРПЯ.

$$T_{\text{обсл}}(\mathbf{x}) = \frac{Q}{60} \sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{t_{\text{рем}i} \cdot \lambda_i \cdot T_{\text{год}}}{T_{\text{раб}i}} + \frac{t_{\text{нал}i} \cdot n_{\text{пер}i}}{60} \right) [\text{чел-ч/год}] \quad (7)$$

где для интеллектуальных ячеек характерно:

- снижение интенсивности отказов λ_i благодаря встроенной диагностике и прогнозированию;
- уменьшение времени переналадки $t_{\text{нал}i}$ за счёт автоматической смены инструмента и программной настройки;
- возможность самообучения, сокращающая количество переналадок $n_{\text{пер}i}$ при частой смене номенклатуры.

Трудоёмкость управления и подготовки производства включает программирование, планирование и контроль качества (формула 8).

$$T_{\text{упр}}(\mathbf{x}) = T_{\text{прог}}(\mathbf{x}) + T_{\text{план}}(\mathbf{x}) + T_{\text{контр}}(\mathbf{x}) \quad (8)$$

Программирование в данном случае амортизируется на количество типоразмеров $N_{\text{тип}}$ (формула 9):

$$T_{\text{прог}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \frac{t_{\text{прог}i}}{N_{\text{тип}}} \quad (9)$$

Интеллектуальные ячейки могут использовать адаптивные управляющие программы, генерируемые CAD/CAM-системами, что снижает $t_{\text{прог}i}$. Планирование (формула 10) усложняется с ростом числа автоматизированных операций, но интеллектуальные MES-системы оптимизируют загрузку:

$$T_{\text{план}}(\mathbf{x}) = t_{\text{план}}(1 + \alpha \sum_{i=1}^n x_i) \quad (10)$$

Где α – коэффициент роста трудоёмкости планирования на одну ИРПЯ (для интеллектуальных ячеек α меньше за счёт интеграции с ERP).

Контроль качества в данном случае вычисляется по формуле (11):

$$T_{\text{контр}}(\mathbf{x}) = \frac{q}{60} \sum_{i=1}^n \left[(1 - x_i) \cdot t_{\text{контр}i}^p + x_i \cdot t_{\text{контр}i}^и \right] \quad (11)$$

Встроенные сенсорные системы и машинное зрение в ИПЯ позволяют выполнять контроль в процессе обработки, поэтому $t_{\text{контр}i}^{\text{и}} \ll t_{\text{контр}i}^{\text{п}}$, а в некоторых случаях контроль полностью автоматизирован и не требует участия человека. Полная трудоёмкость высчитывается по формуле (12).

$$T_{\text{полн}}(\mathbf{x}) = T_{\text{тех}}(\mathbf{x}) + T_{\text{обсл}}(\mathbf{x}) + T_{\text{упр}}(\mathbf{x}) \quad (12)$$

Основным критерием является минимизация полной годовой трудоёмкости (формула 13).

$$\boxed{T_{\text{полн}}(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in \{0,1\}^n}} \quad (13)$$

Система ограничений высчитывается исходя из бюджетных и производственных ограничений. Бюджетное ограничение зависит от капитальных затрат, которые не должны превышать доступный бюджет B (формула 14).

$$C_{\text{кап}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \left[x_i \cdot (\Pi_{\text{оби}} + \Pi_{\text{осни}}) + (1 - x_i) \cdot \Pi_{\text{рми}} \right] + C_{\text{интегр}}(\mathbf{x}) \leq B \quad (14)$$

Производственное ограничение должна являться фактической производительностью (формула 15), которая обеспечивает годовую программу с резервом $K_{\text{рез}}$.

$$P_{\text{факт}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\max_i [(1-x_i)t_{\text{шт}i}^{\text{п}} + x_i t_{\text{шт}i}^{\text{и}}]} \geq \frac{Q}{T_{\text{год}}} \cdot K_{\text{рез}} \quad (15)$$

Технологические ограничения являются совместимостью операций, возможность передачи между ручными и автоматизированными участками и др. – они задаются матрицей совместимости $M(i, j)$.

При интеграции нескольких ИРПЯ в единую систему возникает дополнительное снижение трудоёмкости за счёт автоматического перераспределения заданий между ячейками, централизованного сбора данных и предиктивной аналитики и сокращения межоперационных заделов и времени транспортировки (формула 16).

Это можно учесть введением корректирующего множителя $\varphi(m) \leq 1$, где $m = \sum_{i=1}^n x_i$ – число роботизированных операций:

$$T_{\text{полн}}^{\text{скор}}(\mathbf{x}) = \varphi(m) \cdot T_{\text{полн}}(\mathbf{x}) \quad (16)$$

Функция $\varphi(m)$ убывает с ростом m (например, $\varphi(m) = 1 - \gamma \cdot m^\delta$, где γ, δ – эмпирические коэффициенты).

Для практической реализации рекомендуется следующий подход. В первую очередь рассчитать для каждой операции i ожидаемое снижение трудоёмкости при замене ручного труда на ИРПЯ (формула 17).

$$\Delta T_i = t_{\text{шт}i}^{\text{р}} - t_{\text{шт}i}^{\text{и}} \cdot k_{\text{набл}} - \Delta t_{\text{обсл}i} - \Delta t_{\text{упр}i} \quad (17)$$

Далее упорядочить операции по убыванию ΔT_i , последовательно добавлять операции в множество автоматизированных, пока позволяет бюджет B , и на каждом шаге вычислять фактическую трудоёмкость $T_{\text{полн}}$ и выбрать вариант с минимальной трудоёмкостью среди допустимых по бюджету и производительности.

Например, процесс из 10 операций, $Q = 10\,000$ шт/год, $B = 15$ млн руб. Параметры интеллектуальных ячеек: $k_{\text{набл}} = 0,1$, снижение времени переналадки на 40%, сокращение контрольных операций на 80% по сравнению с ручным контролем.

Таблица 3.11 – Расчет эффекта при уровне роботизации

Уровень роботизации	Капзатраты, млн руб.	Трудоёмкость, чел-ч/год	Эффект
0%	2,0	18 500	–
30% (3 операции)	6,5	12 300	-34%
50% (5 операций)	14,8	8 900	-52%
60% (6 операций)	18,2 (превышение)	7 600	бюджет ×

Оптимальное решение: автоматизация 5 операций (50%) позволяет снизить трудоёмкость более чем вдвое при полном использовании бюджета.

Предложенная целевая функция, основанная на минимизации полной трудоёмкости, 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

Формула ΔT_i комплексно оценивает эффект от внедрения ИРПЯ по всем видам трудозатрат:

- Первое слагаемое ($t_{штi}^P$) – исходные затраты;
- Второе слагаемое ($t_{штi}^И \cdot k_{набл}$) – новые затраты непосредственного труда;
- Третье и четвёртое ($\Delta t_{обслi}, \Delta t_{упрi}$) – изменения в сопутствующих трудозатратах.

Если $\Delta T_i > 0$, автоматизация операции i приводит к чистой экономии труда. Чем больше ΔT_i , тем выше приоритет данной операции для роботизации с точки зрения снижения трудоёмкости.

Например, пусть для операции:

- $t_{шт}^P = 10$ мин;
- $t_{шт}^И = 3$ мин (робот работает быстрее);

- $k_{\text{набл}} = 0,1$ (оператор занят 10% времени);
- $\Delta t_{\text{обсл}} = +0,2$ мин (небольшое увеличение затрат на обслуживание);
- $\Delta t_{\text{упр}} = -0,3$ мин (экономия за счёт автоматического контроля).

Тогда:

$$\Delta T = 10 - 3 \cdot 0,1 - 0,2 - (-0,3) = 10 - 0,3 - 0,2 + 0,3 = 9,8 \text{ мин}$$

В результате получается огромный выигрыш – операция практически полностью освобождает рабочего.

Если бы $k_{\text{набл}}$ был выше (например, 0,5), а $\Delta t_{\text{обсл}}$ больше, эффект мог бы стать отрицательным.

