

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ FDM КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

© Н. А. Вехтева¹✉

¹ Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
magicanolner@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: 3D-печать, FDM-технология, аддитивное производство, системный анализ.

Аннотация: Представлен системный анализ аддитивного производства, в результате которого предложена иерархическая декомпозиция технологического цикла на пять функциональных подсистем с формализованным описанием информационных, материальных и управляющих потоков. Показано, что система является искусственной, открытой и детерминированной, что допускает применение методов теории управления. Установлено, что варьирование пространственной ориентации модели позволяет влиять на время печати, расход материала и потребность в поддерживающих конструкциях без модификации оборудования. Предложена математическая постановка задачи многокритериальной оптимизации с нормализованными показателями эффективности.

Введение

Современное развитие промышленности характеризуется усилением спроса на продукцию с индивидуальными характеристиками, сокращением жизненного цикла изделий и ростом доли мелкосерийного производства [1]. В этих условиях аддитивные технологии приобретают все большее значение благодаря своей гибкости, минимальным затратам на подготовку производства и способности изготавливать геометрически сложные объекты без использования специальной оснастки.

Метод послойного наплавления (англ. Fused Deposition Modeling (**FDM**)) занимает значительную долю рынка аддитивного оборудования для малого и среднего бизнеса [2]. Однако на практике сохраняются существенные проблемы, особенно при изготовлении изделий нетиповой геометрии. Дефекты формы изделия становятся особенно критичными при производстве функциональных элементов, где точность определяет работоспособность всего изделия. Одновременно остаются нерешенными вопросы экономической целесообразности: нерациональный расход материала, время печати зачастую оказывается значительно выше расчетного [3].

При этом оборудование и материалы для аддитивного производства в условиях мелкосерийного выпуска, как правило, строго определены техническим заданием и не подлежат замене, что ограничивает возможности влияния на результат за счет модернизации технической базы. Поэтому управление качеством и ресурсоемкостью без модификации оборудования становится приоритетной задачей.

Цель статьи – проведение системного анализа процесса аддитивного производства методом FDM в целях выявления управляющих воздействий и обоснования возможности постановки задачи оптимального управления.

Декомпозиция системы аддитивного производства на подсистемы

В рамках проводимого исследования система аддитивного производства (АП) методом FDM представляет собой целостную совокупность взаимосвязанных элементов, выполняющих определенные функции и обеспечивающих преобразование исходных данных и материалов в конечный продукт – готовое изделие.

Цель системы: получение готового изделия по техническому заданию.

Задачи системы:

- изучение реального объекта или его двумерного представления;
- преобразование информации в технологически корректную цифровую модель;
- подготовка оборудования и материала печати;
- формообразование физического объекта методом аддитивного наращивания;
- доводка изделия до эксплуатационной пригодности.

Цель системного анализа заключается в выявлении ключевых точек влияния на эффективность мелкосерийного производства АП, а задача – в построении модели исследуемого объекта и анализе поведения системы [4, 5].

Система была декомпозирована на пять функциональных подсистем, образующих последовательный технологический цикл (рис. 1). Каждая подсистема выполняет специализированную функцию, имеет четко определенные входы и выходы, а также взаимодействует с соседними подсистемами через информационные, материальные и управляющие связи.

Подсистема «Проектирование трехмерного цифрового чертежа».

Входные данные: реальный физический объект или его двумерное представление в виде технического чертежа, эскиза, рисунка; техническое задание, содержащее габаритные размеры, конструктивные особенности и функциональные требования к изделию.

Выходные данные: файл с описанием трехмерного цифрового чертежа (ТЦЧ) – трехмерное информационное описание формы изделия в формате, пригодном для дальнейшей обработки.

Функцией подсистемы является преобразование аналоговой или графической информации в технологически адаптированную цифровую модель, пригодную для машинного исполнения. Подсистема служит интерфейсом между физическим миром и цифровым производственным циклом, обеспечивая переход от концепции к технологически пригодной модели.

При проектировании ТЦЧ для печати в специализированных системах автоматизированного проектирования), например, КОМПАС 3D или Blender, специалист должен учитывать все требования [6], указанные в техническом задании, которое содержит особенности технологии печати и программы, в которую будет загружен результат выполнения задачи.

В процессе создания ТЦЧ используется следующее понятие: полигональная сетка (топология) – поверхность, которая обычно состоит из множества полигонов (граней), соединенных общими ребрами. Она представляет собой набор вершин, ребер и граней, которые определяют форму многогранного объекта в трехмерной компьютерной графике [7].

Требования к полигональной сетке при проектировании и создании ТЦЧ для печати FDM включают: отсутствие пересекающихся граней и ребер; представление полигональной сетки в виде одного единственного цельного твердотельного объекта; замкнутость и целостность полигональной сетки; ограничение количества полигонов в соответствии с возможностями ПО для последующей обработки; минимальная толщина стенок и деталей не менее минимального порога, определяемого диаметром сопла принтера и заданного в техническом задании; соответствие габаритов модели рабочей зоне принтера; при превышении – декомпозиция на сборные части.

