

**И. А. Горобец**, канд. техн. наук, доц., **Д. О. Киселица**, магистрант,  
**Д. С. Жарких**, магистрант  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР РФ  
E-mail:igor.gorobets2022@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ 3D-ПРИНТЕРА ПОВЫШЕННОГО ОБЪЕМА ПЕЧАТИ

*Предложена структурная и кинематическая схемы 3D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа. Синтезирована 3D-модель модернизированного принтера. Исследованы параметры объема печати принтера до и после модернизации. Доказано увеличение на 136% объема печати на модернизированной конструкции принтера. Исследованы динамические характеристики модернизированного устройства. Приведен анализ динамических характеристик конструкции принтера. Предложенные схемы и разработанная конструкция устройства повысит эффективность эксплуатации 3D-принтеров.*

*Ключевые слова:* объем, печать, принтер, структура, компоновка, динамика, эффективность.

**I. Gorobets, D. Kiselitsa, D. Zharkikh**

### RESEARCH AND DESIGN OF 3D PRINTER STRUCTURE OF INCREASED PRINTING VOLUME

*A structural and kinematic scheme of a 3D printer with additional excess degrees of freedom of the working body is proposed. Synthesized 3D model of the upgraded printer. The values of the printer print volume before and after the upgrade have been studied. Proven 136% increase in print volume with a redesigned printer design. The dynamic characteristics of the upgraded device are investigated. An analysis of the dynamic characteristics of the printer design is given. The proposed schemes and the developed device design will increase the efficiency of 3D printer operation.*

*Keywords:* volume, printing, printer, structure, layout, dynamics, efficiency

### 1. Введение

Дальнейшее совершенствование промышленного производства изделий машиностроения привело к появлению и реализации аддитивных технологий (от англ. Additive Fabrication), суть которых состоит в послойном увеличении размеров объекта производства, вплоть до получения окончательных габаритов и необходимого качества поверхности изделия [1,2,3]. В настоящее время существует много разновидностей аддитивных технологий, к которым можно отнести: SLM (Selective Laser Melting – селективное лазерное плавление металлического порошка), SLA (Laser Stereolithography – послойное затвердевание жидкого материала под воздействием лазера), SLS (Selective Laser Sintering – послойное лазерное спекание порошковых материалов), FDM (Fused Deposition Modeling – послойное наплавление пластиковой нити), LCD (Liquid Crystal Display – послойная фотополимерная печать с засветкой светодиодной ультрафиолетовой матрицей) и другие [1,2,3].

Перечисленные технологии обладают рядом достоинств и недостатков. К недостаткам можно отнести недостаточную прочность и качество (точность, шероховатость, твердость) поверхностного слоя металлических изделий, в сравнении с классическими технологиями (subtractive manufacturing technologies, т.е. технологии вычитания материала, когда методами резания получают деталь, размеры которой меньше размеров заготовки) получения изделия машиностроения. Среди важных достоинств аддитивных технологий, дающих преимущество в сравнении с классическими, является низкая себестоимость производства изделия, минимальная производственная площадь и техниче-

ский персонал, невысокая стоимость технологического оборудования. Особенностью аддитивных технологий является их исключительная работа с предварительно спроектированной в САПР 3D-моделью изделия.

Интерес представляет наиболее применяемая в настоящее время FDM-технология печати изделия из нити – гибкого филамента. В качестве материала печати используются нити, обладающие самыми различными механическими характеристиками (ударопрочность, износостойкость, термоустойчивость, ударная вязкость, гибкость, прочность, стойкость на растяжение и изгиб, долговечность): PLA, ABS, PETG, TPU, нейлон, PC и др. [1,2,3,4].