Таким образом, формула позволяет количественно обосновать выбор операций для автоматизации.

2.5. Разработка структуры проектной команды разрабатывающей ИРПЯ

Для реализации подобных ячеек требуется формирование автономной команды, способной решать сложные инженерные задачи. В связи с этим была разработана структура команды, которая способна создавать ИРПЯ для производства МКА НК типа CUBESAT (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 - Структура проектной команды

Она была построена по матричному принципу с четким выделением трех функциональных блоков:

Заказчик — определяет требования и принимает результат.

Команда исполнителей — реализует проект (ключевой блок).

Поставщик — обеспечивает ресурсами.

Центральной фигурой в этой схеме является «Руководитель проекта», который обладает уникальной кросс-дисциплинарной компетенцией, позволяющей ему понимать задачи каждого специалиста и эффективно координировать их работу.

На первом этапе формирования любого проекта происходит взаимодействие сотрудников команды проекта с потенциальным заказчиком. Маркетолог с технологом и руководителем проекта определяют с заказчиком целевые показатели, составляют техническое задание и подписывают договор на выполнение работ. Причем «Руководитель проекта» и «Технолог проекта» при составлении ТЗ могут обращаться к будущему «Главному разработчику проекта», который в свою очередь может привлекать «Инженер-конструктора, симуляциониста», «Программиста роботов, пуско-наладчика», «Инженера-электроника».

На втором этапе, после подписания договора на выполнение работ полноценно начинает работать команда исполнителей, которая делится на 2 подгруппы: проектировщики и реализаторы. «Главный разработчик проекта» совместно с «Технологом проекта» и «Инженер-конструктором, симуляционистом» разрабатывают 3D-модель ИРПЯ, в том числе технологическое оснащение, планировочное решение ячейки, создают цифровой двойник производственного процесса и осуществляют подбор компонентов, взаимодействуя с «Отделом снабжения».

После разработанной 3D-модели ИРПЯ «Главный разработчик проекта» передает конструкторскую документацию (КД) «Инженеру-электронике», для того чтобы он мог проработать данный проект, разработать электрическую документацию, схемы подключения оборудования, сенсоров, обеспечить электромагнитную совместимость и составить перечень необходимых компонентов для формирования шкафа управления ИРПЯ. Далее необходимая документация должна перейти в отдел снабжения.

Параллельно данному процессу КД передается и «Специалисту изготовления оснастки», для того чтобы он мог начать следующий физический этап проекта, изготавливать технологическое оснащение».

В это время «Инженер-электроник» производит монтаж электрических шкафов. «Программист роботов, пуско-наладчик» на основе ранее разработанного «Инженер-конструктором, симуляционистом» цифрового

двойника начинает формирование управляющих программ для роботов и вспомогательного, периферийного оборудования, а также настройку SCADA системы.

После того, как «Поставщик» поставил всё необходимое оборудование, должен начинаться финальный, третий этап проекта «Пуско-наладочные работы».

На этом этапе полноценно включается вторая часть команды. «Слесарь-монтажник» совместно с «Инженером-электроником» осуществляет монтаж оборудования, «Программист роботов» физически запускает роботов и корректирует их управляющие программы. В случае возникновения отклонений, «Главный разработчик проекта» имеет право задействовать всех членов команды для устранения этих отклонений. Если возникшие во время пуско-наладочных работ проблемы не имеют технических решений, то тогда в работу должны включаться «Главный технолог» и «Руководитель проекта». Их участие может потребоваться в качестве пересмотра технологического процесса выполнения операций или согласования возможных изменений (корректировка ТЗ) с «Заказчиком».

Заместителем «Руководителя проекта» может стать только «Главный разработчик проекта»

Для эффективного управления такой командой «Руководитель проекта» должен обладать следующими знаниями и компетенциями:

В результате формирования такой команды, компания будет иметь преимущества, а именно:

Полный цикл — команда охватывает все этапы: от требований до пусконаладки.

Цифровая непрерывность — симуляционист и программист работают в единой среде, минимизируя ошибки переноса.

Гибкость — наличие собственного специалиста по оснастке позволяет быстро изготавливать и дорабатывать нестандартные элементы.

Управляемость — руководитель с широкой компетенцией выступает "переводчиком" между узкими специалистами.

Данная структура позволяет реализовывать проекты по созданию ИРПЯ для сборки CUBESAT в формате «под ключ», обеспечивая высокое качество, соблюдение сроков и соответствие требованиям заказчика.

2.6. Выводы по главе 3

Глава диссертационного исследования была посвящена решению центральной практической задачи – разработке комплексного инструментария для организации ИРПЯ, предназначенной для высокоточной и гибкой сборки малых космических аппаратов nano-класса формата CUBESAT.

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

Результаты главы напрямую касаются технологической подготовки производства, проектирования оборудования (оснастки) и разработки технологических процессов для обработки (сборки) уникальных изделий микро-масштаба.

Разработанный инструментарий (методики, алгоритмы, система КРП) предоставляет конкретные, воспроизводимые решения для промышленных предприятий, планирующих внедрение или модернизацию роботизированного производства малых космических аппаратов. Он позволяет существенно сократить время и стоимость ТПП, повысить точность, гибкость и общую эффективность (ОЕЕ) сборочных операций.

Глава 3 представляет законченный комплекс научно-обоснованных и практически ориентированных решений по организации ИРПЯ для сборки CUBESAT. Разработанный инструментарий (методика организации, алгоритм проектирования СТО, система критериев и методов оптимизации переналадки) является ключевым результатом диссертации в рамках

заявленной специальности. Он обеспечивает переход от теоретических принципов адаптации конструкции и требований роботизации к созданию реальной, высокоэффективной и гибкой производственной системы для сборки малых космических аппаратов нано-класса. Данный инструментарий готов к практической апробации и внедрению, что составит содержание последующего этапа исследования.

4 КОМПЛЕКСНАЯ АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Данная глава диссертационного исследования представляет собой практическую верификацию и внедрение комплексного инструментария организации ИРПЯ для сборки малых космических аппаратов нано-класса типа CUBESAT, разработанного в Главе 3. Целью главы являлась экспериментальная оценка эффективности, точности, гибкости и экономической целесообразности предложенных решений в условиях, максимально приближенных к реальному производству, а также их апробация на пилотном участке.

4.1 Выбор типа организации производства

Одним из основных принципов построения технологических процессов является принцип совмещения технических, экономических и организационных задач, решаемых в данных производственных условиях. Проектируемый технологический процесс должен обеспечить выполнение всех требований к точности и качеству изделия, предусмотренных конструкторской документацией (КД), при наименьших затратах труда и минимальной себестоимости, а также при изготовлении изделий в количествах и сроки, установленные производственной программой.

Тип производства — это совокупность признаков, определяющих организационно-технологическую характеристику производственного процесса, осуществляемого как на одном рабочем месте, так и на их совокупности в масштабе участка, цеха, завода.

Существует множество типов производства, рассмотрим главные.

Поточным производством называют прогрессивный способ организации производства, характеризующийся расчленением производственного процесса на отдельные, относительно короткие операции, выполняемые на специально оборудованных, последовательно расположенных рабочих местах - поточных линиях. Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых в течение продолжительного времени. Коэффициент

закрепления операций в соответствии с ГОСТ 3.1108-74 для массового производства равен или меньше единицы. Таким образом на каждом рабочем месте закрепляется выполнение одной постоянно повторяющейся операции. При этом используется специальное высокопроизводительное оборудование, которое расставляется по поточному принципу (то есть по ходу технологического процесса) и во многих случаях связывается транспортирующими устройствами и конвейерами с постами промежуточного автоматического контроля, а также промежуточными складами-накопителями заготовок, снабжёнными автоматическими перегружателями (роботами-манипуляторами). Последние обеспечивают смену заготовок на отдельных рабочих местах и пунктах контроля [75]. Используются высокопроизводительные многошпиндельные автоматы и полуавтоматы, сложные станки с ЧПУ и обрабатывающие центры. Широко применяются автоматические линии и автоматизированные производственные системы, управляемые ЭВМ.

