

Пространственный синтез линейного дельта-робота с параллельной кинематикой

Н.А. Сапрыкина^a, А.В. Проскоков^b, А.А. Сапрыкин^c

Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,
ул. Ленинградская, 26, Юрга, Россия

^a nat_anat_sapr@mail.ru, ^b proskokov@tpu.ru, ^c alex_sapr@rambler.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6391-6345>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3526-4674>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-6518-1792>

Статья поступила 13.01.2020, принята 07.02.2020

Дельта-роботы широко применяют в промышленности. Благодаря высокой скорости и точности позиционирования дельта-роботы зарекомендовали себя в области сортировки мелких изделий, сварки, электронной промышленности и др. Область применения манипуляторов с кинематикой типа дельта постоянно расширяется. В последнее время структуры такого рода все чаще адаптируют к аддитивному производству, в частности технологии FDM (Fused Deposition Modeling), что является инновационным производственным процессом, популярность которого возрастает благодаря уникальной возможности создавать трехмерные физические объекты со сложной геометрией прямо из виртуальной 3D-модели. Несмотря на универсальность, при проектировании роботов необходимо учитывать конкретные задачи и функции их применения. В последние годы ученые работают над созданием оптимального дизайна 3D-принтера с кинематикой дельта. Размерный синтез является актуальной задачей при оптимальном проектировании параллельных роботов, поскольку критерии производительности данного робота очень чувствительны к их геометрии. Учитывая при конструировании только размеры рабочего пространства, нельзя гарантировать оптимальную конструкцию, поскольку в процессе работы, возможно, возникнут нежелательные кинематические и (или) динамические характеристики. Для улучшения функциональных возможностей необходимо оптимизировать геометрические, кинематические и динамические характеристики манипуляторов. Пространственный синтез остается одной из основных проблем проектирования. В данной статье рассмотрена кинематика линейного дельта-робота, проведен структурный анализ механизма, представлен обратный кинематический анализ механизма на основе алгебраического метода решения и геометрического анализа. Рассмотрены вопросы влияния кинематических характеристик принтера на параметры рабочего пространства, которые помогут инженерам и исследователям выбрать наиболее подходящую конфигурацию манипулятора для выполнения требуемой задачи.

Ключевые слова: дельта-робот; механизм с параллельной кинематикой; структурный анализ; кинематика типа Delta; рабочее пространство; 3D-принтер.

Dimensional synthesis of a linear delta robot with parallel kinematics

N.A. Saprykina^a, A.V. Proskokov^b, A.A. Saprykin^c

Yurga Technological Institute, Branch of Tomsk Polytechnic University; 26, Leningradskaya St., Yurga, Russia

^a nat_anat_sapr@mail.ru, ^b proskokov@tpu.ru, ^c alex_sapr@rambler.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6391-6345>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3526-4674>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-6518-1792>

Received 13.01.2020, accepted 07.02.2020

Delta robots are widely used in industry. Due to the high speed and accuracy of positioning delta-robots have proven themselves useful in the field of sorting of small products, welding, electronics industry, etc. The application of manipulators with kinematics of delta type is constantly expanding. In recent years, such structures are increasingly adapted to additive production (AP), in particular FDM technology (Fused Deposition Modeling), which is an innovative manufacturing process, the popularity of which increases due to the unique ability to create three-dimensional physical objects with complex geometry directly from a virtual 3D model. Despite the universality of their application, when designing robots, it is necessary to take into account the specific tasks and functions of their application. In recent years, scientists have been working to create an optimal 3D printer design with delta kinematics. Dimensional synthesis is an urgent task in the optimal design of parallel robots, since the performance criteria of this robot are very sensitive to their geometry. However, when designing only the size of the working space does not guarantee optimal design, because it is possible that in the process of work there will be undesirable kinematic (and / or dynamic) characteristics. To improve the functionality, it is necessary to optimize the geometric, kinematic and dynamic characteristics of the manipulators. Spatial synthesis remains one of the main problems of design. In this article the kinematics of a linear delta robot is considered, the structural analysis of the mechanism is carried out, the inverse kinematic analysis of the mechanism is presented on the basis of the algebraic solution method and geometric analysis. The influence of the kinematic characteristics of the printer on the parameters of the workspace, which will help engineers or researchers to choose the most suitable configuration of the manipulator to perform the required task, is considered.