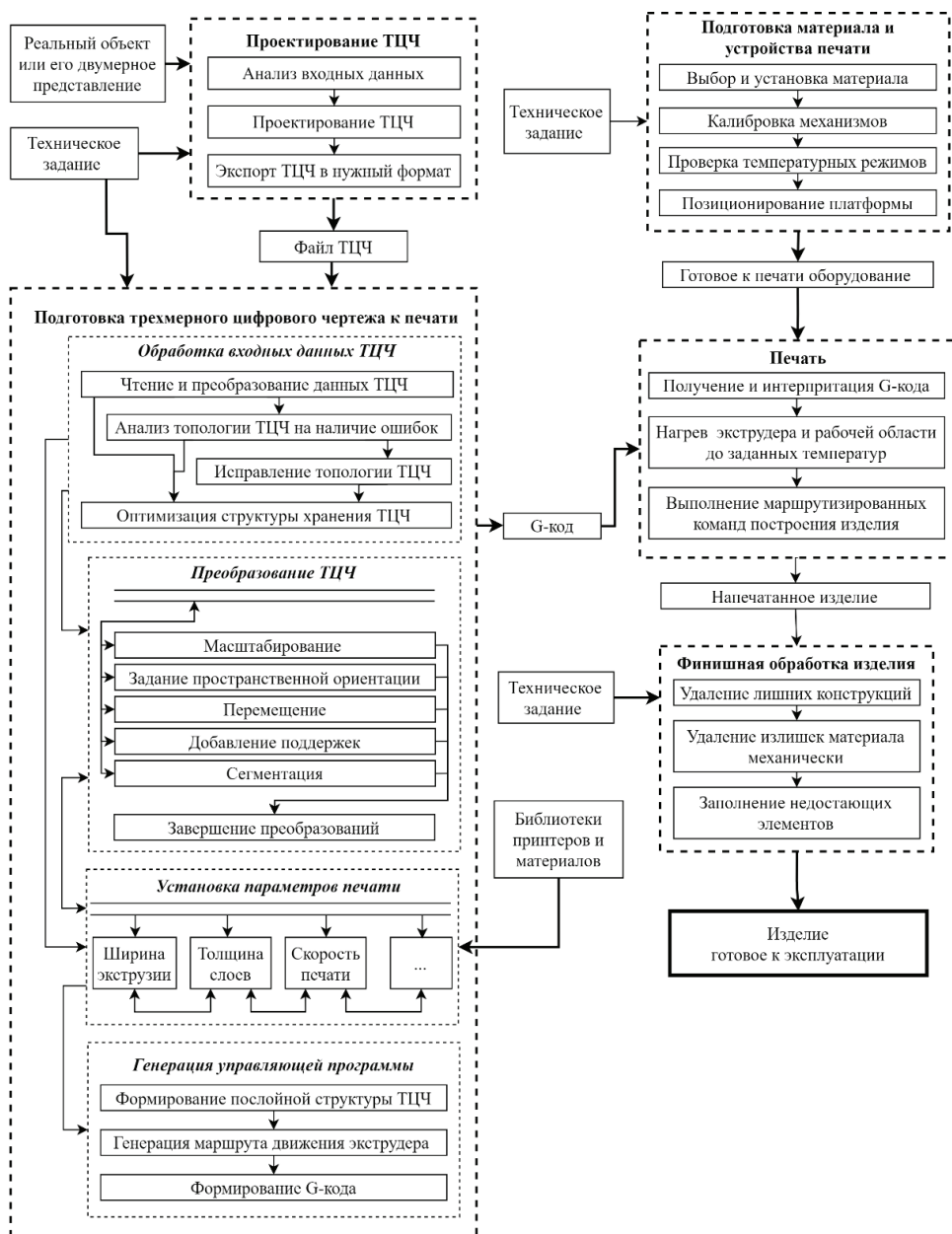


Рис. 1. Схема взаимодействия подсистем системы АП

При их несоблюдении изделие может оказаться бракованным или не напечататься вовсе.

После проверки всех требований к ТЦЧ проводится преобразование CAD-модели в формат, совместимый с процессом аддитивного производства (чаще всего STL (*англ.* Standard Tessellation Language или Standard Triangulation Language), с контролем качества тесселяции (аппроксимации поверхности треугольниками).

Формат STL – стандарт, широко используемый для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях быстрого прототипирования, обычно, методом стереолитографии [8, 9]. STL-формат описывает трехмерные

поверхности объекта, используя сетку взаимосвязанных треугольников (полигонов), заданных координатами вершин и вектором нормали.

Точность печати зависит от точности аппроксимации криволинейных ребер и линий очертания ТЦЧ отрезками прямых линий, а криволинейных поверхностей – треугольниками. Основной проблемой является некорректное представление геометрии изделия в формате STL. Согласно проведенному исследованию, наиболее типичными ошибками являются вырождение ячеек при совпадении двух и более вершин треугольника, образование пересекающихся треугольников, незамкнутость контура, вырождение ячеек при наличии коллинеарных ребер описываемого треугольника [8]. Данные ошибки приводят к невозможности корректного расчета траекторий печатающей головки и формированию дефектов в готовом изделии.

