

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЮ СЕРИЙНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2024

И. С. Ткаченко кандидат технических наук, доцент, директор института авиационной и ракетно-космической техники;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
tkachenko.is@ssau.ru

Рассматривается системный подход к созданию роботизированного производства малых космических аппаратов нанокласса для обеспечения их серийного выпуска. Проведён анализ ключевых трендов в создании и развитии современных производств космических аппаратов, выявлены и систематизированы факторы, характеризующие серийные роботизированные производства. Описана интеллектуальная производственная ячейка как основной элемент серийного роботизированного производства матричного типа. Представлены основные типы проектно-конструкторских решений, направленных на адаптацию конструкции малого космического аппарата для роботизированной сборки. Приведено описание проекта по созданию прототипа серийного производства малых космических аппаратов в формате киберфизической фабрики, реализованного в передовой инженерной аэрокосмической школе Самарского университета.

Малые космические аппараты; серийное роботизированное производство; производственная система; матричный тип производства; проектно-конструкторские решения; системный подход

Цитирование: Ткаченко И.С. Методические подходы к созданию и функционированию серийного роботизированного производства малых космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 3. С. 178-194. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-178-194

Введение

Ключевой задачей аэрокосмической отрасли РФ в сложившихся геополитических условиях является кратное увеличение объёмов производства современных образцов техники, которые должны отвечать требованиям надёжности, обеспечивать исправное выполнение заданных функций на протяжении всего срока службы. При этом необходимо снизить стоимость производства изделий аэрокосмической техники. Развитие многоспутниковых космических систем также диктует новые требования к процессу производства изделий ракетно-космической техники: внедрение цифровых технологий на всех этапах жизненного цикла изделий, переход к серийному производству космических аппаратов, организация роботизированного производства. Для решения задач серийного производства космических аппаратов необходимо создавать высокотехнологичные роботизированные производственные системы, способные серийно выпускать продукцию, а такжекратно сократить длительность производственного цикла, обеспечить требуемый уровень качества и необходимую гибкость производства.

В статье рассматривается серийное роботизированное производство, продуктом которого является малый космический аппарат (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При этом целью настоящей работы является формирование системного подхода к созданию серийного роботизированного производства МКА.

Для достижения вышеуказанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ ключевых факторов, влияющих на создание и функционирование серийного роботизированного производства.
2. Описать инструментарий, применение которого обеспечит эффективность создания и функционирования производственной системы нового типа.

Принципы создания роботизированного производства малых космических аппаратов

В мировой практике уже известны примеры организации серийного производства космических аппаратов, среди которых можно выделить предприятия компаний «OneWeb» и «Space X» (производство спутников для проекта «Starlink»), создание «умной» фабрики по производству космических аппаратов в г. Ухань (КНР), а также создаваемые в России производства в компаниях «Решетнёв», «НПО Лавочкина», «Газпром космические системы» [1].

Можно выделить следующие ключевые тренды в производстве малых космических аппаратов: адаптация опыта авиационной и автомобильной промышленности для обеспечения серийности производства; повсеместная цифровизация процессов жизненного цикла для сокращения длительности производственного этапа; автоматизированная и роботизированная сборка для повышения производительности труда и воспроизводимости технологических операций. Объёмы производства на подобных фабриках могут составлять до нескольких сотен спутников в год. Таким образом, задача создания и развития производственных систем, способных серийно выпускать космическую технику, является перспективной и актуальной для РФ.

Анализ ключевых трендов направлен на систематизацию и структурирование факторов, характеризующих роботизированные производства (табл. 1).

Таблица 1. Ключевые факторы, определяющие серийное роботизированное производство

№	Группа факторов	Описание
1.	Персонал	Компетентность персонала: обучение сотрудников работе с новыми технологиями.
		Наличие специалистов по программированию и обслуживанию роботов.
		Опыт: наличие опыта создания серийного роботизированного производства.
2.	Конструкция изделий	Упрощение сборки: уменьшение количества деталей и упрощение конструктивных узлов для облегчения сборочных операций роботами; оптимизация конструкции для минимизации отходов и более эффективного использования материалов; упрощение процессов для сокращения времени на изготовление одной единицы продукции.
		Унификация деталей, сборочных единиц (ДСЕ): использование стандартных компонентов и крепежей для сокращения времени на смену технологической оснастки и переналадку роботов.
		Снижение несоответствий и дефектов: уменьшение количества сложных ручных операций, которые могут быть источником ошибок.
		Обеспечение точности: доработка конструкции для повышения точности выполнения операций роботами.
3.	Технологии производства	Безопасность и надёжность: системы обеспечения безопасности для предотвращения аварий и защиты работников; надёжность оборудования для минимизации простоев и поломок.
		Инновации и исследования: постоянные инвестиции в исследования и разработки для внедрения новых технологий и улучшения существующих процессов.

Окончание таблицы 1. Ключевые факторы, определяющие серийное роботизированное производство

4.	Организации производства	Аппаратное обеспечение: современные и надёжные роботы, конвейеры, датчики и прочие устройства автоматизации.
		Программное обеспечение: интегрированные системы управления, которые обеспечивают координацию работы всех компонентов производственной системы.
		Интеграция и совместимость: совместимость новых роботизированных комплексов с существующими системами и оборудованием. Возможность лёгкой интеграции с ERP-системами и другими ИТ-инфраструктурами.
		Экономическая целесообразность: оценка затрат на внедрение и эксплуатацию роботизированных систем; оценка экономического эффекта от повышения производительности и снижения издержек.
		Гибкость и масштабируемость: возможность адаптации производства под изменения спроса и модификацию продукции; масштабируемость систем для увеличения объёма производства без значительных затрат.
5.	Логистика и управление запасами	Логистика: оптимизация логистических процессов для своевременного снабжения материалами и доставки готовой продукции.
		Запасы: эффективное управление запасами для минимизации складских издержек.
6.	Управление качеством	Методы обнаружения несоответствий: внедрение систем автоматизированного контроля качества продукции; постоянный мониторинг и оптимизация производственных процессов.
		Методы предупреждения появления несоответствий: цифровизация процессов и процедур предупреждения появления несоответствий.