Keywords: delta robot; parallel kinematics mechanism; structural analysis; delta kinematics; workspace; 3D printer.

Введение. В последнее время, благодаря хорошим кинематическим и динамическим параметрам, точности позиционирования, широкое применение находят роботы с параллельной кинематикой. История создания параллельных роботов началась в 1938 г., когда Поллард подал заявку на патент создания манипулятора для окраски автомобилей [1]. Затем в 1960-х гг. Гоф и Стюарт разработали гексапод, имеющий шесть степеней подвижности, в котором неподвижное основание соединено с подвижной платформой через независимые кинематические цепи. Эта структура известна как платформа Гофа – Стюарта [2]. В 1980-х гг. Р. Кламель изобрел робота с параллельной структурой, известного как дельта-робот с тремя степенями свободы. Особенностью механизма является высокая скорость перемещения выходного звена [3].

Первоначальной задачей разработки Р. Кламеля являлось создание промышленного робота для автоматизации монотонного ручного процесса упаковки конфет [4]. Промышленное развитие дельта-роботов началось в 1987 г., в дальнейшем их начали применять и в лабораториях университетов. В последнее время такого рода структуры все чаще адаптируют к аддитивному производству (АП), в частности технологии FDM (*Fused Deposition Modeling*), что является инновационным производственным процессом, популярность которого возрастает благодаря уникальной возможности создавать трехмерные физические объекты со сложной геометрией прямо из виртуальной 3D-модели. Технология FDM [5] состоит из послойного выдавливания расплавленной полимерной нити из экструдера, расположенного на мобильной платформе, перемещающейся по осям X, Y и Z. Большинство машин FDM сегодня имеют картезианскую кинематику (рис. 1а), основанную на декартовой системе координат, которая представляет ограничения кинематических и динамических характеристик по сравнению с механизмами, состоящими из параллельных кинематических структур. Такое ограничение возникает главным образом из-за того, что в принтерах с декартовой структурой нагрузка на звенья распределена неравномерно, приводимое в движение звено перегружает остальные.

Применение механизмов с параллельной кинематикой (3D-принтер с кинематикой типа дельта) в технологии FDM является развивающимся направлением [6; 7] (рис. 1б). Исследователи работают над созданием принтера с оптимальными геометрическими [8], кинематическими [9] и динамическими [10] характеристиками для улучшения функциональных возможностей.

Размерный синтез является актуальной задачей при оптимальном проектировании параллельных роботов, поскольку критерии производительности данного робота очень чувствительны к их геометрии [13; 14]. При разработке робота с кинематикой типа дельта из всех кинематических параметров одним из определяющих является рабочее пространство [15; 16]. Поэтому учитывают, что одни размеры рабочего пространства не гарантируют оптимальности конструкции, поскольку в процессе работы могут возникнуть нежелательные кинематические и (или) динамические характеристики [17; 18]. Чтобы решить эту проблему, разработчик при проектировании принтера должен учитывать следующие

показатели эффективности: объем рабочего пространства, жесткость, кинематические и динамические характеристики.