Управляющие воздействия на данном этапе включают выбор методов моделирования, точность аппроксимации поверхностей, а также учет технологических ограничений последующих этапов производства.

Подсистема «Подготовка трехмерного цифрового чертежа к печати».

Входные данные: файл с описанием ТЦЧ, например, в формате STL, техническое задание. Выходные данные: управляющий G-код, пригодный для интерпретации устройством печати.

Функция подсистемы заключается в преобразовании геометрической модели в последовательность команд управления движением экструдера и терморегуляторов с учетом технологических ограничений (времени печати, объема материала и требований к геометрической точности).

Подсистема выполняет функции импорта и проверки геометрии ТЦЧ, его преобразования, задания параметров печати, генерации управляющей программы экструдера и экспорта данных в машинный G-код – условное наименование языка программирования устройств с числовым программным управлением [10].

Программное обеспечение, выполняющее эти функции, называется слайсером (*англ.* Slicer) – компьютерная программа, которая преобразует виртуальную трехмерную модель объекта в машинный код для управления печатью. Наиболее популярные программы: Simplify3D, Cura, 3DPrinterOS, Craftware, Slic3r и др. [11]. Выбор программы может зависеть как от устройства печати (программа поставляется с ним), так и от необходимого для решения задачи функционала.

Подсистема «Подготовка ТЦЧ к печати» является сложной по своей функциональной структуре. В целях углубленного системного анализа она была декомпозирована на следующие функциональные компоненты.

Первый компонент – обработка входных данных ТЦЧ. Вход: STL-файл или аналогичное представление модели. Выход: ТЦЧ во внутреннем представлении программного продукта. Функция: импорт цифровой модели и проверка ее геометрической корректности. Операции включают чтение данных ТЦЧ из файла и преобразование их во внутренний формат слайсера, анализ топологии на наличие ошибок, автоматическое или ручное исправление дефектов с использованием инструментов слайсера или специализированного ПО (например, MeshLab, Netfabb), оптимизация структуры хранения ТЦЧ во внутреннем представлении (при необходимости).

Различные слайсеры по-разному интерпретируют один и тот же STL-файл, особенно если он содержит ошибки. Это приводит к непредсказуемости результатов: ТЦЧ, корректно напечатанный в одном программном продукте, может вызвать сбой или дать грубые дефекты в другом [12, 13].

Вторым компонентом является преобразование ТЦЧ. Входные данные: данные ТЦЧ во внутреннем представлении слайсера. Выходные данные: измененные данные ТЦЧ. Функция: преобразование геометрии ТЦЧ для достижения требований к печати.

К операциям преобразования относятся следующие:

- задание пространственной ориентации (выбор угла поворота по осям);
- масштабирование до требуемых размеров;
- перемещение в пределах рабочей зоны принтера;
- добавление поддерживающих структур (поддержек, опорных конструкций);
- сегментация крупногабаритных моделей на сборные части при необходимости.

При выборе масштаба и пространственного положения ТЦЧ необходимо соблюдать габаритные ограничения рабочей камеры принтера, поскольку их превышение делает процесс формообразования физически невозможным.

Технология послойного наплавления имеет определенные ограничения по сложности создаваемых геометрических форм. Например, создание нависающих конструкций (таких, как сталактиты) невозможно само по себе ввиду отсутствия необходимой поддержки. Это ограничение компенсируется созданием временных опорных конструкций, удаляемых по завершении печати [14].

Опорные конструкции – это временные структуры, формируемые из печатного материала под нависающими элементами изделия для предотвращения их деформации или обрушения под действием силы тяжести. В технологии FDM поддержки реализуются в виде регулярных или адаптивных решетчатых структур («решетка», «зигзаг», «древовидная»), которые создают опорную поверхность для нависающих слоев.

Поддержки могут быть однослойными (линейными) или объемными, сплошными или с заданной плотностью заполнения (обычно 5 – 20 %). В зависимости от конфигурации модели и настроек слайсера, поддержки могут быть соприкасающимися с поверхностью изделия или отделенными от нее воздушным зазором (в виде «решетки» с интервалом) для облегчения последующего удаления.

Форма поддерживающей структуры в FDM-печати определяется компромиссом между механической устойчивостью, объемом расходуемого материала, качеством контактной поверхности изделия и трудоемкостью постобработки.

Расстановка поддерживающих структур напрямую связана с пространственной ориентацией ТЦЧ [15, 16]. Если угол между нормалью к полигону и вертикалью (осью Z) превышает критическое значение (обычно 30° ... 45°), то такой элемент требует установки поддерживающих конструкций. В зависимости от угла наклона ТЦЧ к рабочей области изменяются области расстановки поддержек. Неправильная пространственная ориентация требует установки поддержек, в результате чего могут возникнуть дефекты на изделии в процессе печати.