Выявленные ключевые факторы, характеризующие роботизированные производства, позволяют разработать последовательность и содержание работ по созданию такого типа производственных систем, применительно к серийному изготовлению МКА (табл. 2).

Таблица 2. Перечень работ по созданию и функционированию роботизированного серийного производства малых космических аппаратов

№	Наименование	Описание
1.	Организация серийного роботизированного производства	Разработка модели производственной системы, основанной на правильно выбранной стратегии и рациональном типе производства.
		Разработка цифровых двойников производственного процесса и производственной системы. Цифровые двойники позволяют оптимизировать производственные показатели процессов изготовления и минимизировать сроки подготовки производства.
		Организация интеллектуальных производственных ячеек. Интеллектуальная производственная ячейка – основа роботизированного производства – представляет совокупность цифровых, автоматизированных и роботизированных технологий, программных и аппаратных средств, включая технологии машинного зрения, роботизированные комплексы, предиктивная диагностика состояния технологического оборудования и др.
2.	Проектно-конструкторские решения изделия	Разработка (адаптация) проектно-конструкторских решений под особенности серийного роботизированного производства. Анализ и совершенствование конструкции изделий для обеспечения возможности роботизированного производства (сборки), позволяющего повысить производительность труда и минимизировать затраты на производства.
		Управление инженерными данными. Применение PDM систем для автоматизации и снижения трудоёмкости управления инженерными данными и технической документацией об изделии и процессах производства.

Окончание таблицы 2. Перечень работ по созданию и функционированию роботизированного серийного производства малых космических аппаратов

3.	Технологии серийного роботизированного производства	Разработка комплекса технологий (технологических процессов) для серийного роботизированного производства, минимизирующих трудоёмкость и влияние человеческого фактора, обеспечивающих стабильность параметров процессов.
		Разработка и производство технологического оснащения, обеспечивающего адаптацию роботизированных комплексов под особенности изготовления конкретного вида продукции [2].
4.	Управление серийным роботизированным производством	Управление компетентностью персонала, предполагающее постоянный анализ (оценку) требуемой компетентности персонала и её развитие.
		Управление поставками материалов и компонентов для обеспечения стабильности процессов поставок партий требуемых компонентов для серийного производства.
		Управление производством предполагает интеграцию автоматизированных информационных систем управления «верхнего» уровня (MES-системы) с автоматизированными системами управления технологическими процессами (SCADA-системы) и их применения для повышения производительности труда и эффективности производственных процессов.
		Управление качеством продукции и поставляемых компонентов путём внедрения методов предупреждения появления несоответствий по качеству и методов обнаружения несоответствий, которые необходимы для обеспечения стабильного уровня качества серийной продукции.
		Мониторинг и предиктивная диагностика состояния технологического оборудования для обеспечения эффективности использования технологического оборудования.

Серийное роботизированное производство должно обеспечивать выполнение следующих основных требований: высокая скорость производства при минимальных производственных циклах; стабильность параметров качества выпускаемой продукции; минимальные производственные издержки. Для эффективной организации серийного роботизированного производства необходимо выбрать модель производственной системы. Разработка такой системы начинается с выбора стратегии и типа производства, отвечающего всем требованиям к созданию МКА.

В машиностроении распространён ряд стратегий производства, которые применимы и к космическому машиностроению (рис. 1) [3; 4].

Стратегия «Производство на склад» применяется в серийном производстве, где особенностью являются относительно длительные производственные циклы в тех организациях, где не настроены производственные процессы и часто бывают сбои и неритмичная работа. При реализации данной стратегии в производстве возникает большое количество запасов материалов и комплектующих, незавершённого производства (НЗП) и готовой продукции, что напрямую влияет на эффективность бизнес-процессов. Данная стратегия применяется для сравнительно недорогой продукции. Главным недостатком данной стратегии являются большие убытки, связанные с тем, что произведённая продукция может стать неликвидной и не быть продана заказчику.

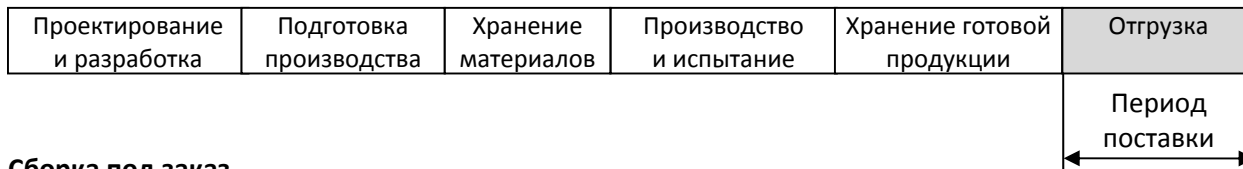
Стратегия «Сборка под заказ» применяется в серийном производстве там, где присутствуют жёсткие требования по срокам поставки. При этом запасы материалов и комплектующих, а также готовой продукции минимизированы.

Стратегия «Производство под заказ» является наиболее предпочтительной для промышленного предприятия, так как гарантирует снижение издержек, связанных с управлением запасов материалов и комплектующих, НЗП и готовой продукции. Однако при данной стратегии ключевым условием являются эффективные производственные процессы и качественное оперативное управление выпуском продукции. Для этого в

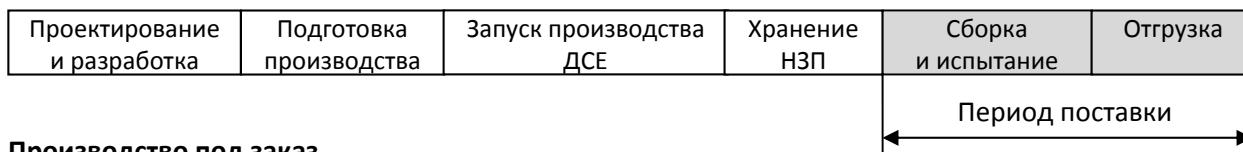
организации должны применяться современные управленческие технологии и методы, такие, как инструменты «бережливого производства».

Стратегия «Разработка под заказ» является частным случаем стратегии «Производства под заказ» и применяется при производстве «особенной» или единичной продукции.

