

УДК 537.85
EDN: ENNMBD

Физико-математическое моделирование дельта-автоматизированного устройства

Виноградов С. В., Передистов Е. Ю. ✉

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Рост объемов производства в отечественной электронной промышленности создает потребность в оптимизации работы сортировочных и упаковочных участков. Одним из перспективных направлений является внедрение дельта-автоматизированных устройств (дельта-роботов). **Целью работы** является моделирование, проектирование и практическая реализация одного из видов дельта-роботов. **Используемые методы:** в основе работы лежат базовые принципы физического и математического моделирования кинематики дельта-механизма. **Результат.** Спроектировано и собрано устройство, представляющее собой одну из разновидностей робота параллельной структуры. Проведен анализ теоретических расчетов, определены границы применимости модели, выполнена практическая реализация и экспериментальная проверка работоспособности прототипа.

Ключевые слова: дельта-автоматизированный механизм, прямая задача кинематики, обратная задача кинематики, расчет рабочей области, шарнирное соединение

Актуальность

На сегодняшний день доступно большое количество источников¹ с описанием реализации «дельта-автоматизированного механизма». Вопрос конструирования таких механизмов довольно хорошо изучен, существует множество готовых схем и решений. Тем не менее самостоятельный процесс моделирования, проектирования и практической реализации одного из видов дельта-роботов позволяет глубже понять принципы работы роботов параллельной структуры, особенности их математического описания и механические ограничения.

Дельта-робот [1, 2] – представитель класса параллельных манипуляторов, в котором три рычага соединены с основанием и подвижной платформой через шарнирные узлы. Конструктивной особенностью, определяющей свойства данного робота, является использование параллелограммных звеньев, что позволяет сохранить пространственную ориентацию подвижной платформы (исполнительного устройства) робота относительно точки крепления в процессе перемещений (рисунок 1).

Благодаря высокой скорости и точности дельта-роботы нашли применение в сортировке, медицинской и фармацевтической промышленности, а также в задачах оперирования электронными компонентами в чистых помещениях. Наиболее частое применение такие роботы находят на линиях упаковки, поскольку обладают достаточно большой скоростью перемещения рабочего органа. Некоторые из них

Библиографическая ссылка на статью:

Виноградов С. В., Передистов Е. Ю. Физико-математическое моделирование дельта-автоматизированного устройства // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 3. С. 4. EDN: ENNMBD

Reference for citation:

Vinogradov S., Peredistov E. Physical and Mathematical Modeling Delta-Automated Device // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 3. P. 4. EDN: ENNMBD

¹ Различные заметки на сайтах: habr.com, reddit.com, 3deshnik.ru и др.

осуществляют до 300 перемещений в минуту. Высокое быстродействие достигается за счет выноса массивных приводов на неподвижное основание. Передача движения на платформу осуществляется через систему легких рычагов и штанг.

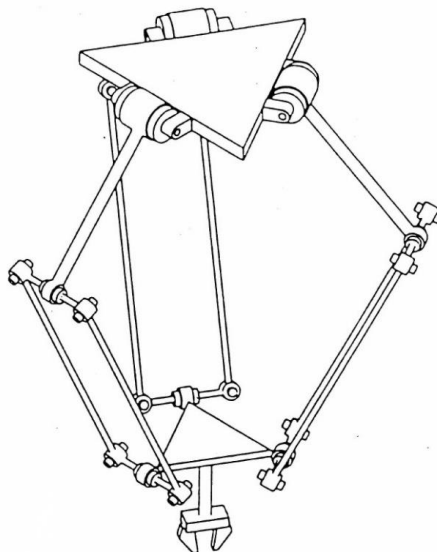


Рис. 1. Общий вид дельта-робота

Моделирование

Прежде всего стоит определить, как моделируется рабочая зона подобного механизма. Рабочей зоной манипулятора называется область пространства, в пределах которой может находиться центр его подвижной платформы.

Для роботов параллельной структуры, к которым относится дельта-механизм, применяются два основных подхода к определению рабочей зоны: графический и дискретный. Графический метод основан на геометрическом построении областей, описываемых концевыми точками звеньев, и нахождении их пересечения с учетом ограничений. Дискретный метод предполагает численное решение кинематических уравнений для множества точек пространства и проверку их принадлежности зоне досягаемости с учетом всех механических ограничений. Ограничения накладываются конструктивными особенностями робота, к которым относятся предельные углы поворота в шарнирах, возможность столкновения элементов конструкции и минимально допустимые углы между звеньями. Наиболее очевидным ограничением является недопустимость пересечения элементов конструкции друг с другом [2, 3] (рисунок 2).