Конвейерным производством называется система поточной организации производства на основе конвейера, при которой оно разделено на простейшие короткие операции, а перемещение деталей осуществляется автоматически. Это такая организация выполнения операций над объектами, при которой весь процесс воздействия разделяется на последовательность стадий с целью повышения производительности путём одновременного независимого выполнения операций над несколькими объектами, проходящими различные стадии. Конвейером также называют средство продвижения объектов между стадиями при такой организации. Подобное расчленение производственного процесса на простейшие операции позволяет одному рабочему выполнять какую-либо одну операцию, не тратя время на смену инструментов и передачу деталей другому рабочему, такая параллельность производственного процесса позволяет уменьшить количество рабочих часов, необходимых для производства одного изделия. Недостатком системы производства является повышенная монотонность труда. Конвейерная линия должна настраиваться

на разную скорость работы для обеспечения оптимальной интенсивности труда в зависимости от трудоспособности людей - относительно более быстро работа идёт первые 2-3 часа, после обеда и перед окончанием рабочего дня, при этом для борьбы с усталостью оптимальная продолжительность каждой операции должна составлять 50-60 секунд и должна происходить ротация рабочих.

Непоточное производство характеризуется неравномерным движением полуфабриката в процессе изготовления изделия, т. е. технологический процесс изготовления изделия прерывается вследствие различной продолжительности выполнения операций, а полуфабрикаты накапливаются у рабочих мест и на складах. Сборку изделий начинают лишь при наличии на складах полных комплектов деталей. В непоточном производстве отсутствует такт выпуска, а производственный процесс регулируется графиком, составленным с учетом плановых сроков и трудоемкости изготовления изделий. Непоточный метод применяется в основном в единичном и мелкосерийном производстве и характерен для экспериментального и ремонтно-механического цехов, цеха мелких серий и других специальных цехов предприятия (например, цехи с оборудованием ГПС — гибкие производственные системы и т.п.).

Концепция матричного производства состоит в том, что сборочные операции в цехе выполняются не на жестко организованном последовательном конвейере, а внутри отдельных стандартных производственных ячеек, которые размещаются в цехе в узлах регулярной сетки - матрицы. В ячейках устанавливаются промышленные роботы и поворотные столы с необходимой технологической оснасткой, приемные приспособления для инструментов, специализированное оборудование [76]. Ячейки за счет сменного инструмента и оснастки могут перенастраиваться на различные технологические операции: либо производственные — сварка, сборка узлов с помощью резьбовых соединений и т.д., либо операции контроля — неразрушающий контроль материалов, 3D-сканирование формы сложных изделий и т.д.

«Получение на складе» и транспортировка комплектующих, деталей, узлов, материалов, сменного инструмента между ячейками осуществляется автоматическими тележками (интеллектуальное средство доставки) – мобильными роботами по программе с учетом комплектации данного изделия и производственной загрузки отдельных ячеек. По прибытию тележки в ячейку робот «забирает» детали, материалы, инструмент и начинает работать с ними.

Таким образом обеспечивается гибкость по всей цепочке выпуска изделия. При смене производственного задания система автоматически перестраивается, и становится возможным выпуск партий уникальных изделий в рамках массового производства.

Преимущества и особенности матричного производства:

- Гибкость (любая из ячеек может выполнить любую из операций через смену инструмента);
- Разделение логистики и производства;
- Масштабируемость;
- Унификация средств производства;
- Возможности оптимизации;
- Автоматизированный контроль хода производства (матричный характер производства облегчает внедрение любых оптимизационных эвристик, а также методов планирования и управления процессом).

С развитием робототехники и удешевлением производства промышленных роботов в течение 5-10 лет будет происходить постепенный переход конвейерных производств к матричным.

Программирование и перепрограммирование роботов можно осуществить с помощью комплекта, специализированного ПО.

Рост спроса на уникальные изделия меняет современную промышленность. Нестабильная рыночная ситуация еще более повышает актуальность экономичного выпуска малых партий продукции.

4.2 Описание разработанных интеллектуальных роботизированных производственных ячеек

В данной научной работе разработана модель концептуального роботизированного интеллектуального производства МКА, включающая производственные участки от входного контроля материалов и комплектующих до испытаний МКА, содержащее роботизированное технологическое оборудование, программные и аппаратные средства идентификации и распознавания деталей и сборочных единиц (ДСЕ), автоматизированные средства транспортировки и хранения ДСЕ, программные и аппаратные средства контроля и испытания компонентов МКА ДЗЗ.

В таблице 4.1 представлен перечень разработанных участков концептуального роботизированного интеллектуального производства МКА ДЗЗ матричного типа для реализации поставленной задачи.

Таблица 4.1 - Перечень участков концептуального роботизированного интеллектуального производства МКА ДЗЗ.

№	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

Концептуальное роботизированное интеллектуальное производство МКА ДЗЗ начинается с работы участка входного контроля компонентов (рисунок 4.1).

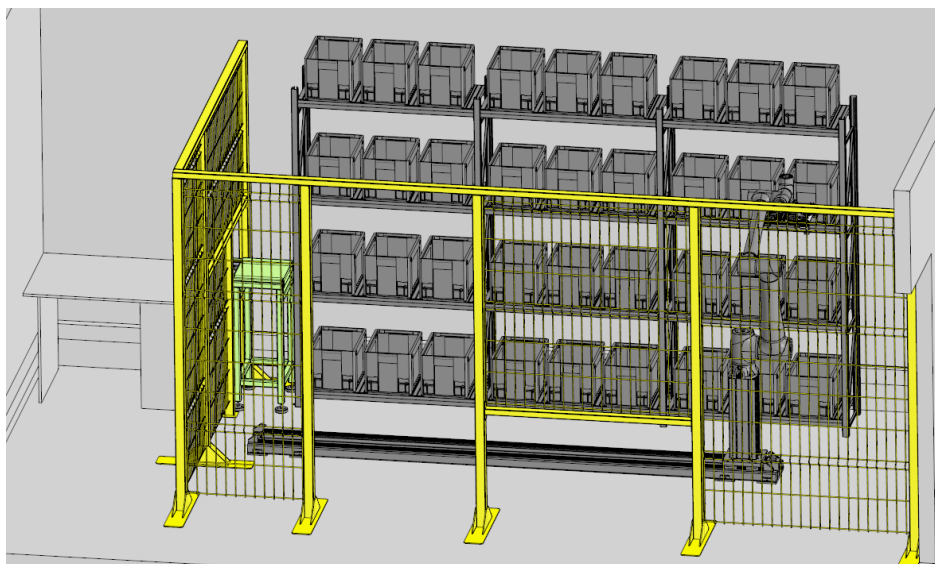


Рисунок 4.1 – Участок входного контроля компонентов

На участке осуществляется распаковка, входной контроль, штрихкодирование и хранение в автоматизированном штабелёре комплектующих и материалов для последующего производства МКА.



Рисунок 4.2 – Участок аддитивного изготовления и механической обработки

На участке аддитивного изготовления и механической обработки (рисунок 4.2) осуществляется разгрузка с автоматизированной тележки и установка в принтер материалов для печати. Далее на участке осуществляется печать корпусных деталей и адаптеров для подготовки комплектующих МКА

к роботизированной сборке. Так же на нем происходит механическая обработка стенок, после их изготовления.

На участке контроля геометрии (рисунок 4.3) осуществляется автоматический лазерный бесконтактный обмер и контактный обмер с построением сплайна сложной формы корпусных деталей МКА ДЗЗ.



Рисунок 4.3 – Участок контроля геометрии

На участке контроля и подготовки компонентов (рисунок 4.4) осуществляется установка адаптеров для удобства и возможности осуществления роботизированной сборки. После выполнения доработки все комплектующие устанавливаются в технологическое оснащение (ТО) и перемещаются на участок сборки (рисунок 4.5) в автоматизированную систему хранения с помощью автоматизированной тележки.