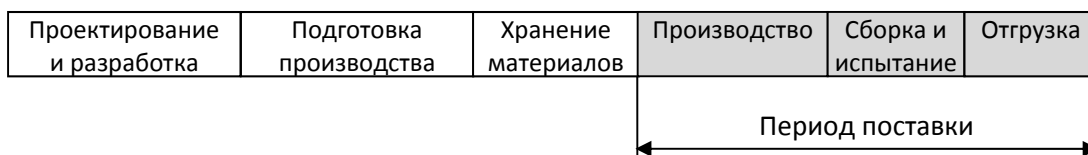
Производство на склад



Сборка под заказ



Производство под заказ



Разработка под заказ

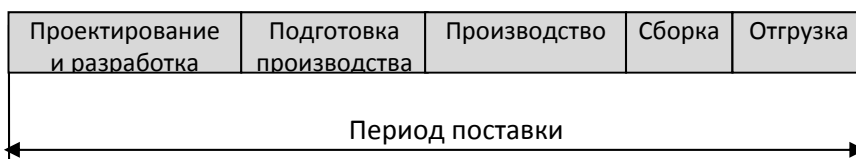


Рис. 1. Стратегии производства сложной техники

Анализ существующих стратегий позволяет сделать вывод о том, что двумя ключевыми критериями выбора стратегии являются:

- 1) период поставки, отвечающий требованиям заказчика;
- 2) затраты на производство, включающие затраты на формирование запасов материалов, комплектующих и полуфабрикатов.

Таким образом, для целей серийного производства МКА наиболее подходит стратегия «Производство под заказ». В данной стратегии конструкция МКА разрабатывается разработчиком (инжиниринговым центром, конструкторским бюро, коммерческой компанией, университетом, научной организацией и др.), а производственной площадке (изготовителю) отводится роль производства деталей и сборочных единиц, отвечающих требованиям разработки с максимальной производительностью.

При этом наиболее подходящим типом производства является матричный тип, при котором производство состоит из производственных ячеек – специализированных производственных участков.

Матричный тип производственной системы

Матричный тип производственной системы предполагает, что технологические операции на производственных участках выполняются не на жёстко организованном последовательном конвейере, а внутри отдельных стандартных производственных ячеек, которые размещаются в цехе в узлах регулярной сетки – матрицы (рис. 2) [5].

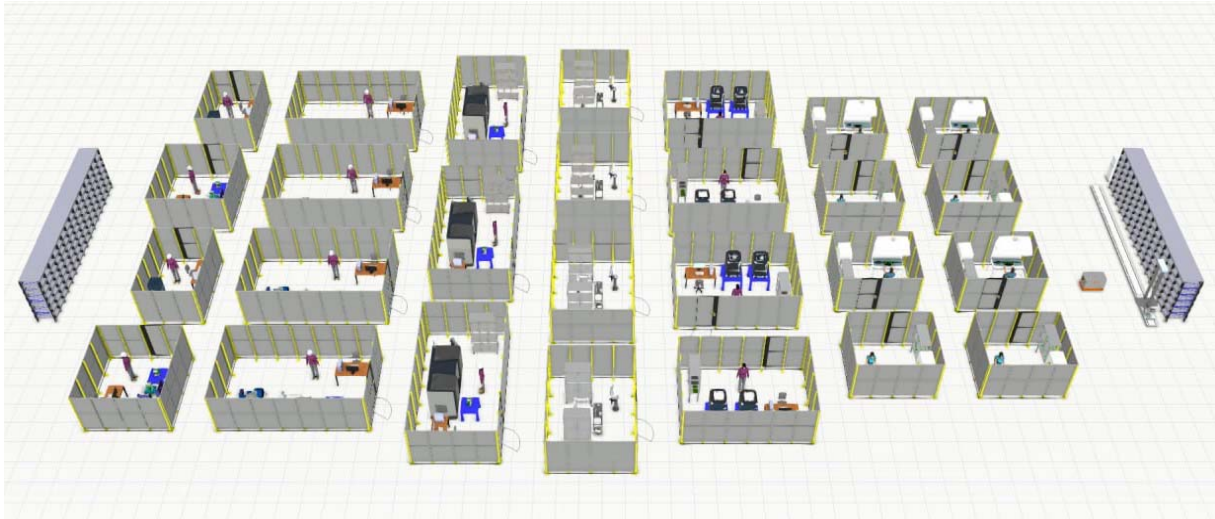


Рис. 2. Структурная схема матричного типа производства

К преимуществам матричного типа производства можно отнести:

- максимальная скорость производственных процессов (производительность) при большой номенклатуре выпускаемой продукции (высокая степень кастомизации производства);
- высокая степень унификации и стандартизации производственно-технологических решений (унифицированные производственные ячейки);
- высокая степень масштабируемости производства без рисков получения несбалансированных производственных участков (участков, являющихся «узкими» местами, сдерживающих производственный поток по производительности).

Максимальное преимущество матричное производство приобретает при «глубокой» автоматизации и роботизации производственных процессов и переходе к концепции «безлюдного» производства.

Современные производственные ячейки должны обладать свойством интеллектуальности. Интеллектуальная производственная ячейка (ИПЯ) – ключевая функциональная производственная единица, в состав которой входит автоматизированное производственное оборудование, роботизированные комплексы, средства автоматизации измерения и контроля качества, средства машинного зрения, средства дополненной реальности, комплекс программного обеспечения, формирующий единую информационную среду производственной системы. Все эти элементы ИПЯ направлены на повышение производительности, а также качества выпускаемой продукции.

В табл. 3 приведены элементы ИПЯ с указанием их назначения.

Все ИПЯ матричного производства можно разделить на три группы: универсальные (предназначены для всех типов МКА); перенастраиваемые (могут использоваться для производства нескольких типов МКА); специализированные (для одного типа МКА). Отдельно можно выделить ячейки для операций формирования запасов и хранения поступающих компонентов и материалов, ячейки для операций по изготовлению корпусных деталей методом аддитивного производства [6], механической обработки и сварки, ячейки для сборочных операций, а также ячейки для операций контроля и испытаний МКА.