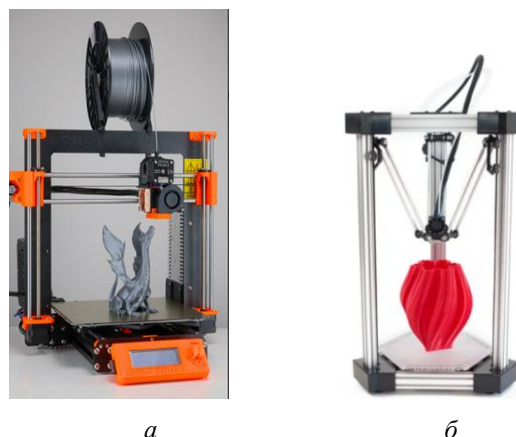


Рис. 1. 3D-принтеры: а — с картезианской кинематикой [11], б — с параллельной кинематикой [12]

В данной статье рассмотрена кинематика линейного дельта-робота, проведен структурный анализ механизма, представлен обратный кинематический анализ механизма на основе алгебраического метода решения и геометрического анализа. Рассмотрены вопросы влияния кинематических характеристик принтера на параметры рабочего пространства, которые помогут инженерам или исследователям выбрать наиболее подходящую конфигурацию манипулятора для выполнения требуемой задачи.

В задаче размерной оптимизации важно учитывать рабочее пространство, в котором будет перемещаться робот, технологические и кинематические возможности робота и особенности задачи, которая должна быть реализована.

Линейный манипулятор типа дельта — это робот с тремя поступательными движениями, состоящий из трех одинаковых замкнутых кинематических цепей, соединяющих мобильную платформу с неподвижным основанием. Движение платформе передается от ползунов, совершающих поступательное движение относительно вертикально расположенных неподвижных направляющих и четырехзвенного параллелограмма с продольными звеньями L и поперечными $2 \cdot c$ с двухподвижными сферическими соединениями на концах. Четырехзвенный параллелограмм также называют кинематической цепью с замкнутым контуром или сложным соединением. Из-за поступательных движений в манипуляторе его называют линейным. В линейных параллельных манипуляторах кинематические цепи обычно расположены симметрично по основанию (см. рис. 2).

Для определения размеров рабочей зоны 3D-принтера и габаритов получаемого изделия необходимо найти зависимости геометрических параметров принтера на траекторию движения выходного звена. Также одним из важнейших этапов проектирования роботизированной механической системы является решение проблемы структурного синтеза механизмов. Неэффективная конструкция механизма со структурной точки зрения приведет к чрезмерным нагрузкам на кинематические пары. Поэтому актуальной задачей является

синтез параметров с учетом ограничений, наложенных на рабочее пространство дельта-робота.

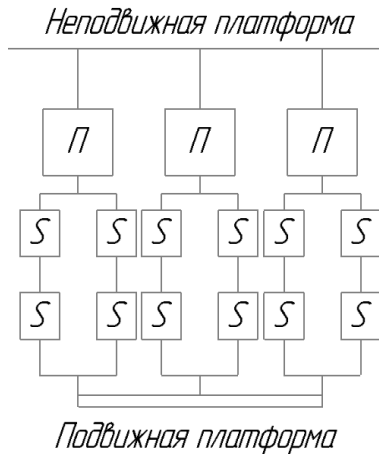


Рис. 2. Структурная схема линейного параллельного робота

В лаборатории робототехники Юргинского технологического института создан 3D-принтер с кинематикой типа дельта оптимальной конструкции для работы по технологии FDM (структурная схема представлена на рис. 2). Механическая система (рис. 3) состоит из неподвижного основания 1, мобильной платформы 2, модулей с кабельным приводом последующего натяжения 3, направляющих 4, аппаратного модуля 5. Печатающая головка (экструдер) 6 закреплена на мобильной платформе, а верхняя часть соединена с модулем подачи полимерной нити. Основание для экструдера расположено параллельно неподвижной платформе.