Конструктивные варианты исполнения устройств 3D-печати можно свести к нескольким типам, реализующим картезианский или полярный принцип печати (в зависимости от движения экструдера) и принцип, использующий параллельные структуры (Delta – принтер), рис. 1. Однако, по нашим исследованиям, недостатком известных конструкций является ограниченный объём печати в сравнении с объёмом технологического устройства. Это связано с тем, что объём фигуры, вписанной в пространство между стойками принтера, достигаемый рабочим органом, всегда меньше объёма фигуры, заключённой по сторонам стоек устройства. Причём, такое уменьшение рабочего объёма в принтере может достигать величины 40%.



Рисунок 1. Вид 3D-принтеров, реализующих работу в декартовой, полярной системах координат и на основе параллельных структур, соответственно

В связи с перечисленными конструктивными и эксплуатационными особенностями устройств реализации аддитивных технологий, актуальным является вопрос увеличения объёма производимого изделия машиностроения на 3D-принтерах FDM-технологий.

**Целью исследований** является повышение объёма 3D-печати, путём синтеза структурной схемы принтера с избыточной степенью свободы рабочего органа.

## 2. Основное содержание и результаты

В качестве объекта моделирования использовался 3D-принтер параллельной структуры, обладающий рядом преимуществ по скорости и точности печати [5,6]. Для синтеза конструкции принтера использовались исследования авторов по анализу из-

вестных структур конструкции устройства [7], на основе чего была принята структурная схема в виде Триглайда. Для выполнения поставленной цели авторами было предложено дополнить конструкцию устройства 3D-печати избыточной степенью свободы рабочего органа путём введения дополнительного звена в виде диска 8 с рабочим органом 9, установленного на подвижной платформе 4 с возможностью поворота относительно вертикальной оси платформы, рис. 2. Причём, рабочий орган 9 принтера располагается на поворотном диске 8 с эксцентриситетом относительно вертикальной оси платформы 4, рис. 2. Такое расположение рабочего органа 9 и дополнительная степень подвижности в виде поворота диска 8 относительно вертикальной оси подвижной платформы 4 позволит увеличить максимальный объём печати 3D-принтера.