Рисунок 4.4 – Участок контроля и подготовки компонентов

На участке автоматизированной роботизированной сборки осуществляется сборка МКА ДЗЗ с использованием двух коллаборативных манипуляторов. Далее собранный МКА ДЗЗ перемещается на участок испытаний.

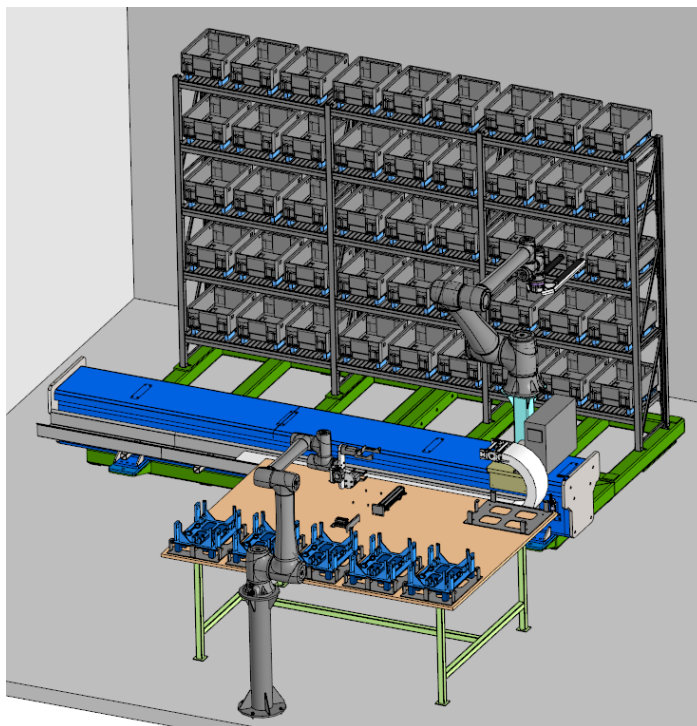


Рисунок 4.5 – Участок автоматизированной роботизированной сборки
На участке испытаний МКА ДЗЗ проходят приемосдаточные испытания и в дальнейшем перемещаются в зону упаковки и хранения готовых МКА ДЗЗ (рисунок 4.6) с помощью автоматизированного перемещения.



Рисунок 4.6 – Участок зоны упаковки и хранения

Разработанный перечень участков для интеллектуального роботизированного производства МКА является оптимальным для выполнения поставленной задачи, а именно реализации серийного производства малых космических аппаратов nano класса типа Cubsat [77].

Серийное роботизированное производство малых космических аппаратов МКА состоит из 7 участков. В результате разработки технологического процесса изготовления МКА, в первую очередь была разработана технологическая планировка интеллектуального роботизированного производства матричного типа (рисунок 4.7).

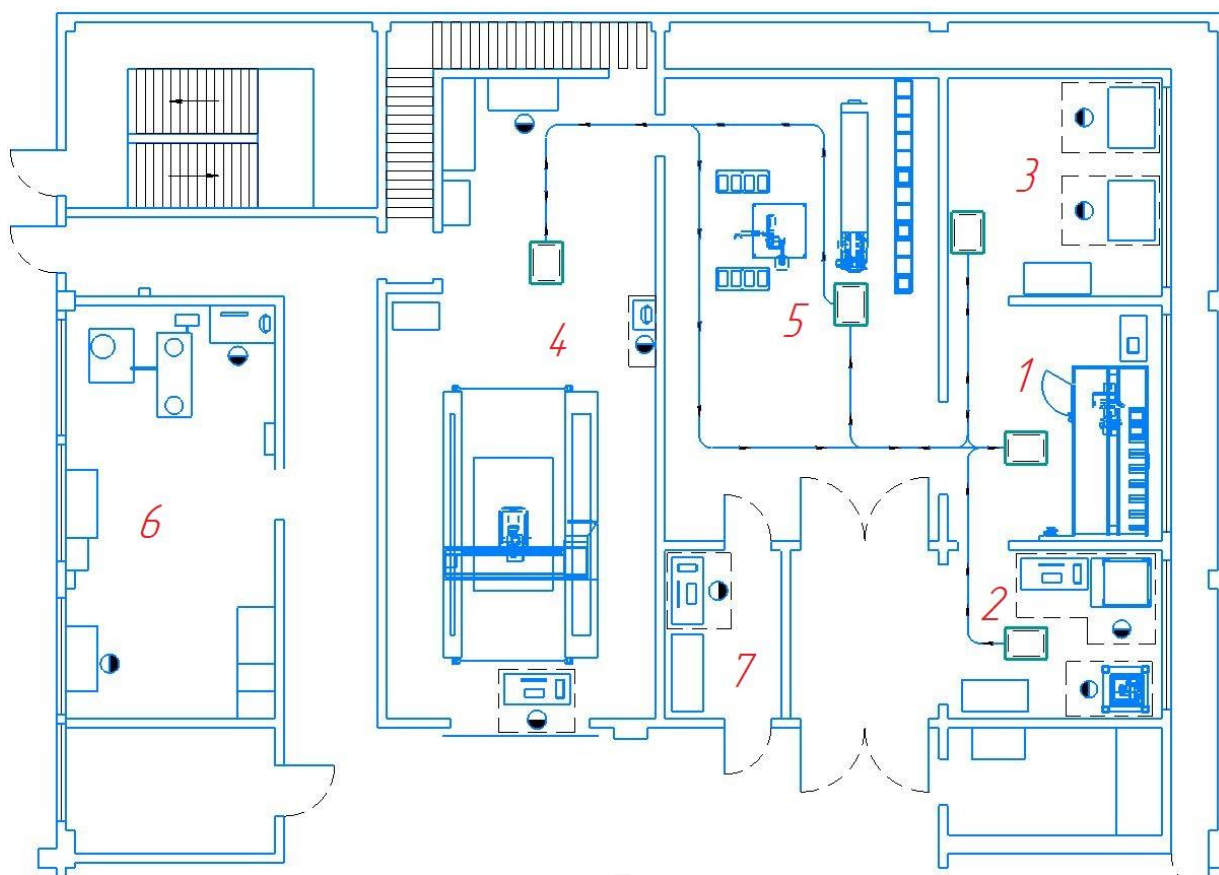


Рисунок 4.7 – Планировка автоматизированного роботизированного производства

4.3 Подбор оборудования для интеллектуальных роботизированных производственных ячеек

На территории каждого из участков роботизированного автоматизированного производства располагается перечень оборудования, представленный в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Перечень оборудования

№	Наименование	Наименование участка	Кол-во
1	2	3	4
1.	Автоматизированный штабелер	Участок входного контроля компонентов	1 компл.
2.	Робот-манипулятор DOBOT CR10		1 компл.
3.	Система штрих-кодирования		1 компл.
4.	3D принтер	Участок 3D печати и механической обработки	1 компл.
5.	ЧПУ фрезерный станок		1 компл.
6.	КИМ	Участок контроля геометрии	1 компл.
7.	Робот-манипулятор DOBOT CR10	Участок автоматизированной роботизированной сборки	1 компл.
8.	Робот-манипулятор DOBOT CR20		1 компл.
9.	Автоматизированная система хранения		1 компл.
11.	Электродинамическая вибрационная установка	Участок испытаний	1 компл.
12.	Высоковакуумная установка		
13.	Климатическая камера	Участок испытаний	1 компл.
14.	Ударная установка		1 компл.
15.	Автоматизированная тележка	Без привязки к участку	1 компл.

Автоматический штабелер, расположенный на территории участка входного контроля компонентов представлен на рисунке 4.8.