Помимо влияния на необходимость и объем поддерживающих конструкций, пространственная ориентация модели напрямую определяет ее высоту по оси Z, что в свою очередь влияет на общее время печати (количество слоев) и на распределение механической нагрузки в процессе формирования изделия. В частности, при увеличении высоты модели возрастает вес верхних слоев, который передается на нижележащие, еще не полностью остывшие слои. Это может привести к их деформации, усадке или смещению, особенно при печати тонкостенных или массивных конструкций. Чем выше изделие и чем больше его масса, тем значительнее воздействие собственного веса на нижние слои, что может негативно сказаться как на геометрической точности, так и на прочностных характеристиках готовой детали.

Третий компонент – это установка параметров печати. Входные данные: данные из библиотек принтеров и материалов, содержащие рекомендуемые настройки печати; техническое и конструкторское задание. Выходные данные: установленные параметры печати во внутреннем представлении слайсера.

Задание параметров печати осуществляется либо автоматически – при выборе оборудования и материала из встроенных библиотек слайсера, либо вручную – на основе технических требований к изделию и опыта оператора.

Наиболее значимыми параметрами, влияющими на геометрическую точность и прочностные характеристики готового изделия, являются:

- ширина экструзии (определяющая плотность и форму линии отложения материала), а также шаблон заполнения для внешних и внутренних поверхностей;
- толщина (высота) слоев, зависит от требуемой точности и технической возможности реализации, например, 0,3 и 0,125 мм [10];
- форма и плотность заполнения (процент объема внутреннего пространства ТЦЧ, заполняемого материалом); скорость печати, которая может задаваться отдельно для различных элементов: периметров, заполнения, поддержек;
- температурные режимы экструдера и рабочего стола;
- дополнительные параметры: количество периметров, скорость охлаждения и др.

Плотность заполнения (или степень заполнения внутреннего объема изделия) – один из ключевых параметров подготовки модели к печати, определяющий не только материалоемкость и время производства, но и физико-механические характеристики готового изделия. Снижение плотности заполнения приводит к уменьшению массы изделия и расхода материала, однако может вызывать ряд технологических дефектов [17, 18]. Показатель заполнения в 15 % и перекрестная структура являются наиболее стабильными для качественной печати без потери прочности, но не для всех возможных форм и требований к изделию.

Четвертым компонентом является *генерация управляющей программы*. Входные данные: данные о ТЦЧ и параметрах печати. Выходные данные: G-код. Генерация управляющей программы экструдера выполняется после окончательного преобразования ТЦЧ и задания параметров печати. При генерации применяется послойная или поверхностная технология. Необходимо проанализировать ТЦЧ на каждом слое. Дискретность слоя зависит от заданной высоты. При анализе слоя требуется найти контур от пересечения секущей плоскости с ТЦЧ [19]. С учетом этого формируемый G-код должен содержать информацию о способах создания слоев, которая, как правило, включает данные о векторных линиях, растровых плашках, путей перемещения и другие управляющие данные [20].

Финальным этапом данного компонента является экспорт данных в машинный код G-код. Он реализует преобразование сформированного в слайсере G-кода в формат, понятный принтеру, на котором должно быть выполнено построение изделия.

Подсистема «Подготовка трехмерного цифрового чертежа к печати» служит ключевым интерфейсом между цифровой моделью и физическим исполнением. Она обеспечивает технологическую адаптацию проекта под конкретное оборудование и материал, тем самым определяя качество, точность и эффективность всего процесса аддитивного производства.

Управляющими воздействиями выступают параметры нарезки (толщина слоя, плотность заполнения), а также пространственная ориентация модели, которая оказывает решающее влияние на все последующие характеристики процесса.

Подсистема «Подготовка материала и устройства печати».

Входные данные: техническое задание. Выходные данные: готовое к печати оборудование.

Подсистема выполняет функцию материально-энергетического интерфейса, обеспечивая соответствие физических условий заданным технологическим параметрам. Является преобразователем управляющего сигнала в состояние готовности оборудования.

Осуществляется выбор полимерного материала и подготовка оборудования: установка нити, калибровка механизмов, проверка температурных режимов и позиционирования платформы [20, 21].

Подсистема выполняет роль интерфейса между цифровым проектом и физическим исполнением, обеспечивая соответствие материально-технической базы заданным технологическим требованиям. Управляющими воздействиями являются выбор материала, его предварительная сушка, калибровка платформы, настройка температурных режимов.

Подсистема «Печать».

Входные данные: управляющий G-код, готовое к печати оборудование. Выходные данные: физический объект – изделие, полученное в результате аддитивного процесса формообразования.

Функцией подсистемы является реализация процесса послойного наращивания объекта на основе управляющих команд. Подсистема «Печать» рассматривается как динамическая система управления движением и тепломассопереносом, где выход зависит от точности исполнения входных команд и стабильности физических условий. Является ядром исполнительной части системы аддитивного производства и включает в себя:

- получение и интерпретацию G-кода устройством печати;
- нагрев экструдера и рабочей области до заданных температур;
- выполнение маршрутизированных команд построения изделия.