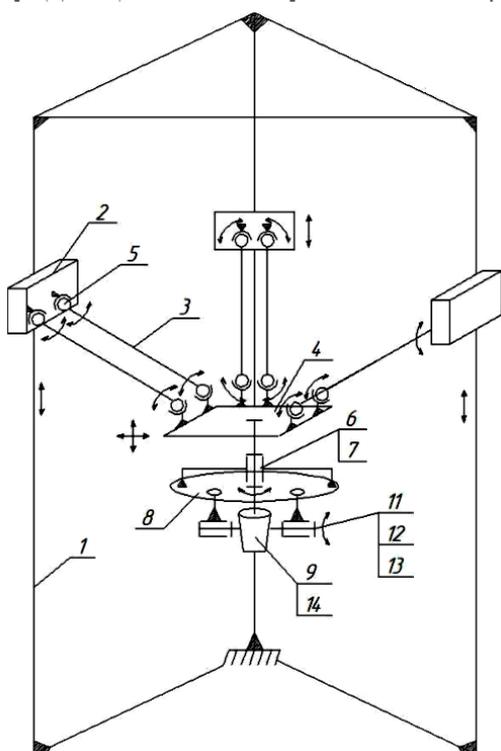


Рисунок 2. Структурная схема принтера с улучшенными параметрами объёма печати

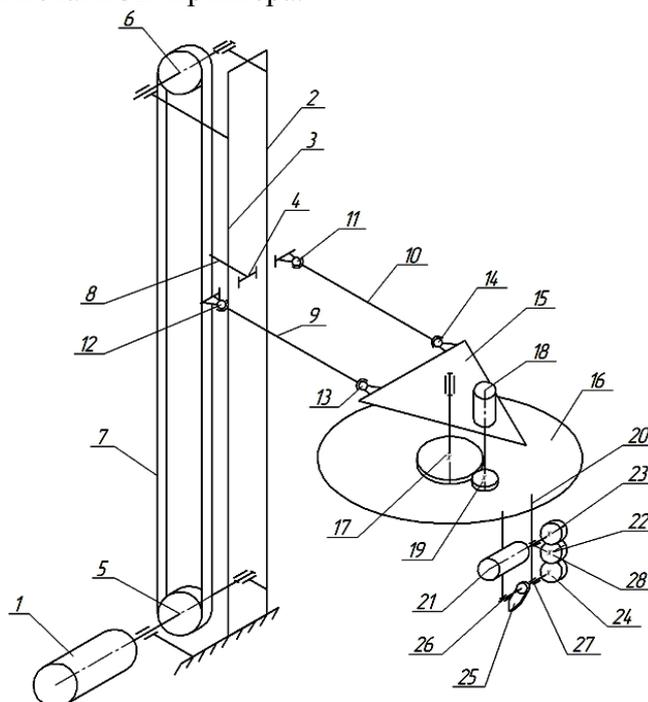


Рисунок 3. Фрагмент кинематической схемы принтера

Для проведения дальнейших исследований была разработана кинематическая схема принтера, рис. 3, состоящая из электродвигателя 1, вертикальных направляющих 2 и 3, каретки 4, шкивов 5 и 6, ремня 7, элемента соединения 8 с кареткой 4, штанг 9 и 10 с шаровыми опорами 11-14, подвижной платформы 15, поворотного диска 16, зубчатого колеса 17, электродвигателя 18 с шестерней 19, п-образной рамы 20, электродвигателя 21, шестерни 22, зубчатых колёс 23 и 24, экструдера 25, опор 26 и 27 экструдера, вала 28.

При проведении теоретических исследований в качестве исходных данных использовались следующие положения:

- Конструкция принтера состоит из трёх идентичных вертикальных направляющих, жёстко закреплённых к основанию. По направляющим перемещаются ползуны, попарно связанные штангами с платформой.

- Ползуны перемещаются по направляющим без трения.
- Вертикальные направляющие принтера образуют равносторонний треугольник. Расстояние между любыми вертикальными направляющими равно 695 мм.
- Штанги закреплены к ползуну и платформе с возможностью поворота. Поворот штанг относительно ползуна и платформы осуществляется без трения.
- Все три пары штанг имеют одинаковую длину, равную 480 мм.

Реализация синтеза и последующего 3D-моделирования работы устройства потребовало проведение выбора материала и габаритов деталей, расчётов прочности основных узлов принтера, которые были проведены в САЕ приложении FEM SolidWorks, рис. 4.

В качестве движителя элементов принтера был принят электрический привод в виде шаговых двигателей. Для выбора механических характеристик электрических двигателей привода была разработана расчётная схема, рис. 5 и определены параметры крутящего момента и мощности электродвигателей

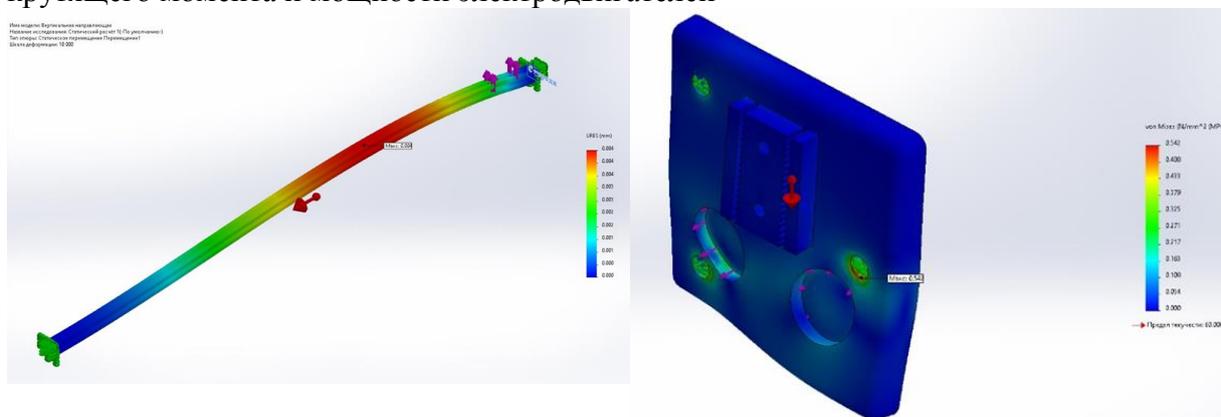


Рисунок 4. Результаты моделирования упруго-напряженного состояния элементов принтера

По результатам расчёта механических характеристик в качестве привода движущихся кареток 3D-принтера приняты шаговые двигатели модели Nema 17 17HS3430, рис.6.