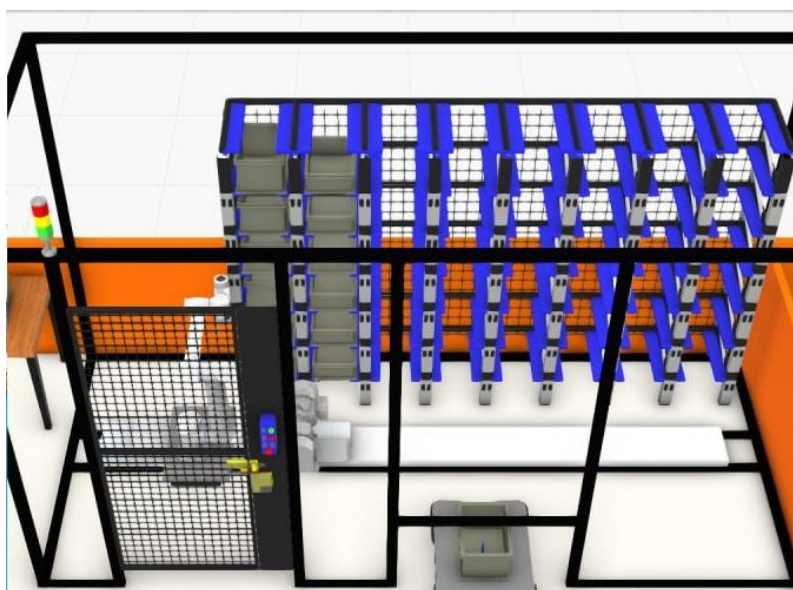


Рисунок 4.8 – Автоматизированный штабелер

Автоматизированный штабелер должен соответствовать требованиям для обеспечения максимальной производительности выполняемых работ. Рассмотрим его характеристики в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Характеристики автоматического штабелера

№	Наименование	Значение
1	Габаритный размер, мм	не более длина 5000 мм высота 2000 мм глубина 2500 мм
2	Габаритный размер ячеек, мм	Ширина 400 мм, Глубина 450 мм высота 300 мм
3	Количество ячеек	не менее 40 шт
4	Автоматизированный штабелёр не анкерится к полу	
5	Робот манипулятор	Грузоподъёмностью не менее 10 кг Количество осей 6 коллаборативный зона досягаемости 1300

Также автоматический штабелер должен обеспечить:

- Загрузку, хранение, выдачу и установку изделий на автоматизированную тележку;
- Обладать возможность интеграции с системами штрихкодирования и машинного зрения;
- Возможность увеличения кол-ва ячеек путем дробления, имеющихся по высоте пополам;
- Возможность замены стандартизированной тары на специальную в рамках габарита тары 400мм x 300мм x 120мм с учётом особенностей конструкции манипулятора извлечения и установки тары.

В автоматизированном штабелере все комплектующие хранятся в стандартизированной таре, это необходимо для использования одного захвата манипулятор на этапах загрузки и выгрузки комплектующих.

Систему штрихкодирования, расположенная на участке входного контроля представлена на рисунке 4.9 должна соответствовать следующим характеристикам, представленными в таблице 4.4.



Рисунок 4.9 – Система штрихкодирования

Таблица 4.4 - Характеристики системы штрихкодирования

№	Наименование	Значение
1	Способ печати	Прямая термопечать
2	Ширина печати, мм	от 10 до 150
3	Поддерживаемые штрих-коды	Aztec, Code 16K, Code 49, Data Matrix, Dot Code, EAN - 8, EAN-13, EAN.UCC 128, GridMatrix, HIBC 39, HIBC 128, MaxiCode, MSI (модифицированный Plessey), PDF417, Micro PDF417, Planet, Plessey, Postnet, QRCode, RSS-14 (разные вариации), Hanxin Code
4	Дальность сканирования сканера штрих-кода, мм	от 10 до 320
5	Размер области считывания штрих-кода, мм	не более 110×30

Основные требования:

- 1) Удобное нанесение штрих-кода на изделия;
- 2) Удобная система считывания.

3D принтер, расположенный на участке аддитивного изготовления и механической обработки представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – 3D принтер Total Z Anyform 500-PRO

3D принтер должен соответствовать следующим характеристикам, представленными в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Характеристики 3D принтера

№	Наименование	Значение
1	Подогрев стола	Прямая термопечать
2	Температура в камере	до 200°C
3	Температура печатного стола	до 200°C
4	Температура экструдера	до 500°C
5	Толщина слоя от	50 мкм
6.	Точность позиционирования	XY: 6,25 мкм, Z: 1,6 мкм
7.	Материал для печати	ABS, ASA, PLA, FLEX, RUBBER, HIPS, CAST, PC-ISO, Nylon 12, ULTEM 9085, ULTEM 1010, ULTRAN 630CF, PPSU, PSU, PEI
8.	Скорость печати	100 мм/с
9.	Область печати	500x500x500
10.	Электропитание	380 В

ЧПУ фрезерный станок, расположенный на участке аддитивного изготовления и механической обработки представлена на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Фрезерный станок Роутер 3220 В3

ЧПУ фрезерный станок должен соответствовать следующим характеристикам, представленными в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Характеристики фрезерного станка ЧПУ

№	Наименование	Значение
1	Рабочий стол X/Y/Z (мм)	320x200x38
2	Максимальная частота вращения, об/мин	24000
3	Скорость перемещения, мм/сек	60
4	Точность повторяемости	0,026 мм (26,0 мкм)/300 мм
5	Точность одностороннего позиционирования	0,052 мм (52,0 мкм)/300 мм
6.	Электропитание	220В, 50 Гц

Координатно-измерительная машина, расположенный на участке контроля геометрии представлена на рисунке 4.12



Рисунок 4.12 – Координатно-измерительная машина ZEISS MMZ G
20/30/20

Координатно-измерительная машина должен соответствовать следующим характеристикам, представленными в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Характеристики координатно-измерительная машина

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон измерений	X = 2500; Y = 3000; Z = 2000
Погрешность измерения длины по ISO 10360-2 с VAST Gold	MPE_E = (3,0 + L/400) μm; MPE_P = 2.3 μm; 18...22°C
Производительность сканирования по ISO 10360-4	MPE_THP = 3,1 μm за 68 сек

Высокоточные измерения:

- геометрических размеров крупногабаритных объектов;
- объектов с использованием компьютерной модели;
- объектов сложной формы с множеством элементов.

Робот–манипулятор, расположенный на участке автоматизированной роботизированной сборки представлен на рисунке 4.13.

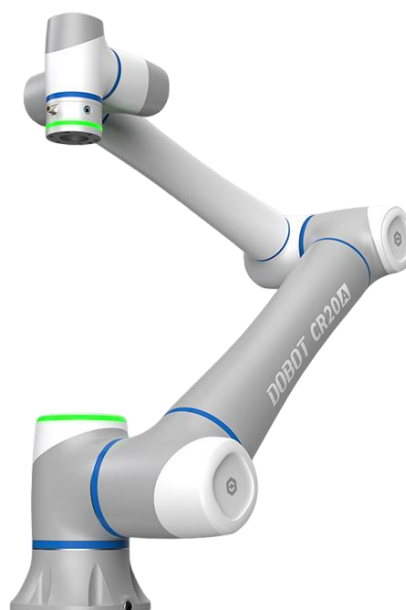


Рисунок 4.13 – Робот–манипулятор DOBOT CR20A

Робот–манипулятор должен соответствовать следующим характеристикам, представленными в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Характеристики робота–манипулятора

№	Наименование	Значение
1	Полезная нагрузка	не более 20 кг
2	Максимальный радиус действия	не менее 1700 мм
3	Монтажное положение	на полу
4	Повторяемость	$\pm 0,03$ мм
5	Количество осей вращения	6

Основные требования к оснащению роботов–манипуляторов, расположенным на участке автоматизированной роботизированной сборки:

- Робот–манипулятор должен быть оснащен Tool changer автоматическим — пневматическим. 1 часть на работе, 4 части на инструменте. Грузоподъемностью не менее 20 кг;

- Робот–манипулятор должен быть оснащен электрической отверткой с регулировкой момента затяжки под винты с шестигранной потайной головкой М3–М4;

- Робот–манипулятор должен быть оснащен двухпальцевым параллельным захватом – 2 шт;

- Робот–манипулятор должен быть оснащен станцией хранения инструмента – 4 штуки;
- Робот–манипулятор должен быть установлен на линейную ось;
- Робот–манипулятор должен обеспечивать возможность смены инструментов в процессе рабочего цикла в автоматическом режиме.