Эффективность работы определяется совокупностью факторов: механической точностью принтера, качеством материала, корректностью G-кода и условиями окружающей среды (температурой, влажностью, сквозняками). Процесс полностью автоматизирован и управляется встроенным контроллером принтера. Управляющие воздействия на этом этапе минимальны и сводятся к мониторингу и возможной коррекции в случае возникновения аварийных ситуаций.

Подсистема «Финишная обработка изделия».

Входные данные: напечатанное изделие, техническое задание. Выходные данные: готовое изделие, пригодное к использованию по назначению.

Функцией подсистемы является доводка изделия до требуемого уровня качества, соответствующего эксплуатационным, эстетическим и точностным критериям. Включает снятие изделия с платформы, удаление лишних конструкций (поддержек, подложек, при их наличии), шлифовку или плавление излишков материала, а также заполнение недостающих элементов методом плавления [22, 23].

Основным фактором, определяющим сложность и длительность этого этапа, является объем и сложность поддерживающих конструкций, а также наличие дефектов печати. Подсистема является завершающей в технологической цепочке и обеспечивает соответствие продукта конечной цели системы. В условиях мелкосерийного или индивидуального производства финишная обработка часто выполняется вручную, что делает ее трудоемкой, но критически важной для достижения приемлемого результата. Управляющими воздействиями являются выбор методов и инструментов обработки, квалификация оператора.

Рассмотренная структура системы аддитивного производства отражает иерархическую, последовательную организацию процесса от идеи до готового изделия. Все подсистемы связаны информационными, управляющими и материальными потоками, образуя замкнутый технологический цикл.

Обоснование выбора пространственной ориентации ТЦЧ как управляющего воздействия

На основании проведенного системного анализа можно сделать вывод, что система аддитивного производства методом FDM представляет собой разомкнутую динамическую систему управления, функционирующую по принципу управления по возмущению.

В рамках исследования принимается допущение о том, что влияние внешней среды (температуры, влажности, вибраций) является постоянным и не учитывает-

ся при формировании управляющего воздействия. Это позволяет сосредоточить внимание на внутренних факторах, поддающихся контролю со стороны оператора или автоматизированной системы.

Анализ выделенных подсистем показывает, что наибольшие возможности для управления эффективностью процесса без внедрения дополнительного оборудования сосредоточены на этапе подготовки ТЦЧ к печати. Среди всех управляющих воздействий этого этапа особое место занимает пространственная ориентация ТЦЧ. Это обосновано следующими факторами:

- выбор угла поворота одновременно влияет на время печати, расход материала, качество поверхности, точность размеров и необходимость в поддерживающих конструкциях.

- пространственная ориентация задается пользователем на этапе подготовки и не требует модификации оборудования или материалов.

- изменение ориентации на этапе подготовки не влечет за собой необратимых затрат, что позволяет проводить многократные итерации поиска оптимального решения.

- зависимость характеристик печати от угла поворота может быть описана математическими моделями, что открывает возможности для автоматизации выбора оптимальной конфигурации.

Трехмерный цифровой чертеж в формализованном описании представлен в виде геометрической модели $M = \{\text{Geometry}, \vec{R}\}$, где Geometry – совокупность топологических и метрических характеристик изделия; $\vec{R}$ – вектор пространственной ориентации модели относительно координатных осей платформы построения OX, OY, OZ соответственно.

Согласно ГОСТ 2.052–2006, пространственная ориентация изделия определяется проектировщиком при создании модели и фиксируется в ее данных. В связи с этим было принято решение о принятии пространственной ориентации, заданной пользователем при загрузке модели, как «нулевой». При этом используется декартова система координат, где плоскость XY горизонтальна (платформа построения), а ось Z отвечает за высоту.

Управляющим воздействием в системе аддитивного производства рассматривается изменение вектора пространственной ориентации $\vec{R}$, которое оказывает влияние на выходные характеристики системы без обратной связи в реальном времени. Таким образом, система функционирует по принципу управления по возмущению в разомкнутом контуре.

В качестве критериев эффективности выбраны время печати T , объем затрачиваемого материала V и точность печати K , определяемая как степень соответствия геометрии готового изделия исходному ТЦЧ.

Для обеспечения сопоставимости критериев введены нормализованные величины:

$$\bar{K}(\vec{R}) = \frac{K(\vec{R}) - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}};$$

$$\bar{T}(\vec{R}) = \frac{T(\vec{R}) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}};$$

$$\bar{V}(\vec{R}) = \frac{V(\vec{R}) - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

где $\bar{K}(\vec{R}) \in [0, 1]$ (значение 1 соответствует наивысшей точности); $\bar{T}(\vec{R}), \bar{V}(\vec{R}) \in [0, 1]$ (значение 0 соответствует оптимальному – минимальному – расходу ресурсов).

