

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

## СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ ЭКСТРУДЕРА 5D-ПРИНТЕРА

*Предложена структурная схема 5D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа. Разработаны расчётные схемы и математические модели для определения характеристик привода платформы принтера. Синтезирована 3D-модель конструкции модуля экструдера повышенной функциональности для реализации 5D-печати. Предложенные схемы и разработанная конструкция устройства повысит эффективность эксплуатации 3D-принтеров.*

**Ключевые слова:** принтер, схема, компоновка, привод, параметр, эффективность.

**I. A. Gorobets, D. O. Kiselitsa, D. S. Zharkikh**

### SYNTHESIS OF 5D PRINTER EXTRUDER MODULE DESIGN

*A block diagram of a 5D printer with additional redundant degrees of freedom of the working body is proposed. Calculation schemes and mathematical models for determining the characteristics of the printer platform drive have been developed. A 3D model of an extruder module with increased functionality has been synthesized for the implementation of 5D printing. The proposed circuits and the developed design of the device will increase the operating efficiency of 3D printers.*

**Keywords:** printer, scheme, layout, drive, parameter, efficiency

#### 1. Введение

Дальнейшее совершенствование машиностроения связано с реализацией принципов аддитивных технологий (от англ. *Additive Fabrication*), состоящих в послойном увеличении размеров объекта производства [1, 2]. В настоящее время активно используется FDM технология (*Fused Deposition Modeling* – послойное наплавление пластиковой нити), наряду с другими технологиями [1, 2]. Важным достоинством аддитивных технологий, дающих преимущество в сравнении с классическими, является низкая себестоимость изготовления изделия, минимальная производственная площадь и технический персонал, невысокая стоимость технологического оборудования.

Исходными данными для реализации аддитивных технологий является 3D-модель создаваемого объекта, а материалом печати для FDM-технологий – гибкая нить, обладающая соответствующими характеристиками: прочностью, ударной вязкостью, гибкостью, износостойкостью, термоустойчивостью, долговечностью [1, 3]. Технологический процесс получения готового изделия осуществляется в устройстве 3D-печати – принтере, принцип действия которого может быть реализован различными типами движением экструдера (рабочего органа): картезианским, полярным, параллельных структур (Delta) [4, 5], 5-осевым, (рисунок 1, 2).

Однако, недостатком известных конструкций является ограничения объёма печати в рамках конструкции технологического устройства [2] и технологии 3D-печати, которые возможно реализовать в рамках плоскопараллельного послойного нанесения, расплавленного филамента.

В связи с перечисленными конструктивными и эксплуатационными особенностями устройств реализации аддитивных FDM технологий, актуальным является вопрос увеличения объёма объекта печати и расширения технологических возможностей 3D-принтеров с учётом преимуществ 5-осевой печати.

**Целью исследований** является повышение функциональных возможностей модуля экструдера 3D-печати, для реализации увеличения объёма и новых технологий печати, путём ввода в схему конструкции принтера дополнительных степеней подвижности рабочего органа.



Рисунок 1. Вид 5-осевого 3D-принтера с подвижным в 3-х направлениях основанием

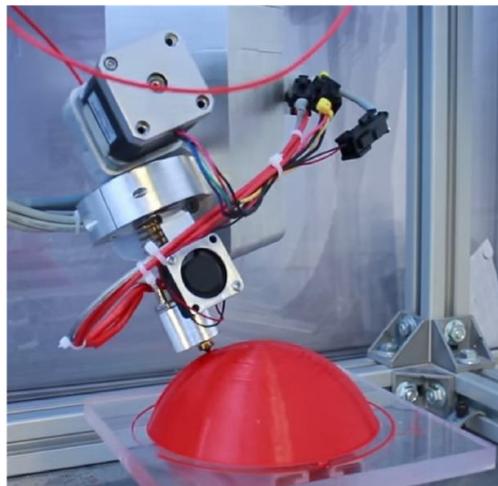


Рисунок 2. Вид 5-осевого 3D-принтера с подвижным экструдером

## 2. Основное содержание и результаты

В качестве основы для проектирования использовался 3D-принтер параллельной структуры, обладающий рядом преимуществ по скорости и точности печати [4, 5]. Для синтеза конструкции принтера использовались исследования авторов по анализу известных структур конструкции устройства [6], на основе чего была принята структурная схема в виде Триглайда. Для выполнения поставленной цели авторами было предложено дополнить конструкцию устройства 3D-печати [2] двумя дополнительными степенями подвижности экструдера, за счёт введения дополнительного звена в виде диска 8 с рабочим органом 9, установленного на подвижной платформе 4 с возможностью поворота относительно вертикальной оси платформы, рисунок 3.