Электрическая отвертка должна соответствовать следующим требованиям:

- Технологическое оснащение робота–манипулятора должно содержать отвертку шестигранной для винтов М3–М4 с возможностью регулирования моментом заворачивания и затяжки, а также с реверсом направления;
- Технологическое оснащение робота–манипулятора должно обеспечивать возможности наживления и затяжки винтов.

Автоматическая система хранения, расположенная на участке автоматизированной роботизированной сборки, должна соответствовать следующим характеристикам, представленные в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Характеристики автоматизированной системы хранения

№	Наименование	Значение
1	Габаритный размер, мм	не более ширина 4000 мм высота 2500 мм глубина 1500 мм
2	Глубина полок, мм	не менее 500
3	Высота между полками, мм	не менее 600
4	Точность позиционирования, мм	не более 1

Электродинамическая вибрационная установка, расположенная на участке испытаний представлена на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14 – Электродинамическая вибрационная установка LE 2016-3/DSA10-200KVA

Электродинамическая вибрационная установка должна соответствовать следующим характеристикам, представленные в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Характеристики электродинамическая вибрационная установка

Наименование параметра	Значение параметра
Масса объекта испытаний (max), кг	900
Диапазон частот, Гц	5...3000
Максимальное виброускорение на холостом ходу, m/c^2 , [g]	1000, [100]
Номинальное перемещение (пик-пик), мм	55,0

Она предназначена для исследования динамических свойств конструкции, получение амплитудно-частотных характеристик.

Испытания на вибрационную прочность и устойчивость конструктивных элементов, приборов, узлов и агрегатов при воздействии:

- гармонической (синусоидальной) вибрацией;
- широкополосной случайной вибрацией;
- ударным импульсом.

Высоковакуумная установка, расположенная на участке испытаний должна соответствовать следующим характеристикам, представленные в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Характеристики высоковакуумной установки

Наименование параметра	Значение параметра
Полезный объём, м ³	1,1
Габаритные размеры полезного объёма, м	Ø (диаметр) 1,0; L (длина) 1,59
Предельное значение пониженного давления в камере, мм. рт. ст.	5×10^{-7}
Размеры стола для размещения объекта испытаний, м	Длина 1,29 Ширина 0,46

Высоковакуумная установка предназначена для проведения испытаний узлов, агрегатов, приборов (включая функционирование), образцов материалов и покрытий при пониженном давлении (вакууме).

Климатическая камера, расположенная на участке испытаний должна соответствовать следующим характеристикам, представленные в таблице 4.12.

Таблица 4.12 - Характеристики климатической камеры 3524/58

Наименование параметра	Значение параметра
Габаритные размеры полезного объёма, мм	720×610×850 (Ш×Г×В)
Диапазон температуры, °С	от -50 до +100
Диапазон влажности, %	от 20 до 95

Климатическая камера предназначена для проведения испытаний узлов, агрегатов, приборов (включая функционирование), образцов материалов и покрытий на воздействие температуры и повышенной влажности [78].

Ударная установка, расположенная на участке испытаний должна соответствовать следующим характеристикам, представленные в таблице 4.13.

Таблица 4.13 - Характеристики ударной установки STT-500

Наименование параметра	Значение параметра
Масса объекта испытаний, кг	400
Диапазон ускорений при однократном ударе, м/с ²	20...5000
Максимальное виброускорение на холостом ходу, м/с ² , [g]	5000, [500]
Габариты рабочей поверхности, м	0,75×0,6
Длительность импульса при однократном ударе, мс.	0,5-12

Ударная установка предназначена для проведения испытаний конструктивных элементов, приборов, узлов и агрегатов на воздействие ударных нагрузок.

Автоматизированная система хранения должна обеспечить:

- Возможность совместной работы с коллаборативными роботами;
 - Возможность загрузки, хранения и выдача изделий;
 - Возможность увеличения кол-ва полок путем изменения высот между ними;
 - Возможность замены стандартизированной тары на специальную.
- Автоматизированная тележка представлена на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Автоматизированная тележка AMB-800K

Автоматизированная тележка должна соответствовать следующим характеристиками, представленные в таблице 4.14.

Таблица 4.14 - Характеристики автоматизированной тележки

№	Наименование	Значение
1.	Полезная нагрузка, кг	не менее 150
2.	Автономное время работы, ч	не менее 8
3.	Точность позиционирования, мм	+/- 5
4.	Точность ориентации, градусов	+/- 0,5
5.	Ширина, мм	не более 800
6.	Тип навигации	Laser SLAM
7.	Тип двигателя	Два дифференциальных колеса
8.	Диаметр разворота мм	980
9.	Интерфейсы	Wi-Fi
10.	Скорость до м/с	1,8
11.	Автоматическая зарядка	да
12.	Распознавание полки	да
13.	Подъем грузовой платформы, мм	60 +/-2
14.	Высота лазерного сканера, мм	150 – 160
15.	Время работы на одном заряде, часов	8
16.	Время зарядки, часов	2
17.	Тип зарядного устройства	Автоматическое/ручное
18.	Срок службы батареи не менее, циклов	1500

19.	Безопасность	Лидар; Кнопка аварийного стопа; Датчик столкновения бампером; Габаритные огни; Звуковой сигнал
-----	--------------	--

Основные требования к автоматизированной тележке:

- Обеспечить автономное перемещение комплектации, материалов и собранных космических аппаратов по территории автоматизированного производства;
- Необходимо предусмотреть возможность создания на рабочей поверхности тележки комплекса базирующих элементов в виде рабочего стола;
- Необходимо предусмотреть возможность реализации загрузки автоматизированной тележки со штабелёра;
- Технологическое оснащение автоматизированной тележки должно содержать возможность размещения комплекса базирующих элементов.

Роботы-манипуляторы, расположенные на участке автоматизированной роботизированной сборки должны соответствовать следующим характеристикам, представленными в таблице 4.15.

Таблица 4.15 - Характеристики робота-манипулятора

№	Наименование	Значение
1	Полезная нагрузка	не менее 20 кг
2	Максимальный радиус действия	не менее 1700 мм
3	Монтажное положение	на полу
4	Повторяемость	$\pm 0,03$ мм
5	Количество осей вращения	6

Основные требования к оснащению роботов-манипуляторов, расположенным на участке автоматизированной роботизированной сборки:

- Робот-манипулятор должен быть оснащен Tool changer автоматическим — пневматическим. 1 часть на работе, 4 части на инструменте. Грузоподъёмностью не менее 20 кг;
- Робот-манипулятор должен быть оснащен электрической отверткой с регулировкой момента затяжки под винты с шестигранной потайной головкой М3-М4;

- Робот-манипулятор должен быть оснащен захватом двухпальцевым параллельный – 2 шт;
- Робот-манипулятор должен быть оснащен станцией хранения инструмента - 4 штуки;
- Робот-манипулятор должен быть установлен на линейную ось;
- Робот-манипулятор должен обеспечивать возможность смены инструментов в процессе рабочего цикла в автоматическом режиме.

Электрическая отвертка должна соответствовать следующим требованиям:

- Технологическое оснащение робота-манипулятора должно содержать отвертку шестигранной для винтов М3-М4 с регулирующим моментом завинчивания и затяжки, а также с реверсом момента;
- Технологическое оснащение робота-манипулятора должно обеспечивать возможности наживления и затяжки винтов.

Автоматическая система хранения, расположенная на участке автоматизированной, роботизированной сборки должна соответствовать следующим характеристикам, представленные в таблице 4.16.