Задача управления формулируется как поиск вектора $\vec{R}$, минимизирующего нормализованные показатели T, V и максимизирующего нормализованный показатель K . Пусть w_T, w_V, w_K – коэффициенты важности критериев, задаваемые ЛПР, удовлетворяющие условию нормировки

$$w_T + w_V + w_K = 1, w_i \geq 0.$$

Тогда целевая функция управления системой аддитивного производства принимает вид

$$F(R) = w_T \cdot \bar{T}(\vec{R}) + w_V \cdot \bar{V}(\vec{R}) + w_K \cdot (1 - \bar{K}(\vec{R})).$$

Ограничения задачи обусловлены физическими и технологическими пределами системы:

$$\begin{cases} H(\vec{R}) \leq Hpr; \\ W(\vec{R}) \leq Wpr; \\ L(\vec{R}) \leq Lpr; \\ T(\vec{R}) > 0; \\ V(\vec{R}) \geq V_{\text{model}}; \\ K(\vec{R}) \in [K_{\min}, K_{\max}], \end{cases}$$

где $H(R), W(R), L(R)$ – габаритные размеры модели в ориентации R ; Hpr, Wpr, Lpr – предельные размеры рабочей зоны принтера; V_{model} – объем самого изделия без поддержек.

Таким образом, задача оптимального управления формулируется следующим образом.

Найти такое значение вектора $\vec{R}^* = (R_x^*, R_y^*, R_z^*)$, при котором целевая функция $F(\vec{R}^*)$ достигает минимального значения при соблюдении заданных ограничений и учете приоритетов ЛПР, выраженных через весовые коэффициенты: $F(\vec{R}^*) \rightarrow \min$.

Заключение

Проведенный системный анализ позволил декомпозировать процесс аддитивного производства методом FDM на пять функциональных подсистем и классифицировать его как искусственную, открытую, детерминированную и централизованную систему. Выявлено, что ключевым управляющим воздействием, доступным на этапе подготовки модели, является пространственная ориентация ТЦЧ.

Результаты работы позволяют перейти к разработке моделей многокритериальной оптимизации, учитывающих компромисс между временем печати, расходом материала и точностью готового изделия. Предложенный подход обеспечивает обоснованный выбор конфигурации, что актуально для мелкосерийного производства, где каждое изделие может иметь уникальные требования к качеству и экономическим показателям.

Дальнейшие исследования направлены на разработку математических моделей зависимости характеристик печати от угла поворота, а также создание программных средств поддержки принятия решений на основе полученных моделей.

Список литературы

1. Александрович, Д. В. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования / Д. В. Александрович, С. Е. Петрович // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2018. – № 2(26). – С. 16–28.
2. Смирнов, М. А. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки / М. А. Смирнов, Н. О. Рыбкин, О. Л. Ксенофонтова // *Сборник научных трудов вузов России «Проблемы экономики, финансов и управления производством»*. – 2021. – № 48. – С. 115–122.
3. Зайцев, В. Д. Дефекты, сопровождающие технологии быстрого прототипирования, и методы их устранения / В. Д. Зайцев, Н. И. Наумкин, Е. А. Кильмашкин // *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова, Саранск, 24–25 мая, 216 года*. – Саранск, 2016. – С. 417–422.
4. Моделирование системы управления наземной робототехнической платформой для сельского хозяйства / П. В. Балабанов, А. С. Егоров, С. А. Сенкевич [и др.] // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2025. – Т. 31, № 4. – С. 564–576. doi: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.564-576
5. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6–16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016
6. Задорожная, И. Д. Виды моделирования и требования к моделям для 3D-печати / И. Д. Задорожная, И. В. Иванова // *Вестник научных конференций*. – 2018. – № 3-4(31). – С. 46–51.
7. Царькова, Ю. Р. Полигональная сетка в компьютерной графике / Ю. Р. Царькова, О. В. Внукова // *Студенчество России: век XXI : материалы VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Орел, 03 июня, 2020 г.* – Орел, 2020. – Ч. 2. – С. 394–398.
8. Абдурайимов, Л. Н. Особенности работы с 3D-моделями изделий в формате STL-файлов на программном уровне / Л. Н. Абдурайимов, Р. А. Бекиров // *Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере*. – 2017. – № 2. – С. 18–28.
9. Тлеубаев, И. С. Аналитический обзор алгоритмов совмещения данных трехмерного сканирования / И. С. Тлеубаев // *Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIV Международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 7–11 ноября 2016 г.* – Томск, 2016. – Т. 2. – С. 231–232.
10. Ракитин, С. Ю. Формирование послойных контуров 3D-моделей для аддитивного производства / С. Ю. Ракитин, А. А. Илькубаев // *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции, Оренбург, 03–05 февраля 2016*. – Оренбург, 2016. – С. 223–230.
11. Лисяк, В. В. Обзор слайсеров для 3D-печати / В. В. Лисяк // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2022. – № 3(227). – С. 60–74. doi: 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74
12. Скорая помощь для 3D-моделей: 10 основных функций лечения STL-файлов. – Текст электронный. – URL : <https://3dtoday.ru/blogs/iqbtech-ru/skoraya-pomoshh-dlya-3d-modelei-10-osnovnykh-funkcii-lecheniya-stl-failov> (дата обращения: 01.02.2026).