Причём, экструдер 9 принтера располагается на поворотном диске 8 с эксцентриситетом относительно вертикальной оси платформы 4, рисунок 3. Такое изменение структуры принтера позволило увеличить максимальный объем печати. Основные параметры для моделирования и синтеза конструкции 5D-принтера, а также исходные данные и допущения приведены в работе [2]. В результате выбора геометрических параметров деталей и узлов принтера разработана 3D-модель, позволяющая провести теоретические исследования, рисунок 3.

Для реализации 5-осевой конструкции принтера была спроектирована специальная платформа, снабжённая поворотным диском, на котором установлен экструдер. Для определения параметров механических характеристик электродвигателя разработана расчётная схема, рисунок 4, в состав которой входят: электродвигатель, приводное зубчатое колесо, вал-шестерня.

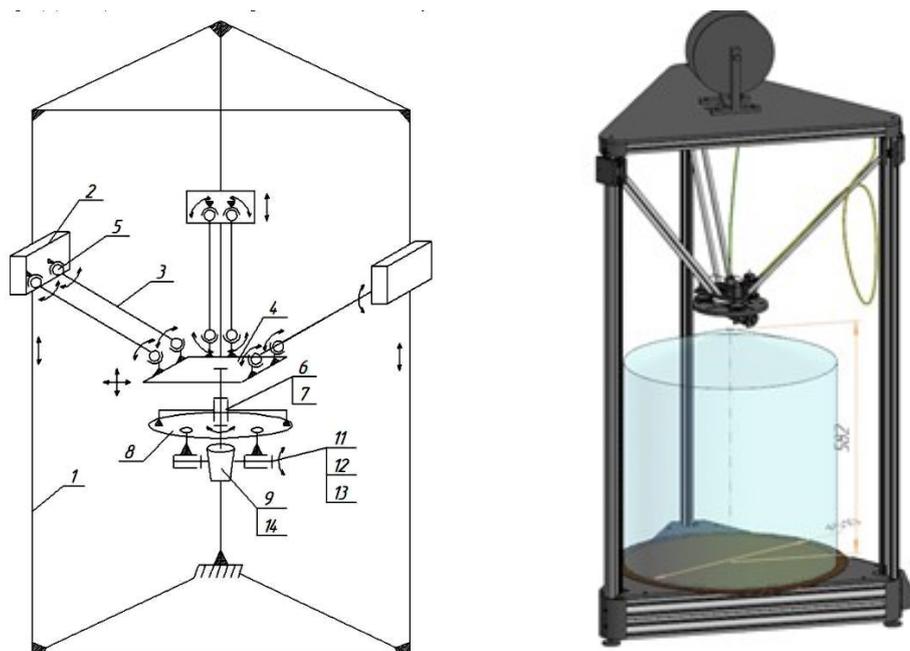


Рисунок 3. Структурная схема и результаты моделирования 5D-принтера [8, 9]

Для работы электромеханического привода поворотной платформы необходимо выполнение условия:

$$M_{ЭДВ} > M_{ст} + M_{д}, \tag{1}$$

где  $M_{ст}$  – статический момент двигателя;  $M_{д}$  – динамический момент двигателя;

$$M_{ст} = M_c / \eta \tag{2}$$

где  $M_c$  – момент сил сопротивления;  $\eta$  – коэффициент учитывающий влияние пускового момента.

Определим динамический момент электрического двигателя из условия:

$$M_{д} = I \cdot \xi, \tag{3}$$

где  $I$  – приведенный момент инерции;  $\xi$  – ускорение.

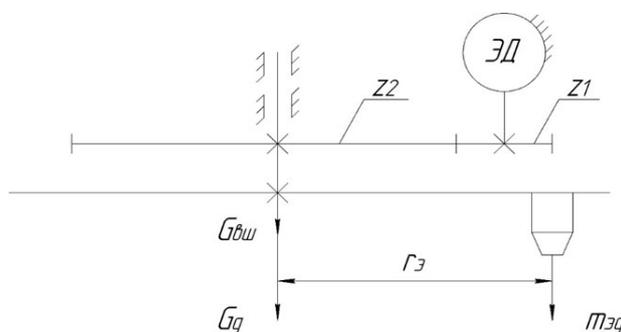


Рисунок 4. Расчётная схема поворотной платформы [8]  
Приведенный момент инерции поворотной платформы определим, как:

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{дв}} + I_{\text{д}} + I_{\text{э}} \quad (4)$$

где  $I_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора двигателя;  $I_{\text{д}}$  – приведенный момент инерции диска;  $I_{\text{э}}$  – приведенный момент инерции экструдера.