Таблица 4.16 - Характеристики автоматизированной системы хранения

№	Наименование	Значение
1	Габаритный размер, мм	не более ширина 4000 мм высота 2500 мм глубина 1500 мм
2	Глубина полок, мм	не менее 500
3	Высота между полками, мм	не менее 600
4	Точность позиционирования, мм	не более 1

Автоматизированная система хранения должна обеспечить:

- Возможность совместной работы с коллаборативными роботами;
- Возможность загрузки, хранения и выдача изделий;
- Возможность увеличения кол-ва полок путем изменения высот между ними;

- Возможность замены стандартизированной тары на специальную.

Автоматизированная тележка должна соответствовать следующим характеристиками, представленные в таблице 4.17.

Таблица 4.17 - Характеристики автоматизированной тележки

№	Наименование	Значение
1.	Полезная нагрузка, кг	не менее 150
2.	Автономное время работы, ч	не менее 8
3.	Точность позиционирования, мм	+/- 5
4.	Точность ориентации, градусов	+/- 0,5
5.	Ширина, мм	не более 800
6.	Тип навигации	Laser SLAM
7.	Тип движителя	Два дифференциальных колеса
8.	Диаметр разворота мм	980
9.	Интерфейсы	Wi-Fi
10.	Скорость до м/с	1,8
11.	Автоматическая зарядка	да
12.	Распознавание полки	да
13.	Подъём грузовой платформы, мм	60 +/-2
14.	Высота лазерного сканера, мм	150 – 160
15.	Время работы на одном заряде, часов	8
16.	Время зарядки, часов	2
17.	Тип зарядного устройства	Автоматическое/ручное
18.	Срок службы батареи не менее, циклов	1500
19.	Безопасность	Лидар; Кнопка аварийного стопа; Датчик столкновения бампером; Габаритные огни; Звуковой сигнал

Основные требования к автоматизированной тележке:

- Обеспечить автономное перемещение комплектации, материалов и собранных космических аппаратов по территории автоматизированного производства;
- Необходимо предусмотреть возможность создания на рабочей поверхности тележки комплекса базирующих элементов в виде рабочего стола;
- Необходимо предусмотреть возможность реализации загрузки автоматизированной тележки со штабелёра.

Выводы по главе 4

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 [79].

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

Глава 4 завершает цикл исследований, предоставив всестороннюю экспериментальную проверку и успешное внедрение разработанного инструментария организации ИРПЯ для серийного производства МКА НК типа CUBSAT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Результаты работы имеют высокую научную новизну (в части методологии организации прецизионных ИРПЯ микро-масштаба и систем SMED для них) и значительную практическую ценность для развития отечественного производства малых космических аппаратов.

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 к конструкции малых космических аппаратов нано класса типа CUBESAT, адаптированного под роботизированную сборку, представленный в виде классификаторов конструктивных, технологических требований и ограничений, 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, которые характерны для роботизированного производства ракетно-космической техники. Экспериментальная проверка доказала практическую эффективность и состоятельность разработанных решений: адаптированной конструкции CUBESAT и интеллектуальной роботизированной производственной ячейки. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Куренков, В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика [Текст]: учебное пособие / В.И. Куренков. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 461 с.

2 Разработка систем космических аппаратов [Текст] / Под. ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка; пер. с англ. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 764 с.

3 Малышев, В.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление [Текст] / В.В. Малышев [и др.]; Под редакцией В.В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.

4 Дизайн центр микроэлектроники АО НТЦ «Модуль» - АО НТЦ «Модуль» [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.module.ru/> (дата обращения: 29.09.2022).

5 Частная космическая компания «Спутникс» - ООО «Спутникс» [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/> (дата обращения: 22.08.2023).

6 Частная космическая компания «Спутникс» - Солнечная панель с кремниевыми ФЭП (боковая) [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/sol-panel-kremnii-bokovaya> (дата обращения: 22.08.2023).

7 Официальный сайт «NanoAvionics» [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/> (дата обращения: 22.08.2023).

8 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat GaAs Solar Panel [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-gaas-solar-panel/> (дата обращения: 22.08.2023).

9 Официальный сайт «NanoAvionics» - Electrical Power System EPS [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat->

components/cubesat-electrical-power-system-eps/ (дата обращения: 22.08.2023).

10 Официальный сайт «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/home.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

11 Официальный сайт «GomSpace» - High efficiency modular solar panels for GomSpace 6U structure [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/shop/subsystems/power/msp-solar-panels.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

12 Официальный сайт «GomSpace» - High capacity lithium-ion battery pack with a heater for CubeSats [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/shop/subsystems/power/nanopower-bpx.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

13 Официальный сайт «GomSpace» - Modular power system for large nanosatellites [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/shop/subsystems/power/nanopower-p60.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

14 Частная космическая компания «Спутникс» - Бортовой вычислительный модуль [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/bvm> (дата обращения: 22.08.2023).

15 Официальный сайт «NanoAvionics» - Payload Controller [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/payload-controller-1-5/> (дата обращения: 22.08.2023).

16 Официальный сайт «GomSpace» - Versatile Onboard Computer for Cube, Nano and Microsat missions [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/shop/subsystems/command-and-data-handling/nanomind-a3200.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

17 Официальный сайт «GomSpace» - Electrical Power Supply system for small nanosatellites [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/shop/subsystems/power/nanopower-p31u.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

18 Частная космическая компания «Спутникс» - УКВ приемопередатчик [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/ukv-priemoperedatchik> (дата обращения: 22.08.2023).

19 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat UHF Digital Radio Transceiver SatCOM UHF [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-uhf-digital-radio-transceiver-satcom-uhf/> (дата обращения: 22.08.2023).

20 Частная космическая компания «Спутникс» - Передатчик X-диапазона [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/peredatchik-x-diapazona> (дата обращения: 22.08.2023).

21 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat S-Band Transceiver [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-s-band-transceiver/> (дата обращения: 22.08.2023).

22 Частная космическая компания «Спутникс» - УКВ антенная система с сервисной панелью и ключом RBF [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/uhf-antennaya-sistema> (дата обращения: 22.08.2023).

23 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat UHF Antenna System [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-uhf-antenna/> (дата обращения: 22.08.2023).

24 Частная космическая компания «Спутникс» - Антенна X-диапазона [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/antenna-x-diapazona> (дата обращения: 22.08.2023).

25 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat S-Band Patch Antenna [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-s-band-patch-antenna/> (дата обращения: 22.08.2023).

26 Частная космическая компания «Спутникс» - Магнитометр [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-microsputnik/datchiki-sistemyi-orientaczii-stabilizaczii-i-navigaczii/magnitometr-new> (дата обращения: 22.08.2023).

27 Официальный сайт «GomSpace» - Compact low noise magnetometer for high performance attitude determination systems [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/shop/subsystems/attitude-orbit-control-systems/nano>

sense-m315.aspx (дата обращения: 22.08.2023).

28 Частная космическая компания «Спутникс» - Датчик угловой скорости [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-microsputnik/datchiki-sistemyi-orientaczii-stabilizaczii-i-navigaczii/datchik-uglovoi-skorosti> (дата обращения: 22.08.2023).

29 Частная космическая компания «Спутникс» - Звездный датчик [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/zvezdnyij-datchik> (дата обращения: 22.08.2023).

30 Частная космическая компания «Спутникс» - Солнечный датчик [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/sol-datchik> (дата обращения: 22.08.2023).

31 Официальный сайт «GomSpace» - Fine Sun Sensor for High Precision ADCS Control [Электронный ресурс]. - URL: [https://gomspace.com/shop/subsystems/attitude-orbit-control-systems/nanosense-fss-\(1\).aspx](https://gomspace.com/shop/subsystems/attitude-orbit-control-systems/nanosense-fss-(1).aspx) (дата обращения: 22.08.2023).

32 Брошюра «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL: https://gomspace.com/UserFiles/Customer%20Portal/GomSpace_ADCS_White_Paper.pdf (дата обращения: 22.08.2023).

33 Частная космическая компания «Спутникс» - Блок маховиков [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/blok-mahovikov> (дата обращения: 22.08.2023).