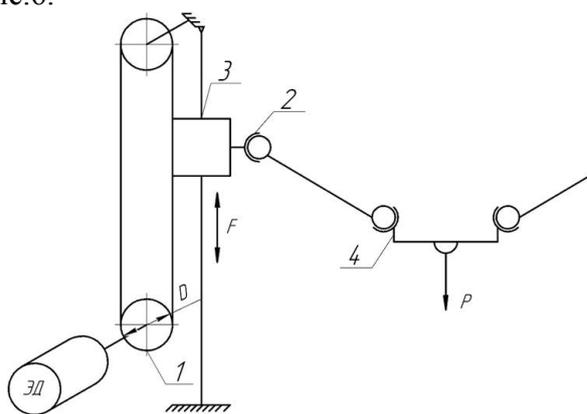


Рисунок 5. Расчётная схема для определения параметров привода принтера  
1 – шкив; 2 – штанга с опорой; 3 – каретка;  
4 – подвижная платформа.

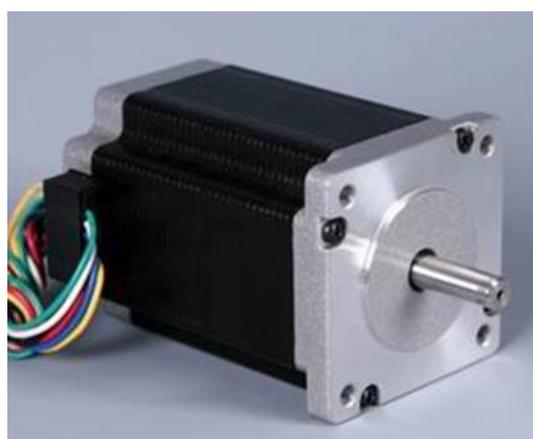


Рисунок 6. Вид шагового электрического двигателя модели Nema 17

В результате выбора геометрических параметров деталей и узлов принтера построена 3D-модель, позволяющая провести теоретические исследования и определить максимальный объем печати изделий на устройстве до и после его модернизации путём добавления избыточной степени свободы рабочего органа. Анализ результатов объёмных графических исследований 3D-печати принтеров, рис. 7, даёт основание утверждать, что добавление избыточной степени свободы рабочего органа для принятых исходных данных, позволит увеличить объем печати на 136% (с  $0,0452 \text{ м}^3$  до  $0,107 \text{ м}^3$ ).

Внесение дополнительных конструктивных изменений для реализации избыточной степени свободы рабочего органа безусловно отразятся и на динамических характеристиках 3D-принтера. Для изучения такого влияния были проведены теоретические исследования динамических характеристик механической конструкции устройства в модуле АРМ FEM CAD системы КОМПАС-3D, рис. 8. По результатам моделирования определены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) конструкции принтера, рис. 9 и гармоника частот собственных колебаний изделия. Исходя из графика АЧХ (см. рис. 9) следует, что наибольшие амплитуды колебаний наблюдаются у низкочастотных гармоник (частота колебаний порядка 10,9 Гц), однако, присутствует и высокочастотная гармоника с частотой, равной 178,3 Гц.