Момент инерции ротора двигателя определим из зависимости:

$$I_{\text{дв}} = I_{\text{дл}} + I_{\text{вш}} \quad (5)$$

где  $I_{\text{дл}}$  – момент инерции диска;  $I_{\text{вш}}$  – момент инерции вал-шестерни.

Момент инерции самого диска определим по зависимости:

$$I_{\text{дл}} = m_{\text{д}} \cdot R_{\text{д}}^2 / 2 \quad (6)$$

где  $m_{\text{д}}$  – масса диска;  $R_{\text{д}}$  – радиус диска.

Момент инерции вал-шестерни определим по зависимости

$$I_{\text{вш}} = m_{\text{вш}} R_{\text{вш}}^2 / 2 \quad (7)$$

где  $m_{\text{вш}}$  – масса вал-шестерни;  $R_{\text{вш}}$  – приведенный радиус вал-шестерни.

Момент инерции экструдера определим, как произведение массы экструдера на квадрат радиуса установки экструдера относительно оси поворота:

$$I_{\text{э}} = m_{\text{э}} \cdot r_{\text{э}}^2 \quad (8)$$

где  $m_{\text{э}}$  – масса сборочной единицы экструдера;  $r_{\text{э}}$  – радиус установки экструдера относительно оси поворотного диска.

Тогда, приведенный момент инерции определится по формуле:

$$I = I_{\text{дв}} + \frac{1}{U} [I_{\text{д}} + I_{\text{э}}] = I_{\text{дв}} + \frac{1}{U} \left[ \frac{m_{\text{д}} \cdot R_{\text{д}}^2}{2} + m_{\text{э}} \cdot r_{\text{э}}^2 \right] \quad (9)$$

где  $U$  – передаточное число механизма;

Тогда

$$M_{\text{э,дв}} > \left( I_{\text{дв}} + \frac{1}{U} \left[ \frac{m_{\text{д}} \cdot R_{\text{д}}^2}{2} + m_{\text{э}} \cdot r_{\text{э}}^2 \right] \right) \cdot \varepsilon \quad (10)$$

Угловое ускорение, возникающее при повороте экструдера, оценим, зная установившуюся скорость экструдера и задавшись временем разгона  $t_{\text{раз}}$ . Тогда, при равноускоренном разгоне:

$$\zeta = \omega_n / t_{\text{раз}} \quad (11)$$

где  $\omega_n$  – номинальная скорость вращения двигателя (рад/с),  $t_{\text{раз}}$  – время разгона экструдера на угол  $\lambda=18^\circ$ , принимаем 1 секунда.

Скорость вращения двигателя определяется по формуле:

$$\omega = 2\pi \cdot n_n / 60 \quad (12)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения вала двигателя (т.к. электродвигатель будет работать в режиме  $S4$ , то принимаем частоту, равную 500 об/мин).

Мощность электродвигателя определяется по зависимости:

$$P_{\text{ЭДВ}} \geq M_{\text{эд}} \cdot \omega / \eta \quad (13)$$

где  $\eta$  – КПД двигателя.

По результатам проведённых расчётов в качестве электропривода в разработанной конструкции приняты три двигателя NEMA 8 20HS30-0604, которые механически соединены друг с другом для работы на «общий» вал, рисунок 5 [8].