13. Зубрилин, А. В. Предпечатная подготовка 3D-моделей с использованием специализированного программного обеспечения / А. В. Зубрилин, М. В. Тагильцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 88–96.
14. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати : учебное пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург : Изд-во УГЛТУ, 2017. – 100 с.
15. Xie, Y. Support-free interior carving for 3D printing / Y. Xie, X. Chen // Visual Informatics. – 2017. – Vol. 1, No. 1. – P. 9–15. doi: 10.1016/j.visinf.2017.01.002
16. Dominguez, G. A. Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A Methodological Approach / A. G. Dominguez, J. C. Gil, M. A. Sebastián // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 9. – P. 1993. doi: 10.3390/polym12091993
17. Васильевич, С. В. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий / С. В. Васильевич, Г. А. Николаевич, Б. Д. Иванович // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018. – № 2(35). – С. 52–61.
18. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing / J. Huang, Q. Chen, H. Jiang, B. Zou, L. Li, J. Liu, H. Yu // Virtual and Physical Prototyping. – 2020. – Vol. 15, No. 2. – P. 148–162. doi: 10.1080/17452759.2019.1708027
19. Горелов, А. О. Математический аппарат анализа моделей для 3D-печати / А. О. Горелов // Научное приборостроение. – 2022. – Т. 32, № 3. – С. 104–116. doi: 10.18358/np-32-3-i104116
20. Михеенко, Д. Ю. Расходные материалы для 3D печати методом послойного наплавления (FDM/FFF) / Д. Ю. Михеенко, В. М. Михеенко // Знание. – 2016. – № 11-1(40). – С. 37–43.
21. Тараховский, А. Ю. Оптимизация выбора материалов для 3D-печати (FDM): влияние теплового расширения и механических свойств / А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей Всеросс. науч.-прак. конференции, Севастополь, 14–18 февраля 2025 г., – Севастополь, 2025. – С. 49–54.
22. The Post-Processing of Additive Manufactured Polymeric and Metallic Parts / D. Syrlybayev, A. Seisekulova, D. Talamona, A. Perveen // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – Vol. 6, No. 5. – P. 116. doi: 10.3390/jmmp6050116
23. Влияние постобработки на физико-механические свойства образцов, полученных методом FDM-печати / И. В. Гнидина, В. М. Волгин, А. П. Малахов, А. А. Потапов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 326–334. doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-326-327

System Analysis of the FDM Additive Manufacturing Process as a Basis for Formulating an Optimal Control Problem

© N. A. Vekhteva ¹✉

¹ *Department of Automated Decision Support Systems, magicanloner@gmail.com;
TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: 3D printing; FDM technology; additive manufacturing; systems analysis.

Abstract: This paper presents a systems analysis of additive manufacturing, which proposes a hierarchical decomposition of the process cycle into five functional subsystems with a formalized description of information, material, and control flows.

It is shown that the system is artificial, open, and deterministic, allowing for the application of control theory methods. It was found that varying the spatial orientation of the model allows for influencing print time, material consumption, and the need for support structures without modifying the equipment. A mathematical formulation of the multi-criteria optimization problem with normalized performance indicators is proposed.

References

1. Aleksandrovich D.V., Petrovich S.E. [Classification of additive technologies and analysis of directions of their economic use], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society], 2018, no. 2(26), pp. 16-28. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Smirnov M.A., Rybkin N.O., Ksenofontova O.L. *Sbornik nauchnykh trudov vuzov Rossii "Problemy ekonomiki, finansov i upravleniya proizvodstvom"* [Collection of Scientific Works of Russian Universities "Problems of Economics, Finance and Production Management"], 2021, no. 48, pp. 115-122. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Zaytsev V.D., Naumkin N.I., Kil'myashkin E.A. *Energoeffektivnyye i resursosberegayushchiye tekhnologii i sistemy* [Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies and Systems], Saransk, 2016, pp. 417-422. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Balabanov P.V., Egorov A.S., Senkevich S.A., Mironov A.D., Bulanov V.O., Bobrov D.A. [Modeling of a control system for a ground robotic platform for agriculture], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 4, pp. 564-576. doi: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.564-576 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sannikov S.A., Mokrozub V.G., Kalistratov M.S. [Systems analysis of the design process for electrochemical and chemical treatment lines for parts], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 6-16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Zadorozhnaya I.D., Ivanova I.V. [Types of modeling and requirements for 3D printing models], *Vestnik nauchnykh konferentsiy* [Bulletin of Scientific Conferences], 2018, no. 3-4 (31), pp. 46-51. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Tsar'kova Yu.R., Vnukova O.V. *Studenchestvo Rossii: vek XXI* [Students of Russia: Century XXI], Orel, 2020, pp. 394-398. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Abdurayimov L.N., Bekirov R.A. [Features of working with 3D product models in STL file format at the software level], *Informatsionno-komp'yuternyye tekhnologii v ekonomike, obrazovanii i sotsial'noy sfere* [Information and Computer Technologies in Economics, Education and Social Sphere], 2017, no. 2, pp. 18-28. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Tleubaev I.S. *Molodezh' i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XIV Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Youth and Modern Information Technologies: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, November 7-11, 2016, Tomsk], vol. 2, Tomsk, 2016, pp. 231-232 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Rakitin S.Yu., Il'kubaev A.A. *Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury : materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of the All-Russian scientific and methodological conference, Orenburg, February 3-5, 2016], Orenburg, 2016, pp. 223-230 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Lisyak V.V. [Review of slicers for 3D printing], *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Southern Federal University. Technical Sciences], 2022, no. 3(227), pp. 60-74. doi: 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74 (In Russ., abstract in Eng.)

12. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/iqbtech-ru/skoraya-pomoshh-dlya-3d-modelei-10-osnovnyx-funkcii-leceniya-stl-failov> (accessed 1 February 2026).
13. Zubrilin A.V., Tagiltsev M.V. P [Pre-print preparation of 3D models using specialized software], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2017, no. 9-1, pp. 88-96. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Shkuro A.E., Krivonogov P.S. *Tekhnologii i materialy 3D-pechati: uchebnoye posobiye* [Technologies and materials of 3D printing: textbook], Yekaterinburg: UGLTU, 2017, 100 p. (In Russ.)
15. Xie Y., Chen X. Support-free interior carving for 3D printing, *Visual Informatics*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 9-15. doi: 10.1016/j.visinf.2017.01.002
16. Dominguez A.G., Gil J.C., Sebastián M.A. Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A Methodological Approach, *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 1993. doi: 10.3390/polym12091993
17. Vasil'evich S.V., Nikolaevich G.A., Ivanovich B.D. [Study of the influence of 3D printing parameters on the dimensional accuracy of products], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Vitebsk State Technological University], 2018, no. 2 (35), pp. 52-61. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Huang J., Chen Q., Jiang H., Zou B., Li L., Liu J., Yu H. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing, *Virtual and Physical Prototyping*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 148-162. doi: 10.1080/17452759.2019.1708027
19. Gorelov A.O. [Mathematical apparatus for analyzing models for 3D printing], *Nauchnoye priborostroyeniye* [Scientific Instrumentation], 2022, vol. 32, no. 3, pp. 104-116. doi: 10.18358/np-32-3-i104116 (In Russ., abstract in Eng.)
20. Mikheenko D.Yu., Mikheenko V.M. [Consumables for 3D printing by fused deposition modeling (FDM/FFF)], *Znanie* [Knowledge], 2016, no. 11-1 (40), pp. 37-43. (In Russ., abstract in Eng.)
21. Tarakhovskiy A.Yu. *Perspektivnyye tekhnologii revers-inzhiniringa i bystrogo prototipirovaniya: sbornik statey Vseross. nauch.-prak. konferentsii* [Promising technologies of reverse engineering and rapid prototyping: collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference], Sevastopol, February 14-18, 2025, Sevastopol, 2025, pp. 49-54. (In Russ., abstract in Eng.)
22. Syrlybayev D., Seisekulova A., Talamona D., Perveen A. The post-processing of additive manufactured polymeric and metallic parts, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, vol. 6, no. 5, pp. 116. doi: 10.3390/jmmp6050116
23. Gnidina I.V., Volgin V.M., Malakho A.P., Potapov A.A. [Influence of post-processing on physico-mechanical properties of samples obtained by FDM printing], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2023, no. 9, pp. 326-334. doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-326-327 (In Russ., abstract in Eng.)

Systemanalyse des additiven FDM-Fertigungsprozesses als Grundlage für die Formulierung eines optimalen Steuerungsproblems

Zusammenfassung: Es ist eine Systemanalyse der additiven Fertigung vorgestellt, die zu einer vorgeschlagenen hierarchischen Zerlegung des Prozesszyklus in fünf funktionale Teilsysteme mit einer formalisierten Beschreibung der Informations-, Material- und Kontrollflüsse führt. Das System erweist sich als künstlich, offen und deterministisch und ermöglicht somit die Anwendung von Methoden der Regelungstechnik. Es ist gezeigt, dass die Variation der räumlichen Ausrichtung des

Modells die Druckzeit, den Materialverbrauch und den Bedarf an Stützstrukturen beeinflusst, ohne die Ausrüstung zu modifizieren. Es ist eine mathematische Formulierung des multikriteriellen Optimierungsproblems mit normierten Leistungsindikatoren vorgeschlagen.

Analyse systémique du processus de la fabrication additive par la méthode fdm comme base pour l'énoncé du problème de la commande optimal

Résumé: Est présentée une analyse systémique de la production additive, il en résulte une décomposition hiérarchique du cycle technologique en cinq sous-systèmes fonctionnels avec une description formalisée des flux d'information, de matériel et de contrôle. Il est démontré que le système est artificiel, ouvert et déterministe, ce qui permet l'application des méthodes de la théorie du contrôle. Il est établi que la variation de l'orientation spatiale du modèle permet d'influer sur le temps de l'impression, la répartition du matériau et le besoin des structures du support sans la modification de l'équipement. Est proposée une définition mathématique du problème de l'optimisation multi-critères avec des indicateurs de performance normalisés.

Автор: *Вехтева Надежда Андреевна* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; младший научный сотрудник НИЛ «Лаборатория медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» управления фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.