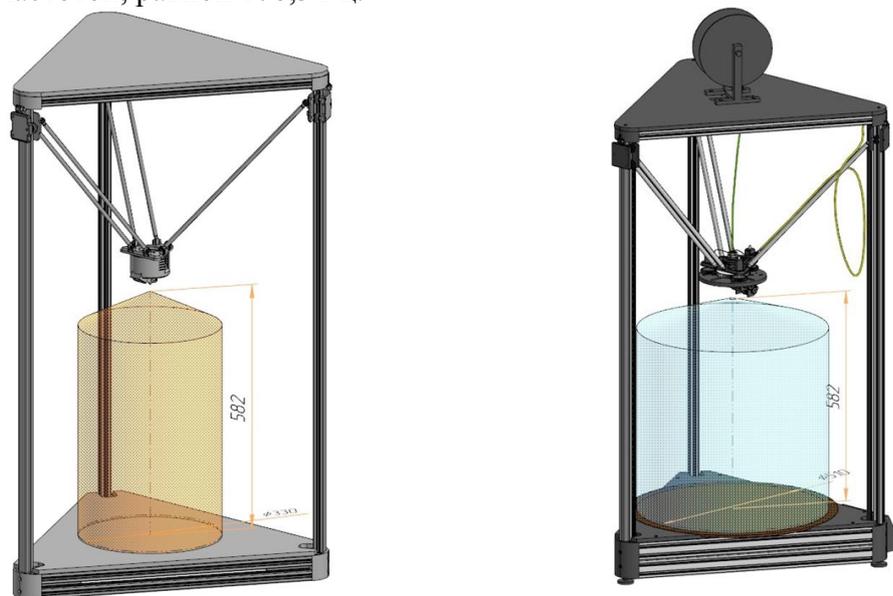


Рисунок 7. 3D-модель рабочей зоны принтера до и после модернизации, соответственно

Результаты моделирования динамических параметров механической системы модернизированной конструкции принтера позволят учесть при программировании работы рабочего органа принтера параметры скорости, ускорений и подачи филамента, которые бы исключали возможное вхождение устройства в предрезонансную фазу работы, вызывающую многократное увеличение амплитуды колебаний рабочего органа принтера.

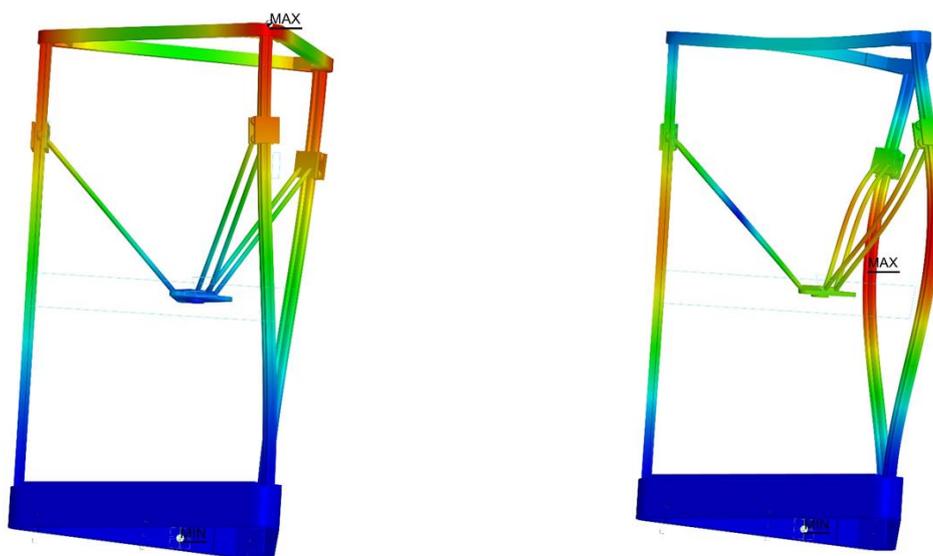


Рисунок 8. Результаты моделирования динамических параметров принтера

### 3. Заключение

Разработана структурная и кинематическая схемы 3D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа. Рассчитаны геометрические параметры деталей и узлов, синтезирована 3D-модель модернизированного принтера. Исследованы параметры объёма печати принтера до и после модернизации, путём добавления избыточной степени свободы рабочего органа. Доказано увеличение на 136% объёма печати на модернизированной конструкции принтера по сравнению с базовой конструкцией.