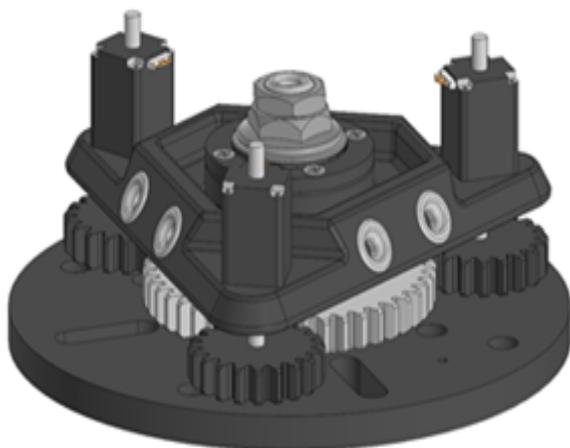


Рисунок 5. 3D-модель подвижной платформы

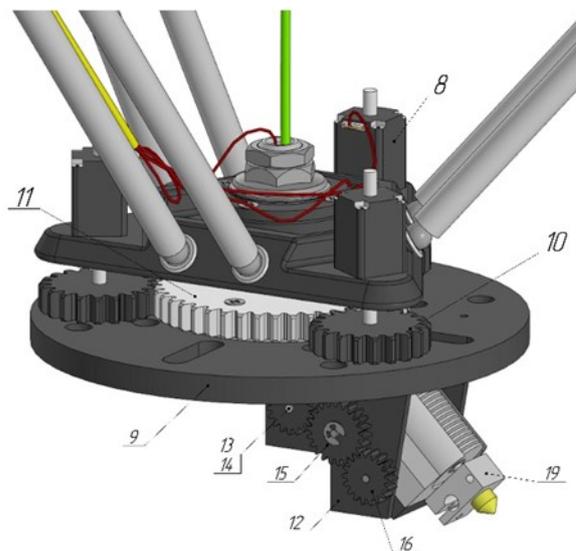


Рисунок 6. Конструкция модуля экструдера повышенной функциональности

Реализация идеи поворота экструдера на угол  $\alpha$  относительно вертикальной оси осуществлена путём использования зубчатого колёсного привода, получающего движение от компактного электрического двигателя, рисунок 7. Для осуществления поворота экструдера на угол  $\alpha$  необходимо подобрать двигатель, который будет обеспечивать заданное механическое движение. Для этого была составлена расчётная схема, рисунок 7.

В состав расчётной схемы (рисунок 7) входят: электродвигатель (ЭД); ведущая шестерня 3, паразитное колесо 2; колесо 1, установленное на валу, который закреплён к корпусу экструдера.

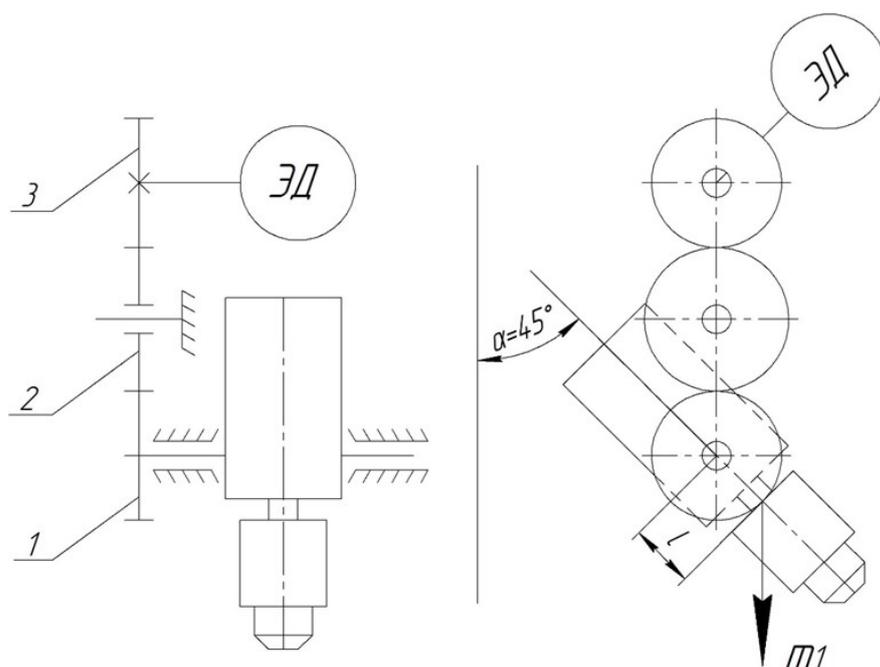


Рисунок 7. Расчётная схема поворотного механизма экструдера [8]

Крутящий момент электрического двигателя, необходимый для работы механизма поворота экструдера, определим из зависимости:

$$M_{кр} \cdot i \cdot \eta_m \geq M_{сс} \quad (14)$$

$$M_{сс} = K \cdot m_1 \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha_{max} \quad (15)$$

где  $K$  – коэффициент запаса;  $m_1$  – масса экструдера;  $l$  – плечо приложения силы тяжести,  $\alpha_{max}$  – максимальный угол поворота экструдера;  $i$  – передаточное число;  $\eta_m$  – КПД механической передачи.

Передаточное число определяем по формуле:

$$i = z_1 / z_3 \quad (16)$$

где  $z_1$  – число зубьев ведущей шестерни;  $z_3$  – число зубьев колеса (см. рис. 7). Преобразуем формулу (14);

$$M_{кр} \geq \frac{K \cdot m_1 \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha_{max}}{i \cdot \eta_m}$$

Мощность электродвигателя рассчитаем по формуле (13). По результатам расчётов осуществляем подбор электродвигателя привода.

