

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ПРОТОТИПОВ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ

*Яхья-заде А. С.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Вышинский Н. В. – к.т.н., профессор, профессор кафедры ИКТ*

**Аннотация.** В статье рассматривается применение аддитивных технологий для создания прототипов роботизированных устройств. Проведён анализ основных методов 3D-печати, используемых в робототехнике: FDM, SLA и SLS. Показаны преимущества и ограничения данного подхода при проектировании механических узлов и функциональных деталей.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, прототипирование, роботизированные устройства, FDM, SLA

**Введение.** Развитие робототехники в последние десятилетия характеризуется стремительным расширением областей применения роботизированных систем: от промышленной автоматизации до медицинских и бытовых устройств. Одним из ключевых этапов в процессе разработки таких систем является создание физических прототипов, позволяющих верифицировать конструктивные решения до запуска серийного производства. Традиционные методы изготовления прототипов требуют значительных временных и финансовых затрат, что существенно замедляет цикл разработки.

В данном контексте аддитивные технологии – совокупность методов послойного синтеза трёхмерных объектов – представляют собой эффективную альтернативу классическим технологиям обработки материалов. Возможность быстрого перехода от цифровой модели к физическому изделию, а также гибкость в изменении конструкции без необходимости переоснащения производства делают аддитивные технологии идеальным инструментом при разработке роботизированных устройств [1].

**Основная часть.** Аддитивные технологии объединяют широкий спектр методов, различающихся по применяемым материалам, физическим принципам и точности изготовления. В контексте прототипирования роботизированных устройств наибольшее распространение получили следующие технологии.

Технология моделирования методом послойного наплавления (FDM – Fused Deposition Modeling) является наиболее доступной и широко распространённой. В её основе лежит послойное нанесение расплавленной нити из термопластичного материала по заданной траектории. Для изготовления прототипов роботов чаще всего используется полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), а также нейлоновые и полиэфирные нити. FDM-печать позволяет быстро получать прочные детали с достаточно высокой геометрической точностью – погрешность составляет порядка 0,1–0,3 мм [2].

Стереолитография (SLA – Stereolithography) основана на послойной полимеризации жидкой фотополимерной смолы под воздействием ультрафиолетового лазера. Данная технология обеспечивает значительно более высокую точность и качество поверхности по сравнению с FDM, что делает её предпочтительной для изготовления деталей со сложной геометрией. Точность SLA-печати может достигать 0,025 мм, однако механические свойства фотополимеров, как правило, уступают свойствам термопластиков, применяемых в FDM.

Технология селективного лазерного спекания (SLS – Selective Laser Sintering) использует лазерное спекание порошковых материалов: полиамида, поликарбоната, стекло- и углеволоконных наполненных полимеров. SLS позволяет изготавливать функциональные детали с высокими механическими характеристиками без применения поддерживающих структур, что существенно упрощает постобработку. Данная технология применяется для

производства несущих элементов манипуляторов и корпусных деталей мобильных роботов [3].

При создании прототипов роботизированных устройств аддитивные технологии применяются на нескольких уровнях конструктивной иерархии. На уровне кинематических узлов с помощью 3D-печати изготавливаются звенья манипуляторов, корпусные детали, кронштейны крепления сенсоров и приводов. Изготовление таких элементов методами аддитивного производства позволяет сократить сроки прототипирования в 3–5 раз по сравнению с традиционной механической обработкой [2].

Применение гибких фотополимеров и термопластичных эластомеров (TPU) открывает возможность изготовления мягких роботизированных захватов и гибких приводных элементов – компонентов, работающих по принципу пневматической или гидравлической актуации. Подобные устройства находят широкое применение в медицинских манипуляторах и системах захвата хрупких объектов.

Интеграция проводящих материалов при многоматериальной 3D-печати позволяет создавать встроенные токопроводящие дорожки непосредственно в процессе формирования корпусных деталей, что упрощает монтаж электронных компонентов и уменьшает массу роботизированного устройства. Параллельно с изготовлением механических компонентов ведётся верификация кинематической схемы с использованием программных пакетов имитационного моделирования, таких как ROS (Robot Operating System) и Gazebo [4].

Среди ограничений аддитивных технологий при прототипировании роботизированных систем следует выделить следующее: изотропность механических свойств деталей, полученных FDM-методом, уступает свойствам деталей, изготовленных механической обработкой или литьём; точность большинства настольных FDM-принтеров не позволяет получать посадочные поверхности с полями допуска выше 7–8 качества без дополнительной обработки; выбор материалов ограничен технологическими возможностями конкретного оборудования.

Тем не менее, практика прототипирования показывает, что сочетание FDM-печати с точными покупными элементами – подшипниками, шестернями, стандартными крепёжными изделиями – позволяет добиться вполне удовлетворительных функциональных характеристик прототипа при минимальных затратах. Такой подход широко применяется в академической среде и стартап-компаниях при разработке первых итераций роботизированных устройств [1].

