



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
доктор технических наук, профессор

Михаил Сергеевич Воротилин

« 8 » июня 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

**на диссертационную работу Михеева Михаила Александровича
на тему «Совершенствование подходов к организации серийного
роботизированного производства малых космических аппаратов типа
КУБСАТ», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.5.22. Управление качеством
продукции. Стандартизация. Организация производства**

Актуальность проблемы

Космическая отрасль сегодня переживает бурный рост благодаря широкому внедрению малых спутников, в первую очередь, – наноспутников стандарта CUBESAT. Их компактность, доступная стоимость разработки и запуска, а также оперативность изготовления открыли космос для университетов, исследовательских центров и частных компаний по всему миру. Спектр применения CUBESAT охватывает фундаментальную науку, дистанционное зондирование Земли, технологические эксперименты, образование и коммерческие проекты. Прогнозируемый дальнейший рост числа запусков таких аппаратов формирует устойчивый спрос на их серийное производство.

Однако существующая практика создания CUBESAT сталкивается с серьезными ограничениями, мешающими наращиванию выпуска. Доминирование ручного труда на этапах сборки и испытаний делает процесс трудоёмким, дорогостоящим и подверженным влиянию человеческого фактора. Отсутствие специализированных высокоавтоматизированных решений, учитывающих микрогабариты и специфику сборки космической электроники и механики, становится главным технологическим барьером. Конструкции же самих CUBESAT, как правило, не адаптированы под автоматизацию, что сводит эффективность попыток роботизации к минимуму.

Таким образом, актуальность диссертационной работы продиктована необходимостью преодолеть противоречие между растущим рыночным спросом на массовый выпуск наноспутников и отсутствием комплексных организационно-технологических решений для их серийной роботизированной сборки.

Входящий № 206-57d4
Дата 11 ИЮН 2026
Самарский университет

Оценка содержания и оформления диссертационной работы

Диссертационная работа М.А. Михеева изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит введение, четыре главы, основные выводы по работе, 60 рисунков, 51 таблицу, библиографический список из 79 наименований.

В **первой главе** выполнен теоретический обзор существующих подходов к автоматизированной сборке наноспутников CUBESAT. Проведённый аудит технологического процесса выявил, что доля ручного труда высокой квалификации достигает 45 % в общих трудозатратах на сборку одного аппарата. Как следствие, доказано, что традиционные методы непригодны для масштабирования до серийного выпуска: они не могут гарантировать стабильную повторяемость операций, прогнозируемый результат и должный уровень контроля качества.

Резюмируя результаты первого раздела, автор приходит к выводу: классические организационно-технологические схемы сборки CUBESAT исчерпали свой потенциал. Обоснована необходимость комплексного подхода для перехода к серийному производству, который включает: модификацию конструкции самих спутников под задачи автоматизации и цифровизации, создание специализированных интеллектуальных роботизированных систем, перестройку производственных участков и соответствующую подготовку персонала.

Во **второй главе** был разработан инструментарий для проектирования наноспутников формата CUBESAT, ориентированных на серийную автоматизированную сборку. Базовым элементом выступает методика оценки технологичности конструкции. Она включает модернизированный алгоритм, позволяющий определить, насколько конструкция приспособлена к роботизации. Отличие данной методики от известных заключается во введении новых оценочных критериев, специально разработанных для наноспутников CUBESAT с учётом особенностей их серийной роботизированной сборки. Методика опирается на восемь коэффициентов, на основе которых вычисляется интегральный показатель технологичности. Для этого показателя построена шкала оценок и соответствующих рекомендаций.

Далее в главе представлен полный алгоритм оценки – от сбора исходных данных (CAD-модели, техническая документация) до формирования итогового отчёта с рекомендациями. Исходя из выявленных типовых недостатков (нестандартные разъёмы, труднодоступные «слепые» зоны), сформулированы рекомендации по улучшению технологичности. Для иллюстрации практической адаптации конструкции выполнен анализ на примере российского малого космического аппарата «АИСТ-СТ». Предложены конкретные меры по изменению конструкции: переход на несущие панели, унификация крепёжных элементов, замена кабельной сети базовыми платами, а также создание специализированной оснастки для роботизированной сборки.