Особенностью данного макета является применение неодимовых магнитов для уменьшения погрешности позиционирования узлов принтера. Они обладают достаточной магнитной силой, чтобы препятствовать разрыву узлов при увеличении инерциальных нагрузок и служат скрепляющим элементом для двухподвижной сферической передачи 9 между кареткой экструдера 7 и четырехзвенными параллелограммами 3. Экструдер 6, совершает поступательные движения по осям X, Y и Z. В состав экструдера входят радиатор и штуцер. Кабельный модуль содержит три группы идентичных структур и обладает высокой степенью симметрии. Каждая группа включает в себя шаговый двигатель, редуктор, ползун 8, механизм с винтом и гайкой, фиксированный шкив и два троса. Звенья в замкнутой кинематической цепи 3 расположены параллельно, принцип параллелограмма используется для ограничения вращения модуля печатающей головки. Ползуны 8 перемещаются по высокоточным линейным направляющим 4. Вся электронная аппаратура размещена в нижнем основании станка 1. Управляющее оборудование включает в себя материнскую плату Arduino Mega, электронную плату, LCD-дисплей 5, SD-карту, блок питания и провода.

Структурный синтез механизма с параллельной кинематикой основан на классических положениях структурной теории механизмов [19]. Кинематические цепи с замкнутым контуром содержат избыточные кинематические пары и звенья, которые не учитываются при определении степени подвижности 3D-принтера. Механизм с кинематикой типа Delta состоит из неподвижного основания и семи подвижных звеньев (n): трех

шатунов, трех ползунов и исполнительного звена (экструдера). Ползуны с направляющими образуют три поступательные одноподвижные кинематические пары (p_5). Шатун соединяет ползун и исполнительное звено с помощью пары двухподвижных сферических соединений. Степень подвижности механизма определяем по формуле Сомова – Малышева:

$$W = 6 \cdot n - 5 \cdot p_5 - 4 \cdot p_4 - 3 \cdot p_3 - 2 \cdot p_2 - 1 \cdot p_1 = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 6 = 3.$$

Таким образом, манипулятор с параллельной структурой дельта содержит три степени подвижности, позволяющие позиционировать выходное звено в пространстве по трем координатам за счет изменения положений замкнутых кинематических цепей, и имеет рациональную структуру.

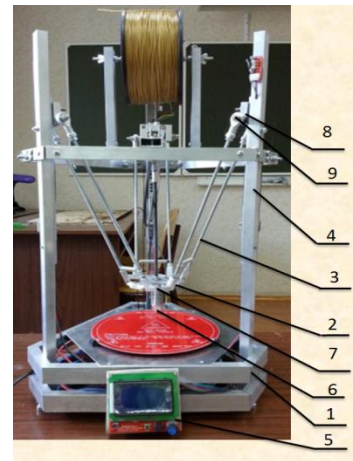


Рис. 3. Макет 3D-принтера с кинематикой типа дельта

Задача вычисления возможных приведенных в действие ползунов с учетом положения экструдера называется обратной кинематической задачей. Параметры кинематической модели линейного параллельного робота с кинематикой дельта представлены на рис. 4, где система координат O-XYZ расположена в центре неподвижного основания, и еще одна система P-xyz фиксируется в центре движущейся платформы. Мобильная платформа всегда остается параллельной основанию, ее поступательные движения являются результатом совместного перемещения трех звеньев с параллельной структурой. Связь между неподвижным основанием и мобильной платформой обеспечивается тремя одинаковыми кинематическими цепями, расположенными под углом α_i . Радиусы основания — R_o и подвижной платформы — r_b ; c — половина длины поперечного звена; L — длина продольного звена параллелограмма. Из построения определяем:

$$A_{11}A_{12} = A_{21}A_{22} = A_{31}A_{32} = B_{11}B_{12} = B_{21}B_{22} = B_{31}B_{32} = 2 \cdot c,$$

$$A_{11}B_{11} = A_{12}B_{12} = A_{21}B_{21} = A_{22}B_{22} = A_{31}B_{31} = A_{32}B_{32} = A_1B_1 = A_2B_2 = A_3B_3 = L.$$

Точка A_{ij} ($i = 1 \dots 3$), ($j = 1, 2$) относится к центру каждого двухподвижного сферического соединения на приводных ползунах; B_{ij} ($i = 1 \dots 3$), ($j = 1, 2$) относится к центру каждого двухподвижного сферического соединения подвижной платформы; координата $P = (x, y, z)$ определяет координаты платформы в подвижном со-

стоянии; d_i ($i = 1 \dots 3$) обозначает длину от нижнего неподвижного основания до центра ползуна.