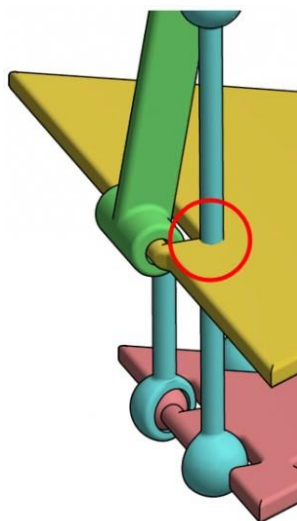


Рис. 2. Пример пересечения элементов конструкции

Для исключения такой ситуации необходимо контролировать углы, образуемые в шарнирных соединениях подвижных звеньев [1–3]. Ограничение движения конструкцией узла (возможный контакт штанги с приводом) оценивается исходя из величины отрезка QG и минимально возможного угла θ_{\min} , (рисунок 3). Это ограничение также может быть оценено по значению угла γ (рисунок 4), которое должно находиться в диапазоне между минимально допустимым γ_{\min} , зависящим от величины отрезка QG , и 180° [4–6].

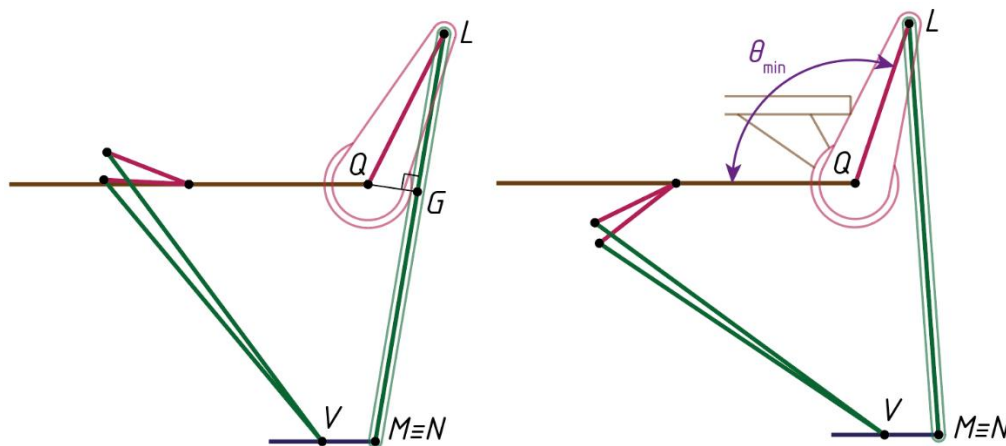


Рис. 3. Схема для определения минимального угла θ_{\min}

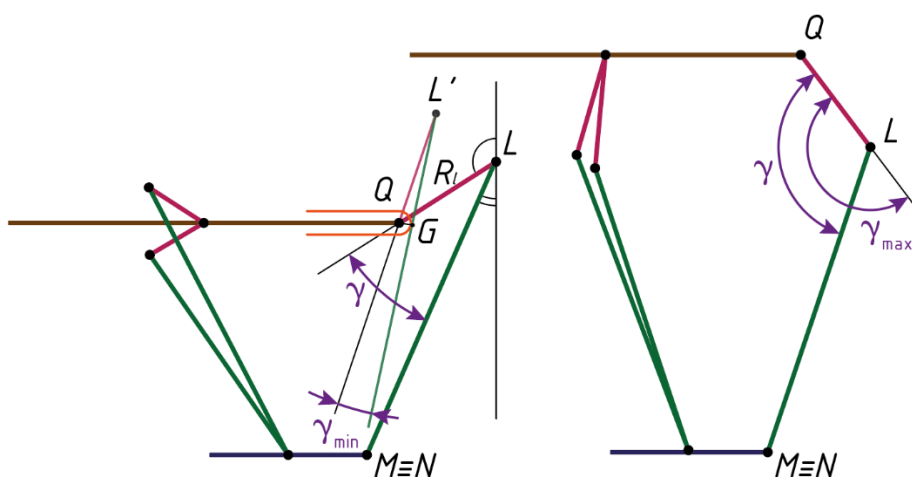


Рис. 4. Схема для оценки угла сближения штанги с приводом

После решения прямой задачи кинематики и определения координат точек крепления (Q, L, M) можно будет узнать координаты точки N , являющейся проекцией точки M на плоскость вращения рычага, которая совпадает с YOZ . Отсюда следует, что искомое значение угла γ для i -го рычага может быть найдено по формуле:

$$\gamma = 180^\circ - \arccos\left(-\frac{Z_L}{R_L}\right) - \arcsin\frac{Y_N - Y_L}{R_r}.$$

Минимально возможное значение этого угла задается соотношением:

$$\gamma_{\min} = \arcsin\frac{QG}{R_L}.$$

Существенное влияние на рабочую зону оказывают предельные углы поворота трехподвижных² шарниров в узлах крепления штанг, дальше которых шарнир не повернется как минимум вокруг двух осей (рисунок 5).

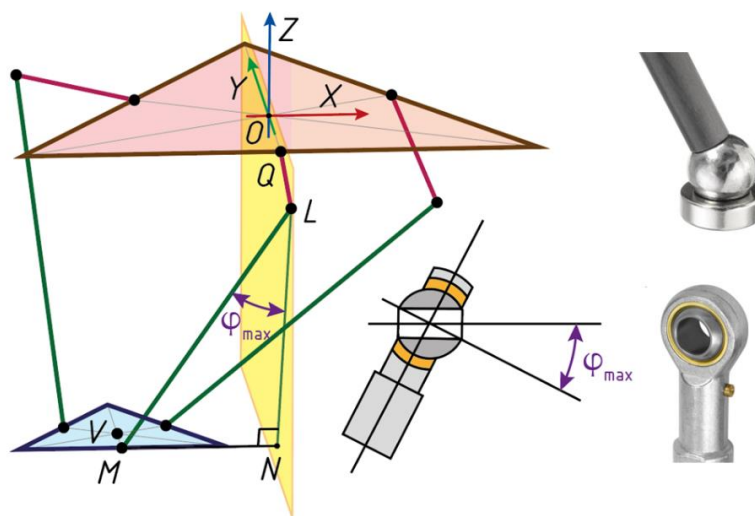


Рис. 5. Угловое ограничение в шаровом шарнире

В случае шаровых шарниров на подшипниках качения предельный угол φ_{\max} обычно составляет $\pm 25 \dots 30^\circ$, для шарниров с полимерным вкладышем – около $\pm 22^\circ$, а для карданных шарниров может достигать $\pm 45^\circ$. В таком случае для проверки, не нарушается ли ограничение на предельные углы поворота трехподвижных шарниров в узлах крепления штанг, необходимо для каждого плеча вычислить угол φ между осью штанги и плоскостью вращения соответствующего рычага. Эту проверку легко сделать по треугольнику LMN , в котором сторона LM равна длине штанги, а сторона MN равна координате точки V по оси X .

Таким образом, можно найти абсолютное значение отклонения точки крепления штанги от плоскости вращения рычага по формуле:

$$\varphi = \arcsin \frac{|x_V|}{R_r},$$

где модуль необходим для учета того факта, что центр каретки может отклоняться от плоскости ZOY как вправо, так и влево.

Ограничение не нарушается при выполнении неравенства $\varphi \leq \varphi_{\max}$ для всех трех плеч.

Анализ влияния типа шарниров на рабочий объем

Для количественной оценки влияния ограничения по углу φ_{\max} был проведен расчет для базовой конфигурации робота со следующими параметрами: основание со стороной $f = 300$ мм, платформа со стороной $e = 100$ мм, длина рычага $r_f = 150$ мм, длина штанги $r_e = 400$ мм. Расчет рабочего объема выполнялся дискретным методом. Результаты показали, что по сравнению с теоретическим объемом без учета шарнирных ограничений:

- при использовании шарниров с $\varphi_{\max} = \pm 30^\circ$ рабочий объем уменьшается на 15–18 %;
- при использовании шарниров с $\varphi_{\max} = \pm 22^\circ$ потеря объема достигает 25–27 %.