В качестве практического примера рассмотрим процесс создания прототипа шестизвенного манипулятора с помощью FDM-технологии. Трёхмерные модели звеньев манипулятора разрабатываются в САПР (например, SolidWorks или Fusion 360) с учётом рекомендаций по ориентации деталей при печати для обеспечения наилучших механических свойств. Конструктивные зазоры между сопрягаемыми деталями выбираются в диапазоне 0,2–0,4 мм для обеспечения свободной посадки с учётом погрешностей печати.

После изготовления деталей проводится сборка прототипа: звенья манипулятора соединяются с помощью серводвигателей типа MG996R или Dynamixel, управление которыми осуществляется микроконтроллером STM32 или платформой Arduino. На данном этапе верифицируется корректность кинематической схемы, точность воспроизведения траекторий и нагрузочные характеристики конструкции. В случае выявления недостатков конструкция оперативно модифицируется, после чего цикл прототипирования повторяется [5].

Использование облачных платформ для хранения и совместной разработки 3D-моделей (GrabCAD, Onshape) в сочетании с аддитивным производством формирует итерационный процесс разработки, при котором полный цикл – от модификации конструкции до тестирования нового прототипа – занимает от нескольких часов до одного рабочего дня. Это кардинально изменяет характер инженерной деятельности в области робототехники, снижая стоимость ошибки и стимулируя поиск нестандартных конструктивных решений.

Важным направлением применения аддитивных технологий является производство корпусных деталей мобильных роботизированных платформ. Лёгкие, геометрически сложные корпуса, изготовленные методом FDM или SLS, позволяют оптимально распределить

внутреннее пространство платформы для размещения аккумуляторных батарей, управляющей электроники, датчиков и приводов. При этом масса корпусных деталей, изготовленных из PLA или нейлона, может быть в 3–4 раза ниже по сравнению с аналогичными деталями из алюминиевых сплавов [3].

Перспективным направлением является применение аддитивных технологий для изготовления корпусов роботов с интегрированными каналами системы охлаждения, полостями для прокладки проводки и элементами крепления плат расширения. Подобная конструктивная интеграция возможна только при использовании аддитивного производства и требует тщательного планирования топологии изделия на этапе проектирования.

Следует также отметить перспективы применения металлической 3D-печати (SLM – Selective Laser Melting, DMLS – Direct Metal Laser Sintering) для изготовления нагруженных деталей роботизированных систем. Хотя данные технологии пока остаются относительно дорогостоящими, их применение оправдано при создании прототипов деталей с высокими требованиями к механическим свойствам: зубчатых колёс, осей, несущих кронштейнов. Металлическая 3D-печать позволяет реализовать оптимизированные топологически структуры с минимальной массой при заданной жёсткости конструкции [2].

**Заключение.** Аддитивные технологии обеспечивают существенное ускорение процесса разработки роботизированных устройств за счёт сокращения сроков и стоимости изготовления прототипов. Методы FDM, SLA и SLS дополняют друг друга, образуя инструментарий, позволяющий решать широкий круг задач – от изготовления корпусных элементов с пониженными требованиями к точности до получения функциональных деталей со сложной геометрией. Итерационный характер аддитивного прототипирования позволяет в разы сократить время от идеи до действующего прототипа. Дальнейшее развитие данного направления связано с расширением номенклатуры применяемых материалов, повышением точности оборудования и интеграцией аддитивных технологий в автоматизированные производственные цепочки.

### Список литературы

1. Lipson, H. *Fabricated: The New World of 3D Printing* / H. Lipson, M. Kurman. – Indianapolis : John Wiley & Sons, 2013. – 320 p.
2. Gibson, I. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York : Springer, 2015. – 498 p.
3. Siciliano, B. *Robotics: Modelling, Planning and Control* / B. Siciliano, L. Sciacivco, L. Villani, G. Oriolo. – London : Springer, 2010. – 632 p.
4. Quigley, M. *ROS: an open-source Robot Operating System* / M. Quigley [et al.] // *ICRA Workshop on Open Source Software*. – 2009. – Vol. 3, No. 3.2. – P. 5.
5. Ngo, T. D. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges* / T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, D. Hui // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196.

UDC 621.7.04:621.865

## APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF PROTOTYPES OF ROBOTIC DEVICES

Yahya-zada A. S.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Vyshinskiy N. V. – Cand. of Sci., Professor, Professor of the department of ECG*

**Annotation.** The article considers the application of additive technologies for the prototyping of robotic devices. The main 3D printing methods used in robotics are analysed: FDM, SLA and SLS. The advantages and limitations of this approach for the design of mechanical assemblies and functional parts are demonstrated.

**Keywords:** additive technologies, 3D printing, prototyping, robotic devices, FDM, SLA