Таблица 3. Элементы интеллектуальной производственной ячейки

№	Элемент	Назначение
1.	Роботизированные комплекты и их технологическое оснащение	Для выполнения наиболее ответственных, повторяемых технологических операций. Роботизированные комплексы предназначены для минимизации влияния человеческого фактора.
2.	Автоматизированные системы хранения компонентов и материалов	Для планирования пополнения, организации хранения, комплектования и выдачи компонентов и материалов в производство.
3.	Автоматизированные системы хранения инструмента и оснастки	Для планирования пополнения, организации хранения, комплектования и выдачи инструмента и оснастки.
4.	Системы учёта идентификации и прослеживаемости	Для регистрации, учёта, идентификации и прослеживаемости поступающих ДСЕ.
5.	Автоматизированные транспортные системы	Для транспортировки компонентов, материалов и инструментов между производственными ячейками и оптимизации логистических затрат.
6.	Системы машинного зрения	Для контроля качества сборочных операций и обеспечения точности позиционирования роботов-манипуляторов.
7.	Система автоматизированного контактного и бесконтактного контроля геометрических параметров ДСЕ	Для обеспечения точности и скорости при контроле качества ДСЕ и их сборок.
8.	Цифровые графические инструкции с применением технологии дополненной реальности	Для помощи персоналу при выполнении технологических и вспомогательных операций.
9.	Автоматизированная система управления технологическими процессами SCADA	Для управления параметрами технологических процессов.
10.	Система мониторинга и предиктивной диагностики производственных процессов и технологического оборудования	Для снижения издержек при ремонте и обслуживании технологического оборудования, планирования регламентных работ, сокращения простоев.

Описанные выше методические подходы и принципы были внедрены и отработаны в рамках проекта по созданию киберфизической фабрики малых космических аппаратов, реализованному в передовой инженерной аэрокосмической школе (ПИАШ) Самарского университета. Данная киберфизическая фабрика является прототипом серийного роботизированного производства МКА и площадкой для отработки технологий и принципов организации производственной системы нового типа.

Объект производства – МКА радиолокационного мониторинга Земли

В качестве объекта для производства в рамках киберфизической фабрики был выбран МКА «АИСТ-СТ», представляющий собой кубсат формата 12U, предназначенный для радиолокационного мониторинга поверхности Земли. В своём первоначальном виде этот спутник представлял собой классический кубсат с рамой в качестве несущей конструкции и бортовой кабельной сетью, применяемой для межсистемной бортовой коммутации. Первый проектный облик МКА приведён на рис. 3.

Ключевым этапом создания серийного роботизированного производства является проектно-конструкторская проработка конструкции изделия (табл. 2). Конструкция должна быть адаптирована под возможности роботизированного производства. Для этого необходимо произвести анализ технологичности конструкции под условия использования роботизированных комплексов.

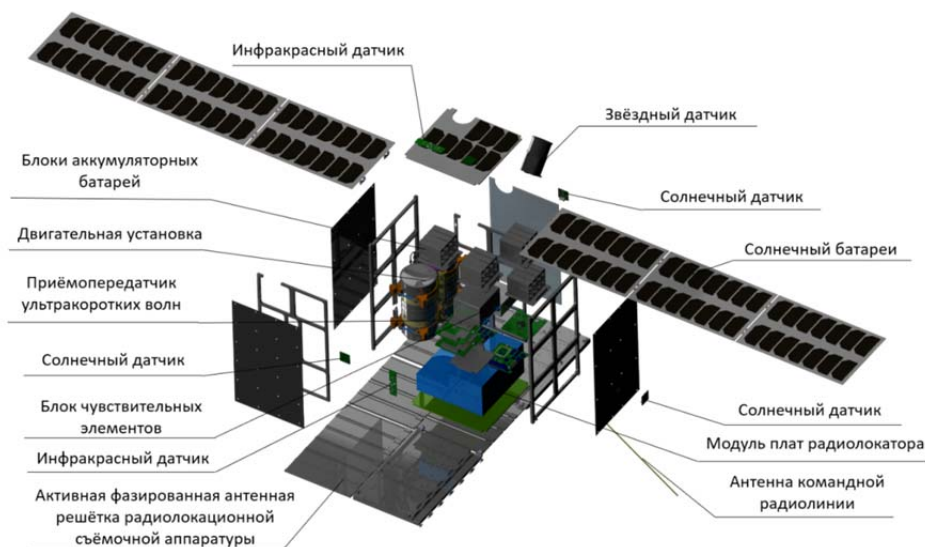


Рис. 3. Первый проектный облик малого космического аппарата «АИСТ-СТ»

Анализ исходной конструкции показал, что для успешной роботизированной сборки конструктивно-компоновочная схема МКА должна быть переработана. К ключевым применённым проектно-конструкторским решениям можно отнести:

- переход от рамной конструкции к несущим панелям с установленной на них бортовой аппаратурой;
- адаптация блоков бортовой аппаратуры в части унификации разъёмов;
- сокращение использования бортовой кабельной сети за счёт использования базовых плат.

Первое решение обосновано невозможностью работы роботов-манипуляторов в замкнутых объёмах. Существенной проблемой для роботизированной сборки является также применение бортовой кабельной сети, так как её прокладка внутри МКА является крайне затруднительным процессом. Определённым шагом в решении данной проблемы является оснащение МКА базовыми платами сопряжения, с помощью которых осуществляется коммутация бортовых систем в единую сеть [7]. На рис. 4 приведён разнесённый вид МКА, адаптированного под особенности серийной роботизированной сборки.