Координаты точек A_{ij} и B_{ij} относительно неподвижного основания определяем по формулам:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} R_0 \cdot \cos \alpha_i \pm c \cdot \sin \beta_i \\ R_0 \cdot \sin \alpha_i \pm c \cdot \cos \beta_i \\ d_{zi} \end{bmatrix},$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} r_b \cdot \cos \alpha_i \pm c \cdot \sin \beta_i \\ r_b \cdot \sin \alpha_i \pm c \cdot \cos \beta_i \\ z \end{bmatrix}.$$

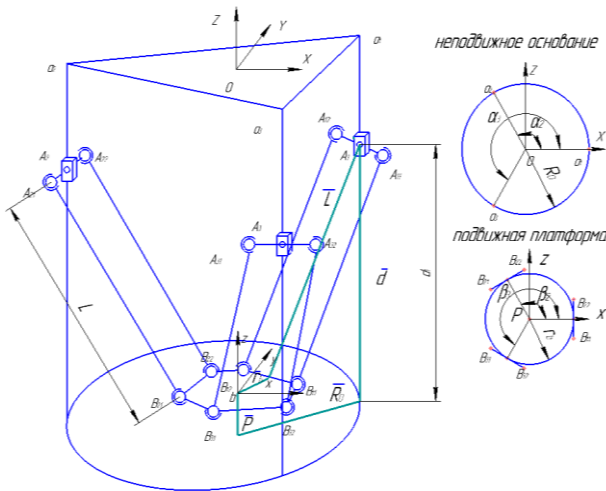


Рис. 4. Геометрический синтез дельта-принтера с линейным приводом

$$A_{11} = R_0, -c, d_1,$$

$$A_{12} = R_0, c, d_1,$$

$$A_{21} = -\left(\frac{1}{2} \cdot R_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R_0 + \frac{1}{2} \cdot c\right), d_2,$$

$$A_{22} = -\left(\frac{1}{2} \cdot R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R_0 - \frac{1}{2} \cdot c\right), d_2,$$

$$A_{31} = -\left(\frac{1}{2} \cdot R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), -\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R_0 - \frac{1}{2} \cdot c\right), d_3,$$

$$A_{32} = -\left(\frac{1}{2} \cdot R_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), -\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R_0 + \frac{1}{2} \cdot c\right), d_3,$$

$$B_{11} = r_b, -c, z,$$

$$B_{12} = r_b, c, z,$$

$$B_{21} = -\left(\frac{1}{2} \cdot r_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_b + \frac{1}{2} \cdot c\right), z,$$

$$B_{22} = -\left(\frac{1}{2} \cdot r_b + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_b - \frac{1}{2} \cdot c\right), z,$$

$$B_{31} = -\left(\frac{1}{2} \cdot r_b + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), -\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_b - \frac{1}{2} \cdot c\right), z,$$

$$B_{32} = -\left(\frac{1}{2} \cdot r_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c\right), -\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_b + \frac{1}{2} \cdot c\right), z.$$

Длину от нижнего неподвижного основания до центра ползуна определяем с помощью решения обратной задачи кинематики:

$$d_i = z_{Ai} = z_{Bi} + \sqrt{L_i^2 - x_{Bi}^2 - x_{Ai}^2 - y_{Bi}^2 - y_{Ai}^2}.$$

Для разрабатываемого 3D-принтера $R_0 = 180$ мм, $r_b = 25$ мм, $L = 270$ мм, $c = 24$ мм, высота направляющих $D = 560$ мм. Координата мобильной платформы $z_B = 260$ мм.