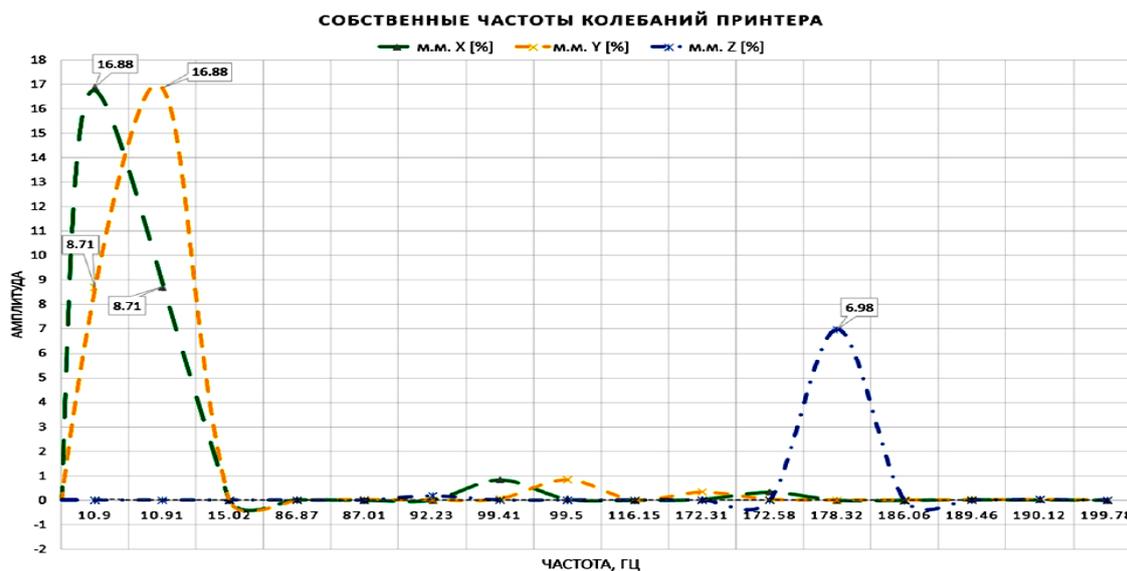


Рисунок 9. Амплитудно-частотная характеристика конструкции 3D-принтера

Исследованы динамические характеристики модернизированного устройства. Анализ динамических характеристик разработанной конструкции принтера показал наличие низкочастотных (10,8 Гц) и высокочастотных (178,3 Гц) гармоник спектра частот соб-

ственных колебаний устройства, с преимуществом (более 2,4 раз) амплитуды по низкой частоте.

Предложенные структурная, кинематическая схемы и разработанная конструкция устройства могут использоваться на стадии проектирования новых и модернизации существующих конструкций промышленных 3D-принтеров, что повысит объем печати и эффективность эксплуатации устройств реализации аддитивных технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с..

2. Louvis, E. Selective laser melting of aluminum components [Текст] / E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – p. 275-284.

3. Ding, D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests [Текст] / D. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2015. – Vol. 81. – p. 465-481.

4. Горобец, И. А. Обзор исследований прочности изделий полученных с использованием fdm - технологий / И. А. Горобец, Н. В. Голубов, Д. А. Пикалов /Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 81-85.

5. Kong, X. Type Synthesis of Parallel Mechanisms / X. Kong, C. Gosselin. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 272 p.

6. Хейло, С. В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ: монография / С. В. Хейло, В. А. Глазунов, С. В. Палочкин – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. – 153с.

7. Горобец, И. А. Исследование структурных схем конструкций 3D-принтера / И.А. Горобец, А. М. Лахин, Д. О. Киселица, Д. С. Жарких / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – С. 80-83.

Поступила в редколлегию 12.03.2023 г