При проектировании конструкции поворотного экструдера в качестве аналога принят рабочий орган типа Bowden [7], рис. 8, в качестве привода - электродвигатель компании Azgant.

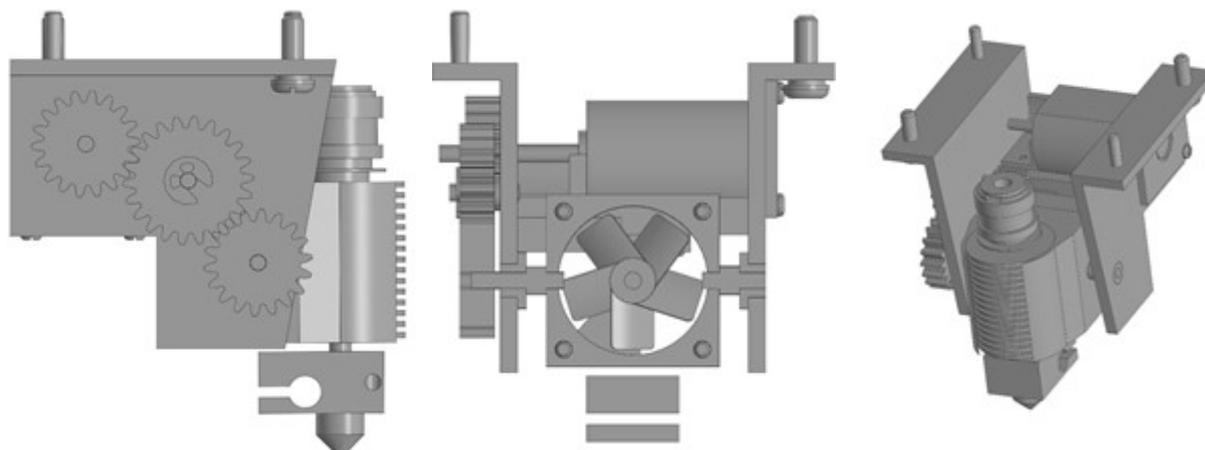


Рисунок 8. 3D модель конструкции поворотного экструдера [8]

### 3. Заключение

Разработана кинематическая схема 5D-принтера, в которой впервые предложено дополнение верхней платформы принтера поворотным диском с экструдером. Экструдер расположен эксцентрично относительно центра диска, что позволяет увеличить рабочий объем печати, а также придаёт механизму печати необходимую функциональность в виде дополнительной степени подвижности. Сам экструдер имеет возможность наклона на угол  $\alpha$  к вертикальной оси  $Z$  принтера, что позволяет реализовать новые технологии печати повышенной прочности и добавляет ещё одну степень подвижности рабочего органа. Разработана 3D-модель принтера с дополнительной функциональностью для реализации 5D-печати. Приведены математические модели для проведения необходимых расчётов по выбору величин механических параметров приводных электродвигателей и трансмиссии устройства поворота.

Предложенные структурная, кинематическая, расчётные схемы и разработанная конструкция устройства могут использоваться на стадии проектирования новых и модернизации существующих конструкций промышленных 3D-принтеров, что позволит повысить их эффективность эксплуатации, а также реализовать новые технологии печати объектов машиностроения, в том числе и для придания изделию необходимых технических характеристик.

### 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. Горобец, И. А. Исследование и разработка конструкции 3D - принтера повышенного объёма печати [Текст] / И. А. Горобец, Д. О. Киселица, Д. С. Жарких // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - Донецк, ДонНТУ, выпуск № 3(82)' 2023.- С.19-25
3. Горобец, И. А. Обзор исследований прочности изделий, полученных с использованием  $fdm$  – технологий [Текст] / И. А. Горобец, Н. В. Голубов, Д. А. Пикалов // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020.- С. 81-85.

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

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

6. Горобец, И. А. Исследование структурных схем конструкций 3D-принтера [Текст] / И. А. Горобец, Лахин А. М., Киселица Д. О., Жарких Д. С. // 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.

7. Popular Best bowden extruder design Trend in 2022/ Written by Fablo// TREND DESIGN IDEAS [Электронный ресурс] - Sep 09, 2021.- Режим доступа: <https://designpic.github.io/best-bowden-extruder-design/>

8. Киселица, Д. О. Исследование параметров и синтез конструкции Дельта принтера для 3D-печати: маг. дисс.: 15.04.05. – Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2023 – 136 с.

9. Жарких, Д. С. Конструкторско-технологическое обеспечение повышения эффективности принтеров для 3D печати: маг. дисс.: 15.04.05. – Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2023 – 130 с.

Поступила в редколлегию 29.01.2024 г.