$$A_{11} = 180; -24; d_1,$$

$$A_{12} = 180; 24; d_1,$$

$$A_{21} = -69,21; 167,88; d_2,$$

$$A_{22} = -110,78; 143,88; d_2,$$

$$A_{31} = -110,78; -143,88; d_3,$$

$$A_{32} = -69,21; -167,88; d_3,$$

$$B_{11} = 25; -24; z,$$

$$B_{12} = 25; 24; z,$$

$$B_{21} = -8,28; 33,65; z,$$

$$B_{22} = -33,28; 9,65; z,$$

$$B_{31} = -33,28; -9,65; z,$$

$$B_{32} = 8,28; -33,65; z,$$

$$d_1 = z_{A1} = z_B + \sqrt{L^2 - x_{B11}^2 - x_{A11}^2 - y_{B11}^2 - y_{A11}^2} =$$

$$260 + \sqrt{270^2 - (25 - 180)^2 - (-24 + 24)^2} = 481 \text{ мм},$$

$$d_2 = z_{A2} = z_B + \sqrt{L^2 - x_{B21}^2 - x_{A21}^2 - y_{B21}^2 - y_{A21}^2} =$$

$$260 + \sqrt{270^2 - (-8,28 - 69,21)^2 - (33,65 - 167,88)^2} =$$

$$481 \text{ мм},$$

$$d_3 = z_{A3} = z_B + \sqrt{L^2 - x_{B31}^2 - x_{A31}^2 - y_{B31}^2 - y_{A31}^2} =$$

$$260 + \sqrt{270^2 - (-33,28 + 110,78)^2 - (-9,65 + 143,880)^2} =$$

$$481 \text{ мм}.$$

Решение прямой задачи кинематики заключается в том, чтобы найти конечное положение экструдера относительно неподвижного основания, учитывая координаты приводных ползунов. Ее решение является не таким простым, как в обратной задаче, поскольку процедуры поиска решения связаны с большей математической сложностью [20].

Модель прямой кинематики линейного дельта-робота, позволяющая определить объем рабочего пространства, представлена в виде пересечения трех сфер, как показано на рис. 5.

Центры трех сфер задаются точками призматических соединений, а максимальный радиус сферы равен:

$$r_{Amax} = 2 \cdot R_0 - r_b.$$

Для рассматриваемого принтера:

$$r_{Amax} = 2 \cdot 180 - 25 = 335 \text{ мм}.$$

Минимальный радиус каждой сферы эквивалентен длине соответствующей ветви:

$$r_{Amin} = \sqrt{L^2 - d_i - z_B^2} + r_b, \quad i = 1 \dots 3.$$

Для рассматриваемого принтера:

$$r_{Amin} = \sqrt{270^2 - 481 - 260^2} + 25 = 180 \text{ мм}.$$

Делаем вывод, что рабочее пространство робота — это множество пересечений трех окружностей радиусами r_{A1} , r_{A2} , r_{A3} неправильной формы с центрами на линейных направляющих и расстояниями d_1 , d_2 и d_3 от

неподвижного основания. Вписанная в рабочее пространство робота окружность будет иметь радиус:

$$r_{max} = R_0 - r_b = 180 - 25 = 155 \text{ мм.}$$

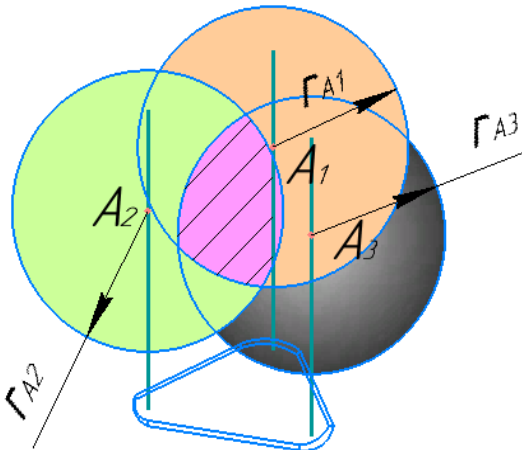


Рис. 5. Рабочее пространство дельта-робота

Максимальная высота изделия h , получаемая на разрабатываемом 3D-принтере, определяется как:

$$h = D - d_{i0} = 560 - 221 = 339 \text{ мм,}$$

где d_{i0} — длина от нижнего неподвижного основания до центра ползуна при $z_{Bi} = 0$.