Кроме того, в диссертации разработан свод требований и ограничений к конструкциям, адаптированным под возможности роботизированной сборки, а также требования к технологическим процессам, применяемым при автоматизированной сборке наноспутников CUBESAT. Указанный

классификатор служит практическим инструментом системного проектирования как спутников, так и интеллектуальных роботизированных производственных ячеек: каждое требование жёстко увязано с конкретным ограничением, что позволяет на ранних этапах разработки находить оптимальные инженерные компромиссы.

В третьей главе были предложены решения для формирования инструментария, предназначенного для организации интеллектуальных роботизированных производственных ячеек (ИРПЯ), обеспечивающих высокоточную сборку наноспутников CUBESAT. Разработана методика проектирования ИРПЯ, в основу которой положены пять ключевых принципов: конструктивно-технологическая преемственность, модульность и адаптивность, встроенный интеллект на всех уровнях, исключительная точность, а также сопряжение с системами верхнего уровня (MES). Определён минимально необходимый состав ИРПЯ для выполнения сборочных операций с наноспутниками CUBESAT. Прежде всего, создан алгоритм проектирования таких ячеек, включающий 16 последовательных этапов. Практическим результатом применения этого алгоритма стала спроектированная ИРПЯ для сборки наноспутника «АИСТ-СТ», конструкция которого предварительно адаптирована под роботизированный процесс.

Далее была сформулирована целевая функция, направленная на минимизацию трудоёмкости операций за счёт внедрения ИРПЯ. Использование этой функции позволяет напрямую оценить эффект от внедрения интеллектуальных производственных ячеек в виде экономии живого труда, учесть все составляющие трудовых затрат и принимать обоснованные решения о рациональном уровне роботизации при заданных бюджетных ограничениях.

Для выстраивания производственного процесса была разработана структурно-функциональная модель работы интеллектуальной роботизированной ячейки, обеспечивающая быструю переналадку и кастомизацию производственных участков. Также создана организационная структура проектной команды и описано взаимодействие её участников. В итоге в третьей главе сформирован комплексный инструментарий организации ИРПЯ для сборки CUBESAT, включающий методику, алгоритмы проектирования и структурно-функциональную модель функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки.

В четвёртой главе приведены результаты практической проверки и внедрения разработанных инструментариев. На базе лабораторного комплекса «Киберфизическая фабрика производства малых космических аппаратов» реализована концепция матричного производства, включающая семь специализированных участков, которые образуют замкнутый производственный цикл.

На созданном действующем прототипе ИРПЯ были успешно отработаны ключевые сборочные операции стандартного наноспутника CUBESAT. Обеспечена точность позиционирования в пределах ± 20 мкм, а повторяемость операций достигла 99,5 %. Сравнительный анализ показал, что при серийности от 50 изделий в год применение данной технологии

позволяет снизить себестоимость сборки до 40 % и сократить длительность производственного цикла в 2–3 раза по сравнению с ручными методами.

Экспериментальная проверка подтвердила эффективность предложенных решений: достигнута высокая точность сборки, уменьшены время и затраты на производство, что свидетельствует о готовности технологии к серийному использованию.

В заключительной части сформулированы основные итоги и выводы исследования, которые подтверждают защищаемые положения, а также обозначены направления дальнейшего изучения проблемы.

В основных выводах приводятся результаты исследования, соответствующие целям и задачам диссертации.

Научная новизна исследований и полученных результатов

Теоретическая значимость определяется вкладом в развитие научных основ организации роботизированной сборки аэрокосмических изделий, создание интеллектуальных роботизированных комплексов, а также в улучшение инструментария для конструирования продукции и процессов в условиях ограничений и возможностей роботизированного производства в аэрокосмической сфере.