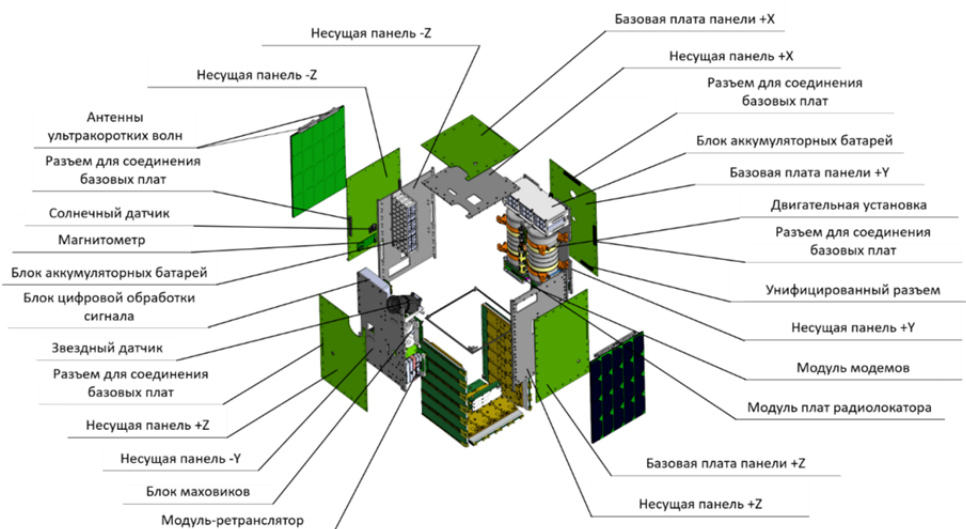

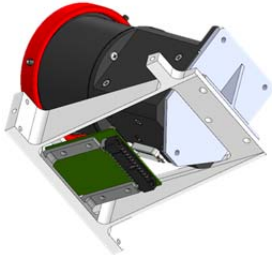

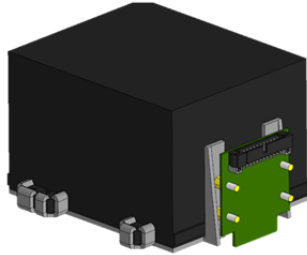
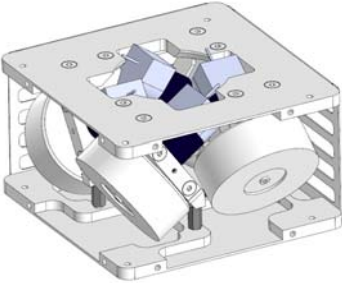
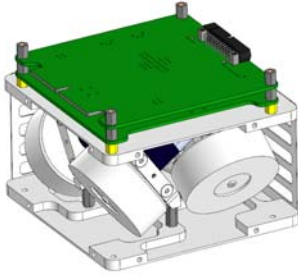
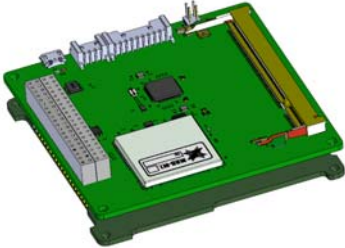
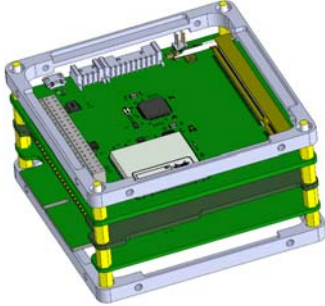


Рис. 4. Разнесённый вид адаптированного под особенности серийной роботизированной сборки малого космического аппарата

В табл. 4 приведены примеры адаптации бортовой аппаратуры для работы с базовыми платами и роботизированной установки в корпус платформы МКА.

Таблица 4. Адаптация блоков бортовой аппаратуры платформы малого космического аппарата

Наименование блока	Вид блока до адаптации	Вид блока после адаптации
Звёздный датчик		
Блок чувствительных элементов		
Блок маховиков		
Модуль плат радиолокатора		

Совокупность несущей стенки, базовой платы и блоков бортовой аппаратуры образуют соответствующие панели. На рис. 5, 6 приведена конструкция одной из панелей МКА.