Литература

- Pollard L.V. Position-Controlling-Apparatus. Patent, US 2286571, 1942.
- Stewart D.A. Platform with Six Degrees of Freedom // In Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. 1965. 180. (1). P. 371–386.
- Wahle M., Corves B. Stiffness Analysis of Clavel's DELTA Robot // In Proc. of the 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA). 2011. Part I. P. 240–249.
- Gosselin C., Angeles J. The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulator // ASME Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design. 1988. 110. P. 35–41.
- Bonev I. Delta Parallel Robot -the Story of Success. <http://www.parallelemic.org/Reviews/Review002p.html>, 2001. (3rd December). 2014.
- Allen R.A. An experimental demonstration of effective curved layer fused filament fabrication utilising a parallel deposition robot // Addit Manuf. 2015. № 8. P. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.001>
- Ye W., Fang Y., Guo S. Design and analysis of a reconfigurable parallel mechanism for multidirectional additive manufacturing // Mech Mach Theory. 2017. № 112. P. 307–326.
- Peng B., Zhu S., Khajepour A., Huang Y. Kinematics and orientation capability of a family of 3-DOF parallel mechanisms // Mechanism and Machine Theory. 2019. № 142. P. 103606.
- Laribi M.A., Romdhane L., Zeghloul S. Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace // Mech. Mach. Theory. 2007. № 42. P. 859–870.
- Park S.B., Kim H.S., Song C., Kim K. Dynamics modeling of a delta-type parallel robot // The 44th International Symposium on Robotics. 2013. P. 1–5.
- [Электронный ресурс]. URL. <http://www.thegolfclub.info> (дата обращения: 14.10.2019).
- [Электронный ресурс]. URL. <https://mayin3d.xyz:443> (дата обращения: 14.10.2019).

Максимальный объем изделия, получаемого на разрабатываемом 3D-принтере:

$$V = \pi \cdot r_{max}^2 \cdot h = 3,14 \cdot 155^2 \cdot 339 = 25573651,5 \text{ мм}^3 = 0,0256 \text{ м}^3$$

Заключение. В данной работе рассмотрены конструкция, структурный, кинематический анализ и размерный синтез линейного дельта-робота для применения в аддитивных технологиях на основе метода FDM. Конструкция выполнена из трех симметрично расположенных параллельных структур.

Решена обратная задача кинематики линейного дельта-робота, позволяющая определить основные геометрические параметры оптимизации: радиусы неподвижного основания — R_0 , и подвижной платформы — r_b , длину продольного звена с параллельной структурой L и длину линейных направляющих D . Разрабатываемый 3D-принтер с геометрическими параметрами: $R_0 = 180$ мм, $r_b = 25$ мм, $L = 270$ мм, $c = 24$ мм, высота направляющих $D = 560$ мм позволяет изготавливать максимальный объем изделия, равный $V = 0,0256 \text{ м}^3$. Эту методологию можно применять для поиска оптимальных параметров разрабатываемых 3D-принтеров с требуемым объемом рабочего пространства и меньшим количеством затрачиваемых ресурсов.

- Глазунов В.А., Данилин П.О., Левин С.В., Гывес Л.И., Шалюхин К.А. Разработка механизмов параллельной структуры с кинематической и динамической развязкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 2. С. 23–32.
- Несмиянов И.А. Структурный и параметрический синтез и оптимизация программных движений манипуляторов на основе трипода: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2017. 349 с.
- Boudreau R., Gosselin C. La synthèse d'une plate-forme de Gough-Stewart pour un espace atteignable prescrit // Mechanism and Machine theory. 2001. 36. P. 327–342.
- Глазунов В.А., Чунихин А.Ю. Развитие механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 37–43.
- Носова Н.Ю., Глазунов В.А., Палочкин С.В., Терехова А.Н. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 5. С. 34–40.
- Хейло С.В., Глазунов В.А., Кулемкин Ю.В., Эфрос В.Л. Анализ ускорений и нелинейных колебаний сферического механизма параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 3. С. 9–17.
- Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.
- Riaco C., Peca C., Pardo A. Approach in the optimal development of parallel robot for educational applications // In: Proceedings of the WSEAS international conference on recent advances in intelligent control, modelling and simulation (ICMS). 2014. Vol. 145.