Научная новизна диссертационной работы М.А. Михеева представлена в следующих результатах исследования:

- методике, позволяющей оценить, насколько конструкция наноспутников приспособлена к роботизированной сборке. Она включает усовершенствованный алгоритм такой оценки. Отличие от известных аналогов заключается в разработке новых критериев, учитывающих специфику серийной роботизированной сборки наноспутников типа CUBESAT. Экспериментальная проверка показала снижение себестоимости сборки на 25–30% и уменьшение трудоёмкости операций на 40–60 %, что существенно повышает экономическую эффективность выпуска малых космических аппаратов и делает их более доступными.

- классификаторе требований и ограничений к конструкции наноспутников CUBESAT под роботизированную сборку. Отличие от аналогов – новые группы конструктивно-технологических требований, а также требований к технологическим операциям. Его использование обеспечивает создание конструкции, пригодной для роботизированного производства, что необходимо для последующей автоматизации сборки и снижения трудоёмкости.

Значимость полученных результатов для практики

Практическая ценность диссертации состоит в создании инструментария для проектирования наноспутников CUBESAT с учётом возможностей и ограничений роботизированного производства, а также в разработке инструментария для организации интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, который представляет собой стандартизированное руководство для предприятий аэрокосмической отрасли. К конкретным практически значимым результатам исследования относятся:

- методика проектирования интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, которая встроена в общую схему организации производства. Она включает создание цифрового двойника ячейки, используемого для отработки рациональных технологических решений и разработки управляющих программ для робототехнического оборудования. Благодаря комплексному подходу и применению цифрового двойника данная методика позволяет в три раза быстрее создавать гибкую и масштабируемую производственную систему, способную обеспечить высокую точность и стабильную повторяемость сборочных операций наноспутников CUBESAT;

- структурно-функциональная модель работы интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, которая включает авторскую организационную структуру проектной команды по их созданию. Отличие данной модели от существующих заключается в учёте действий, характерных именно для роботизированного производства ракетно-космической техники. Комплексное внедрение этих разработок обеспечивает прорыв в технологии производства отечественных наноспутников CUBESAT, позволяя перейти к их серийному и экономически оправданному выпуску.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Решение поставленных в диссертационной работе задач осуществлялось корректным применением методов системного анализа и опорой на результаты проведённого аудита реального производственного процесса (выявившего до 45 % ручного высококвалифицированного труда). Достоверность подтверждается экспериментальной апробацией всех разработанных инструментов на действующем прототипе интеллектуальной роботизированной ячейки в составе лабораторного комплекса «Киберфизическая фабрика производства малых космических аппаратов», где достигнута точность позиционирования ± 20 мкм и повторяемость операций 99,5 %.

Количественное подтверждение эффективности получено в ходе сравнительного анализа: при серийности от 50 шт./год внедрение предложенных решений снижает себестоимость сборки на 25–40 %, сокращает трудоёмкость на 40–60 % и время цикла в 2–3 раза по сравнению с ручными методами. Обоснованность и достоверность также подкреплены практической адаптацией на примере реального российского аппарата «АИСТ-СТ», использованием цифрового двойника для отработки решений и согласованностью полученных результатов с современными мировыми тенденциями в области роботизации производства наноспутников.

Достоверность научных положений, результатов и выводов проведенных исследований подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях и широким обсуждением основных положений и выводов исследования в рамках всероссийских и международных научно-технических конференций.

Результаты диссертационного исследования внедрены на предприятии ООО «ТЕСВЕЛ» – Производственно-инжиниринговая компания; ООО «РСК», что подтверждено соответствующими актами внедрения. Также

получена справка о внедрении результатов диссертационного исследования в учебном процессе Самарского университета им. С.П. Королева.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: 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", 2025 г.; Совместной III Отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» и VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения»), 2024 г.; VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных "Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований", 2024 г.; Всероссийской очной научно-практической конференции «Траектории взаимодействия в развитии цифровых навыков», 2021 г., а также были опубликованы в научных изданиях перечня ВАК.