34 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat Reaction Wheels Control System SatBus 4RW0 [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-reaction-wheels-control-system-satbus-4rw/> (дата обращения: 22.08.2023).

35 Брошюра «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL: https://gomspace.com/UserFiles/Customer%20Portal/White%20Papers/GOMX-3_Mission_Results_from_the_Inaugural_ESA_In-Orbit_Demonstration_CubeSat (дата обращения: 22.08.2023).

36 Брошюра «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL:

https://gomspace.com/UserFiles/SSC18_GOMX4paper_FINAL.pdf (дата обращения: 22.08.2023).

37 Официальный сайт «NanoAvionics» - CubeSat Magnetorquer SatBus MTQ [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-magnetorquer-satbus-mtq/> (дата обращения: 22.08.2023).

38 Официальный сайт «NanoAvionics» - SmallSat Propulsion System EPSS [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-propulsion-system-epss/> (дата обращения: 22.08.2023).

39 Официальный сайт «Wiley Online Library» [Электронный ресурс]. - URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/prep.201900127> (дата обращения: 22.08.2023).

40 Брошюра «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL: https://gomspace.com/UserFiles/Propulsion_White_Paper.pdf (дата обращения: 22.08.2023).

41 Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ [Электронный ресурс] : монография / [С. Л. Сафронов, И. С. Ткаченко, М. А. Иванушкин, С. С. Волгин] ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). - Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2019.

42 Boshuizen C.R., Mason J., Klupar P., Spanhake S. Results from the Planet Labs Flock Constellation, Proc. Of 28 Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC14-I-1.

43 Частная космическая компания «Спутникс» - ИНТЕРФЕЙСНЫЙ КОНТРОЛЬНЫЙ ДОКУМЕНТ SXC1 И SXC3 [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/interfejsnyij-kontrolnyij-dokument-icd> (дата обращения: 22.08.2023).

44 Официальный сайт «GomSpace» - 3U PLATFORM [Электронный ресурс]. - URL: [https://gomspace.com/3u-\(1\).aspx](https://gomspace.com/3u-(1).aspx) (дата обращения: 22.08.2023).

45 Официальный сайт «Геоскан» - ООО «Геоскан» [Электронный

ресурс]. - URL: <https://www.geoscan.aero/ru> (дата обращения: 22.08.2023).

46 Частная космическая компания «Спутникс» - ИНТЕРФЕЙСНЫЙ КОНТРОЛЬНЫЙ ДОКУМЕНТ SXC6 [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/interfejsnyij-kontrolnyij-dokument-sxc6> (дата обращения: 22.08.2023).

47 Официальный сайт «NanoAvionics» - 6U Nanosatellite Bus M6P [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/small-satellite-buses/6u-nanosatellite-bus-m6p/> (дата обращения: 22.08.2023).

48 Официальный сайт «GomSpace» - 6U STANDARD [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/6u-standard.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

49 Частная космическая компания «Спутникс» - Спутниковая платформа SXC12 [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/cubesat-platformy/sputnikovaya-platforma-orbikraft-pro-12u> (дата обращения: 22.08.2023).

50 Официальный сайт «NanoAvionics» - 12U Nanosatellite Bus M12P [Электронный ресурс]. - URL: <https://nanoavionics.com/small-satellite-buses/12u-nanosatellite-bus-m12p-m12p-r/> (дата обращения: 22.08.2023).

51 Официальный сайт «GomSpace» - 6U STANDARD [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/6u-standard.aspx> (дата обращения: 22.08.2023).

52 Официальный сайт «LiveJournal» [Электронный ресурс]. - URL: <https://voenny.livejournal.com/321408.html> (дата обращения: 22.08.2023).

53 Официальный сайт «BlackSky» [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.blacksky.com/> (дата обращения: 22.08.2023).

54 Официальный сайт «NewSpace Index» [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.newspace.im/constellations/blacksky> (дата обращения: 22.08.2023).

55 Частная космическая компания «Спутникс» - Микроспутниковая платформа "Паллада" [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/oborudovanie-old/mikrospudnikovaya-platforma> (дата

обращения: 22.08.2023).

56 Спецификация CubeSat Design Specification [Электронный ресурс]. - URL: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf (дата обращения: 16.10.2023).

57 Частная космическая компания «Спутникс» - Корпус CubeSat 3U [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-cubesat/korpus-3u> (дата обращения: 16.10.2023).

58 Частная космическая компания «Спутникс» - Спутниковая платформа SXC6 модификация «ДЗЗ» [Электронный ресурс]. - URL: <https://sputnix.ru/ru/platformyi/cubesat-platformy/orbikraft-pro-6u> (дата обращения: 16.10.2023).

59 Брошюра «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL: <https://gomspace.com/UserFiles/Subsystems/datasheet/gs-ds-nanostructure-6u-11.pdf> (дата обращения: 16.10.2023).

60 Брошюра «GomSpace» [Электронный ресурс]. - URL: [https://gomspace.com/UserFiles/Subsystems/datasheet/gs-ds-NanoStructure_12U_Platform_DataSheet_\(DS_-_1043916_-_1_-_10\)_-_1.PDF](https://gomspace.com/UserFiles/Subsystems/datasheet/gs-ds-NanoStructure_12U_Platform_DataSheet_(DS_-_1043916_-_1_-_10)_-_1.PDF) (дата обращения: 16.10.2023).

61 ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения

62 Опытно-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов [и др.]. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.

63 Domas, K., & Helander, M. (1984). Manual versus Robotic Assembly: Some Implications of Product Design. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, 28(8), 659–663.

64 Официальный сайт «Aerospace» - SLINGSHOT PLATFORM FAST-TRACKS SPACE SYSTEMS USING MODULARITY AND OPEN STANDARDS [Электронный ресурс]. - URL:

<https://aerospace.org/article/slingshot-platform-fast-tracks-space-systems-using-modularity-and-open-standards> (дата обращения: 02.11.2023).

65 Официальный сайт «Роскосмос» - GreenConn: Новые продукты [Электронный ресурс]. - URL: https://mt-system.ru/company/news/greenconn_novye_produkty/ (дата обращения: 02.11.2023).

66 Официальный сайт «MTsystem» - Предприятие Роскосмоса создаст более 130 спутников связи «Марафон» в интересах проекта «Сфера» [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.roscosmos.ru/39698/> (дата обращения: 02.11.2023).

67 Официальный сайт «Платан» - Краевые разъемы SPD08 [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.platan.ru/3M/connectors/SPD08.shtml> (дата обращения: 02.11.2023)

68 [Текст] // Tecnología e Innovación Ciencia y Poder Aéreo. – 2020. – Vol. 15 (1). – Pp. 108-134.

69 CubeSat [Электронный ресурс]. – URL: https://space.skyrocket.de/doc_sat/cubesat.htm (дата обращения: 29.09.2022).

70 Устюгов, Е. В. Новая архитектура наноспутника стандарта CubeSat без использования бортовой кабельной сети [Текст] / Е. В. Устюгов, С. В. Шафран, А. А. Соболев // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 423-429.

71 ГОСТ Р 57558 – 2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.

72 ГОСТ Р 57586 – 2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 8 с.

73 ГОСТ Р 50766 – 1995 Помещения чистые. Классификация. Методы аттестации. Основные требования [Текст]. – Введ. 1996-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 31 с.

74 ГОСТ Р 57587 – 2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.

75 ГОСТ Р 57588 – 2017 Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.

76 ГОСТ Р 57590 – 2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.

77 ГОСТ Р 60.1.2.4-2020 Роботы и робототехнические устройства. Проектирование промышленных робототехнических комплексов с учетом требований безопасности. Часть 1 [Текст]. – Введ. 2021-03-01. – М.: Росстандарт, 2019. – 28 с.

78 ГОСТР 60.0.0.4-2019 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2019-09-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 31 с.

79 ГОСТР 60.0.2.1-2016 Роботы и робототехнические устройства. Общие требования по безопасности [Текст]. – Введ. 2018-01-01. – М.: Стандартиформ, 2020. – 7 с.