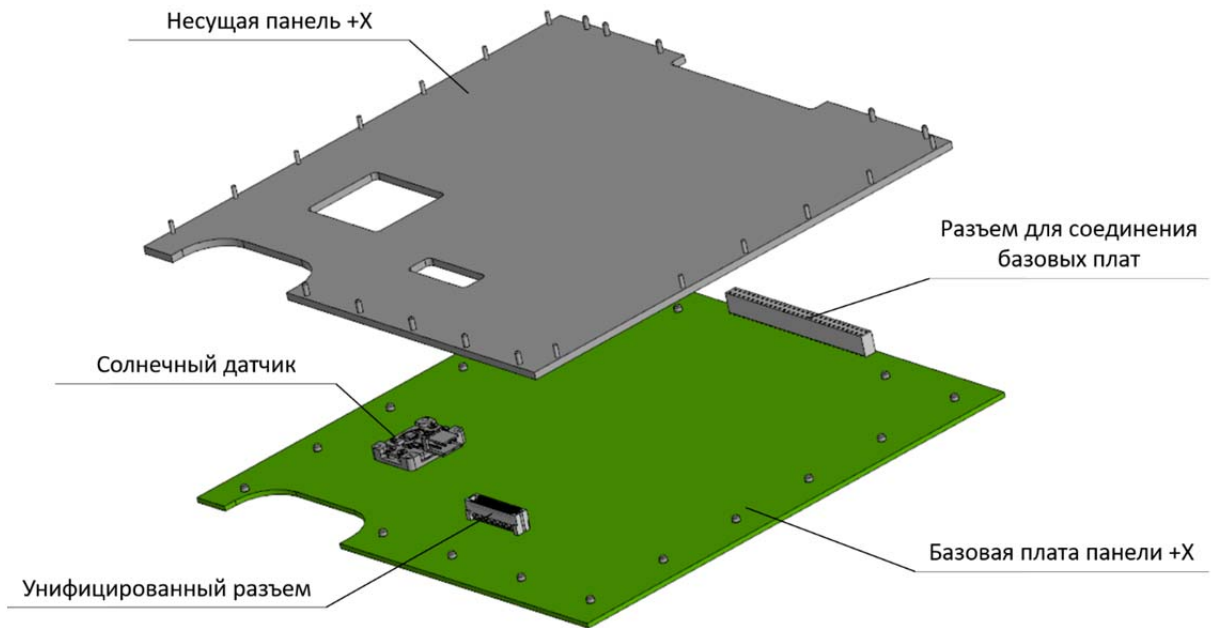


Рис. 5. Несущая стенка и базовая плата панели малого космического аппарата

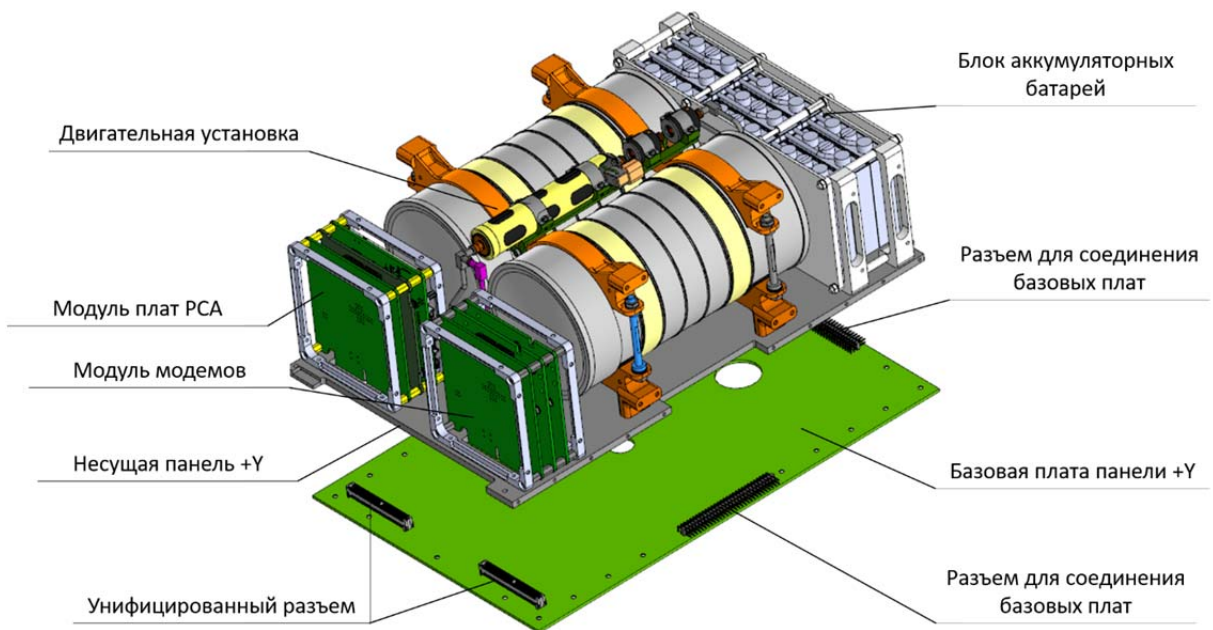


Рис. 6. Конструкция панели малого космического аппарата

Таким образом, детальная проработка конструкции и её адаптация является необходимым условием для обеспечения технологичности серийного роботизированного производства МКА.

Организация роботизированного производства малого космического аппарата и применяемые технологические решения

Следующим этапом организации роботизированного производства МКА является технологическая подготовка производства (рис. 7). Наименование участков на технологической планировке (рис. 7) приведено в табл. 5.

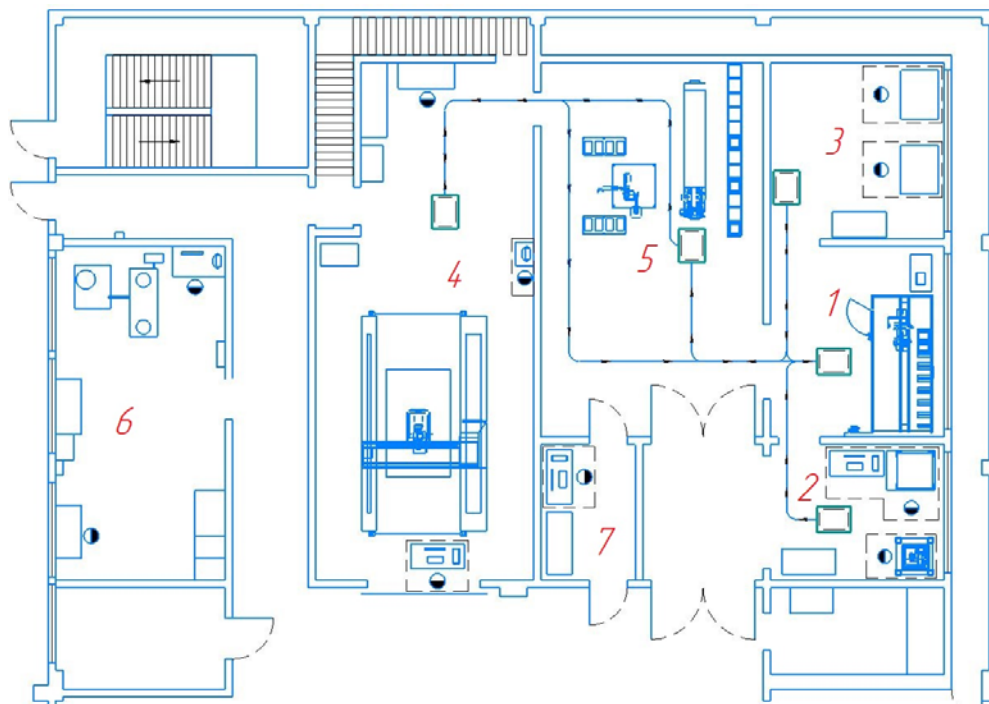


Рис. 7. Технологическая планировка серийного роботизированного производства
 малого космического аппарата

Таблица 5. Обозначение интеллектуальных производственных ячеек на технологической планировке роботизированного производства малого космического аппарата

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

Периметром производства МКА являются процессы изготовления корпусных деталей, сборка компонентов МКА и проведение испытаний. На входе в производство – компоненты МКА и материалы для корпусных деталей, поставляемые поставщиками. Под серийное производство МКА «АИСТ-СТ» в Самарском университете был создан прототип серийного роботизированного производства, состоящий из 7 участков. Такое производство создано в формате киберфизической фабрики передовой инженерной аэрокосмической школы на базе производственно-испытательного комплекса МКА.