References

- Pollard L.V. Position-Controlling-Apparatus. Patent, US 2286571, 1942.
- Stewart D.A. Platform with Six Degrees of Freedom // In Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. 1965. 180. (1). P. 371–386.
- Wahle M., Corves B. Stiffness Analysis of Clavel's DELTA Robot // In Proc. of the 4th International Conference on Intel-

- ligent Robotics and Applications (ICIRA). 2011. Part I. P. 240–249.
4. Gosselin C., Angeles J. The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulator // *ASME Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design*. 1988. 110. P. 35–41.
 5. Bonev I. Delta Parallel Robot -the Story of Success. <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002p.html>, 2001. (3rd December). 2014.
 6. Allen R.A. An experimental demonstration of effective curved layer fused filament fabrication utilising a parallel deposition robot // *Addit Manuf*. 2015. № 8. P. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.001>
 7. Ye W., Fang Y., Guo S. Design and analysis of a reconfigurable parallel mechanism for multidirectional additive manufacturing // *Mech Mach Theory*. 2017. № 112. P. 307–326.
 8. Peng B., Zhu S., Khajepour A., Huang Y. Kinematics and orientation capability of a family of 3-DOF parallel mechanisms // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. № 142. P. 103606.
 9. Laribi M.A., Romdhane L., Zeghloul S. Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace // *Mech. Mach. Theory*. 2007. № 42. P. 859–870.
 10. Park S.B., Kim H.S., Song C., Kim K. Dynamics modeling of a delta-type parallel robot // *The 44th International Symposium on Robotics*. 2013. P. 1–5.
 11. [Elektronnyj resurs]. URL. <http://www.thegolfclub.info> (data obrashcheniya: 14.10.2019).
 12. [Elektronnyj resurs]. URL. <https://mayin3d.xyz:443>. (data obrashcheniya: 14.10.2019).
 13. Glazunov V.A., Danilin P.O., Levin S.V., Tyves L.I., SHalyuhin K.A. Development of parallel structure mechanisms with kinematic and dynamic decoupling. *Problems of machine building and machine reliability // Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2010. № 2. P. 23–32.
 14. Nesmiyanov I.A. Structural and parametric synthesis and optimization of program movements of manipulators based on the tripod: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Volgograd, 2017. 349 p.
 15. Boudreau R., Gosselin C. La synthèse d'une plate-forme de Gough-Stewart pour un espace atteignable prescript // *Mechanism and Machine theory*. 2001. 36. P. 327–342.
 16. Glazunov V.A., CHunihin A.YU. Development of mechanisms of parallel structure // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014. № 3. P. 37–43.
 17. Nosova N.YU., Glazunov V.A., Palochkin S.V., Terekhova A.N. Synthesis of parallel structure mechanisms with kinematic decoupling // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014. № 5. P. 34–40.
 18. Hejlo S.V., Glazunov V.A., Kulemkin YU.V., Efros V.L. Analysis of accelerations and nonlinear oscillations of the spherical mechanism of parallel structure // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013. № 3. P. 9–17.
 19. Artobolevskij I.I. *Theory of mechanisms and machines*. M.: Nauka: Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. 640 p.
 20. Riaso C., Pesa C., Pardo A. Approach in the optimal development of parallel robot for educational applications // *In: Proceedings of the WSEAS international conference on recent advances in intelligent control, modelling and simulation (ICMS)*. 2014. Vol. 145.