Диссертация и автореферат написаны технически грамотным языком. Содержание автореферата отражает основные положения и выводы диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в диссертационной работе результаты отражают современный уровень исследований в области роботизированной сборки малых космических аппаратов и имеют практическую значимость для предприятий ракетно-космической отрасли, университетов и частных компаний, разрабатывающих наноспутники стандарта CUBESAT.

Результаты диссертационных исследований рекомендуются к внедрению на предприятиях, производящих серийную продукцию и разрабатывающих роботизированные ячейки для создания аэрокосмической техники, а именно на ООО «ТЕСВЕЛ» (г. Самара), ООО «РСК» (г. Самара), также предложенные решения могут быть полезны научно-исследовательским институтам и проектным организациям, которые специализируются на разработке технологических сборочных процессов производства в аэрокосмической отрасли и создании интеллектуальных роботизированных производственных ячеек.

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства: п.5. Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством; п.17.

Разработка и научно-практическое развитие инструментов бережливого производства, синхронизации в производственных системах, оптимизации процессов и рабочих мест; п.23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

Замечания

1. В работе присутствует игнорирование некоторых технологических ограничений – в классификаторе требований и ограничений недостаточно отражены вопросы контроля качества в автоматическом режиме, а также особенности работы с нежёсткими элементами (кабели, терморегулирующие покрытия), что может ограничить применимость методик для полного цикла сборки.

2. Автором не полностью раскрыта роль цифрового двойника, хотя заявлено, что его использование ускоряет создание гибкой системы в 3 раза, не представлены конкретные сценарии верификации модели, не показана степень соответствия цифрового двойника физическому прототипу и не приведены погрешности моделирования критических операций.

3. Не приведены данные о частоте сбоев работы ИРПЯ, времени восстановления, необходимом запасе инструмента и заготовок. Не оценивается влияние возможных отказов робототехники на общий производственный цикл и качество сборки.

4. Работа не предлагает стратегий поэтапной роботизации без полного перепроектирования аппаратов, что может ограничить внедрение на предприятиях с большим объёмом ранее разработанных проектов.

5. Не указано, насколько разработанные требования и ограничения согласованы с действующей нормативной базой, что может стать барьером для практического применения.

6. В работе упоминаются необходимость подготовки кадров и структура проектной команды, но отсутствуют конкретные рекомендации по переквалификации существующих сборщиков, требования к компетенциям операторов роботизированных ячеек и оценка сроков такой подготовки.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

В результате проведенного Михеевым М.А. исследования достигнута основная цель – повышение производительности процессов сборки малых космических аппаратов нанокласса 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.

Диссертация написана технически и научно грамотным языком, все ее главы логично связаны между собой, новые научные результаты и положения доказаны и научно обоснованы. Автореферат диссертации и публикации автора отражают основные выводы и результаты работы. Содержание автореферата полностью отражает текст диссертации.

По значимости поставленных и решённых задач диссертационная работа М.А. Михеева является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые технические решения по обеспечению технологичности сборки наноспутников стандарта CUBESAT на основе взаимообусловленности конструктивных параметров малых космических аппаратов и возможностей роботизированного производства, внедрение которых имеет существенное значение для перехода к серийному выпуску высокоточных аэрокосмических изделий.

Диссертация «Совершенствование подходов к организации серийного роботизированного производства малых космических аппаратов типа КУБСАТ» по своему содержанию, объёму, актуальности, научной и практической значимости полностью соответствует критериям пп. 9–11 и п. 14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Михеев Михаил Александрович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Диссертация, автореферат и отзыв рассмотрены и одобрены на расширенном заседании кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Результаты голосования: за – 20 человек, против – нет, воздержались – нет.

Протокол заседания кафедры № 12 от 22 мая 2026 г.

Профессор кафедры
«Промышленная автоматика и робототехника»,
доктор технических наук, доцент

О.В. Пантюхин

(докторская диссертация защищена по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».
Адрес: Россия, 300012, Тульская область, г. Тула, пр. Ленина, 92,
телефон: +7 (4872) 734-444.
E-mail: info@tsu.tula.ru
Web-сайт: https://tulsu.ru