Были разработаны технологические и вспомогательные операции, выполняемые на производственных участках (табл. 6).

Таблица 6. Перечень технологических и вспомогательных операций серийного роботизированного производства малого космического аппарата

№	Название участка	Технологические и вспомогательные операции
1.	Участок входного контроля компонентов и материалов	1.1. Приёмка и входной контроль входящих компонентов/материалов в соответствии с методикой и критериями входного контроля. 1.2. Идентификация (с помощью системы штрих-кодирования), размещение и хранение компонентов/ материалов в автоматизированном штабелере. 1.3.1 Комплектование «заказа» (выдача компонентов) на участок контроля и подготовки компонентов. 1.3.2 Выдача материалов на участок аддитивного производства и механической обработки. 1.4. Транспортировка скомплектованных компонентов/материалов с помощью роботизированной транспортной тележки.
2.	Участок аддитивного производства и механической обработки	2.1. Разгрузка материала с автоматизированной тележки и межоперационное хранение. 2.2. Аддитивное производство комплекта корпусных деталей и адаптеров для доработки комплектующих. 2.3. Межоперационное хранение напечатанных корпусных деталей на участке аддитивного производства. 2.4. Механическая обработка (постобработка) корпусных деталей. 2.5. Транспортировка корпусных деталей с помощью роботизированной транспортной тележки на участок контроля и подготовки компонентов.
3.	Участок контроля и подготовки компонентов	3.1. Разгрузка доставленных роботизированной тележкой компонентов/ корпусных деталей/ адаптеров и межоперационное хранение. 3.2. Установка адаптеров на компоненты (в настоящее время осуществляется вручную). 3.3. Сборка и комплектование компонентов с адаптерами и корпусных деталей в стапели (в настоящее время осуществляется вручную). 3.4. Транспортировка собранных комплектов стапелей на участок роботизированной сборки.
4.	Участок контроля геометрии	4.1. Разгрузка доставленных роботизированной тележкой корпусных деталей и межоперационное хранение. 4.2. Бесконтактный обмер корпусных деталей. 4.3. Комплексный контактный и бесконтактный лазерный обмер МКА в сборе с построением карты отклонения контролируемых параметров от электронной модели.
5.	Участок автоматизированной роботизированной сборки	5.1. Автоматизированная разгрузка с транспортной тележки комплектов стапелей, контроль машинным зрением и загрузка их в автоматизированную систему хранения. 5.2. Общая сборка корпуса МКА. 5.3. Транспортировка собранного МКА на участок контроля геометрии с помощью роботизированной тележки.
6.	Участок испытаний	6.1. Разгрузка доставленных роботизированной тележкой МКА и межоперационное хранение. 6.2. Проведение приёмо-сдаточных испытаний изготовленных МКА в соответствии с программой испытаний. 6.3. Перемещение и хранение МКА между испытательными стендами. 6.4. Транспортировка испытанного МКА в зону упаковки и хранения МКА с помощью роботизированной тележки.
7.	Зона упаковки и хранения	7.1. Разгрузка доставленных роботизированной тележкой МКА и межоперационное хранение. 7.2. Упаковка МКА (в настоящее время осуществляется вручную). 7.3. Хранение МКА до отгрузки потребителю. 7.4. Отгрузка потребителю.

В рамках созданного прототипа серийного роботизированного производства МКА были автоматизированы процессы хранения, комплектования и выдачи компонентов, процессы транспортировки, процессы сборки МКА, а также процедуры контактного и бесконтактного замера геометрии.

В табл. 7 приведён перечень разработанных технологических решений по автоматизированному хранению, комплектованию и выдаче компонентов для сборки МКА.

В табл. 8 приведён перечень разработанных технологических решений по транспортировке компонентов МКА с помощью роботизированных тележек.

Таблица 7. Технологические решения по автоматизированному хранению, комплектованию и выдаче компонентов для сборки малого космического аппарата

Визуализация участка	Разработанные технологические решения
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Идентификация поступающих комплектующих и компонентов с помощью системы штрих-кодирования. 2. Адаптация универсальной тары под особенности хранения компонентов. 3. Комплектование компонентов роботизированным комплексом. 4. Учёт выданных компонентов с помощью системы штрих-кодирования. 5. Транспортировка комплектующих с помощью роботизированной транспортной тележки для дальнейшей сборки.

Таблица 8. Технологические решения по роботизированной транспортировке

Визуализация оборудования	Разработанные технологические решения
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оснастка для точного позиционирования и перемещения сборочных единиц на роботизированной тележке. 2. Базирующие элементы для точного позиционирования перемещаемых сборочных единиц в местах парковки тележки. 3. Оптимальный маршрут перемещения сборочных единиц между производственными ячейками.

Ключевым процессом роботизированного производства является участок роботизированной сборки. В данной ИПЯ используются два коллаборативных робота с разной грузоподъёмностью, а также пять сменных инструментов. В табл. 9 приведён перечень технологических решений по роботизированной сборке МКА.

Таблица 9. Технологические решения по роботизированной сборке

Визуализация участка	Разработанные технологические решения
	<ol style="list-style-type: none">1. Сборка платформы МКА по заданной производственной программе.2. Сборка платформы МКА с использованием ступенчатой оснастки на рабочем столе.3. Контроль качества выполнения сборочных операций с помощью машинного зрения.4. Рабочая область для сборки МКА с позиционерами и зоной для смены инструмента.

Для серийного производства важно организовать эффективный процесс оперативного планирования производства. С этой целью была разработана методика оперативного планирования серийного производства МКА. Её визуализация приведена на рис. 8.

Основными этапами реализации данной методики являются:

- 1) обработка заказа на изготовление МКА для еженедельного планирования;
- 2) разработка плана сборки и отгрузки МКА (периодичность разработки плана сборки и отгрузки – один раз в сутки);
- 3) анализ состояния запасов в автоматизированной системе хранения (работает по принципу «супермаркет», ежедневно проверяются остатки материалов и комплектующих, сравниваются с нормативными запасами);
- 4) заказ на поставку материалов и компонентов (поступает поставщику при снижении порога нормативных запасов);
- 5) разработка плана изготовления корпусных деталей, ступеней (разрабатывается на основе ежесменного плана по сборке МКА);
- 6) разработка плана по сборке и подготовке компонентов;
- 7) поставка материалов для производства корпусных элементов;
- 8) поставка готовых плат и компонент (бортовых систем) со склада на участок проверки и сборки и последующая поставка всех необходимых компонентов на участок роботизированной сборки.

Реализация вышеуказанных этапов разработанной методики позволяет осуществлять оперативное планирование и управлять процессами поставки компонентов и сборки готового изделия (МКА ДЗЗ) с тактом два аппарата в сутки, что подтверждено средствами имитационного моделирования в среде AnyLogic, а также экспериментальным путём в рамках отработки технологий роботизированной сборки в рамках созданной киберфизической фабрики.

Выводы

Таким образом, в работе проведён анализ нового типа производства – серийного роботизированного производства малых космических аппаратов ДЗЗ и предложены методические подходы к его созданию, в основе которых комплекс проектно-конструкторских, организационно-управленческих и технологических решений. Проведённая систематизация ключевых факторов роботизированного производства выявила значимое влияние организационно-технологических аспектов в создании серийного производства, а также необходимость адаптации конструкции МКА под возможности серийного производства. Инструментарием, обеспечивающим эффективность создания и функционирования роботизированного серийного производства, являются организационные модели матричного производства, технологические решения, направленные на внедрение роботизированных комплексов для хранения, транспортировки и выполнения технологических операций, а также методы управления производством, поставками материалов и компонентов, качеством выпускаемой продукции. Апробация и внедрение разработанных методических подходов, технологий и инструментария осуществлены в рамках созданного в Самарском университете экспериментального производства МКА формата 12-юнитового кубсата.

Описанные в настоящей статье научно-исследовательские результаты получены в рамках выполнения Госзадания FSSS-2023-0007.

Библиографический список

1. Потюпкин А.Ю. Управление многоспутниковыми космическими системами. М.: Инфра-Инженерия, 2024. 292 с.
2. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с.
3. Стороженко В.В. Создание современной стратегии энергоэффективного управления производством // Материалы II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы социально-экономических наук» (29 февраля 2016 г., Таганрог, Россия). М.: Издательство «Перо», 2016. С. 42-48.
4. Измайлов М.К. Проблемы управления процессом производства при различных типах производства на отечественных и зарубежных крупных промышленных предприятиях // Актуальные проблемы экономики и управления. 2020. № 3 (27). С. 28-33.
5. Ткаченко И.С., Антипов Д.В., Куприянов А.В., Смелов В.Г., Кокарева В.В. Концептуальная модель цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25, № 3 (113). С. 90-106. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-90-106
6. Ткаченко И.С., Куркин Е.И., Лукьянов О.Е., Кишов Е.А., Галинсога-Самора Х., Смелов В.Г., Чертыковцева В.О. Проектирование силовых конструкций с использованием топологической оптимизации и технологии аддитивного производства // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 4 (46). С. 532-546. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-532-546
7. Устюгов Е.В., Шафран С.В., Соболев А.А. Новая архитектура наноспутника стандарта CubeSat без использования бортовой кабельной сети // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 423-429. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE CREATION AND FUNCTIONING OF SERIAL ROBOTIC PRODUCTION OF SMALL SATELLITES

© 2024

I. S. Tkachenko Candidate of Science (Engineering), Associate Professor,
Institute of Aerospace Engineering, Director;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
tkachenko.is@ssau.ru

The article considers a system approach to the creation of robotic production of small nano satellites to ensure their serial production. The analysis of key trends in the creation and development of modern satellite production was carried out; the factors characterizing serial robotic production are identified and systematized. An intelligent production cell is described as the main element of serial robotic matrix-type production. The main types of design solutions aimed at adapting the design of a small satellite for robotic assembly are presented. The description of the project to create a prototype for serial production of small satellites in the format of a cyberphysical factory, implemented at the advanced aerospace engineering school of Samara University, is given.

Small satellite; serial robotic production; production system; matrix-type of production; design and development solutions; system approach

Citation: Tkachenko I.S. Methodological approaches to the creation and functioning of serial robotic production of small satellites. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 3. P. 178-194.
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-3-178-194

References

1. Potyupkin A.Yu. *Upravlenie mnogosputnikovymi kosmicheskimi sistemami* [Control of multi-satellite space systems]. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ., 2024. 292 p.
2. GOST P 60.0.0.4-2019. Robots and robotic devices. Terms and definitions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 31 p. (In Russ.)
3. Storozhenko V.V. Sozdanie sovremennoy strategii energoeffektivnogo upravleniya proizvodstvom. *Materialy II Mezhdunarodnoy Nauchno-prakticheskoy Konferentsii «Aktual'nye Problemy Sotsial'no-ekonomicheskikh Nauk» (February, 29, 2016, Taganrog, Russian Federation)*. Moscow: Pero Publ., 2016. P. 42-48. (In Russ.)
4. Izmaylov M.K. Problems of production process management for various types of production on domestic markets and foreign large industrial enterprises. *Aktual'nye Problemy Ekonomiki i Upravleniya*. 2020. No. 3 (27). P. 28-33. (In Russ.)
5. Tkachenko I.S., Antipov D.V., Kupriyanov A.V., Smelov V.G., Kokareva V.V. Conceptual model of the digital plant of manufacturing enterprises in the aerospace industry. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2023. V. 25, no. 3 (113). P. 90-106. (In Russ.). DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-90-106
6. Tkachenko I.S., Kurkin E.I., Lukyanov O.E., Kishov E.A., Galinzoga-Samora J., Smelov V.G., Chertykovtseva V.O. Load-bearing structures design using topological optimization and additive manufacturing technologies. *Ontology of Designing*. 2022. V. 12, no. 4 (46). P. 532-546. (In Russ.). DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-532-546
7. Ustyugov E.V., Shafran S.V., Sobolev A.A. New CubeSat architecture without onboard cable network. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. V. 61, no. 5. P. 423-429. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429