Данный анализ подтверждает критическую важность выбора шарниров с максимально возможным углом поворота для расширения рабочей зоны дельта-робота.

² Трехподвижный шарнир – это кинематическая пара (соединение двух звеньев), которая допускает три независимых относительных вращательных движения (три степени свободы) между этими звеньями.

Математические расчеты

Учет всех перечисленных ограничений существенно сокращает первоначально рассчитанную рабочую зону, форма которой становится сложной для аналитического описания. Поэтому для удобства, рабочую зону дельта-робота часто аппроксимируют простыми геометрическими телами: цилиндром либо цилиндром с усеченной конической или сферической нижней частью [4, 6] (рисунок 6).

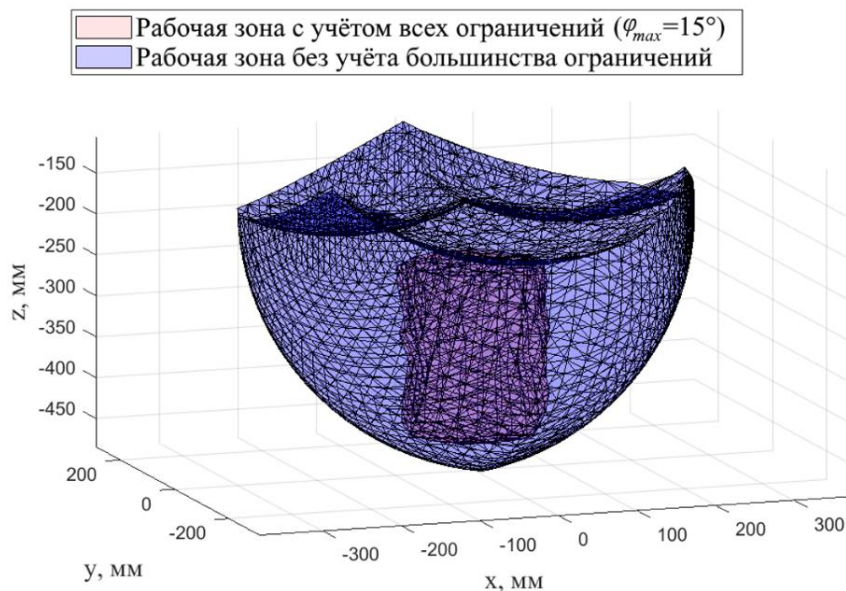


Рис. 6. Аппроксимация рабочей зоны дельта-робота: без учета и с учетом ограничений

Как правило, в технической документации на промышленные дельта-роботы обычно приводится упрощенная геометрическая модель с указанием ключевых размеров [5, 6] (рисунок 7).

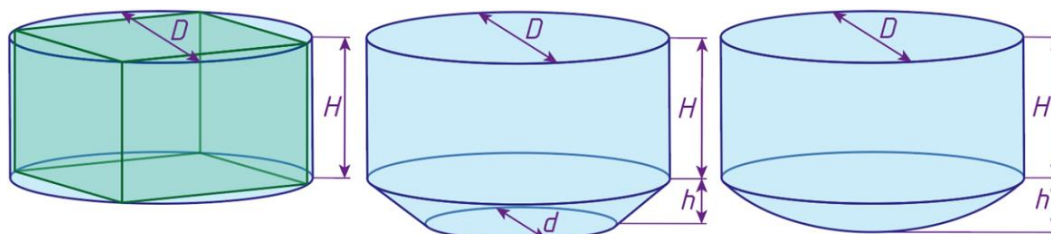


Рис. 7. Типовое представление рабочей зоны дельта-робота в техническом описании

Решение прямой задачи кинематики для описания движения дельта-робота

Прямая задача кинематики заключается в определении координат центра подвижной платформы (x_0, y_0, z_0) по заданным углам поворота приводных рычагов $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$:

$$f(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \rightarrow (x_0, y_0, z_0).$$

По этим углам определяются координаты точек крепления рычагов к основанию J_1, J_2 и J_3 [6] (рисунок 8). Так как штанги (звенья J_1E_1, J_2E_2 и J_3E_3) закреплены сферическими шарнирами, точки крепления штанг к платформе (E_1, E_2 и E_3) должны находиться на сферах радиусом r_e с центрами в точках J_1, J_2 и J_3 .

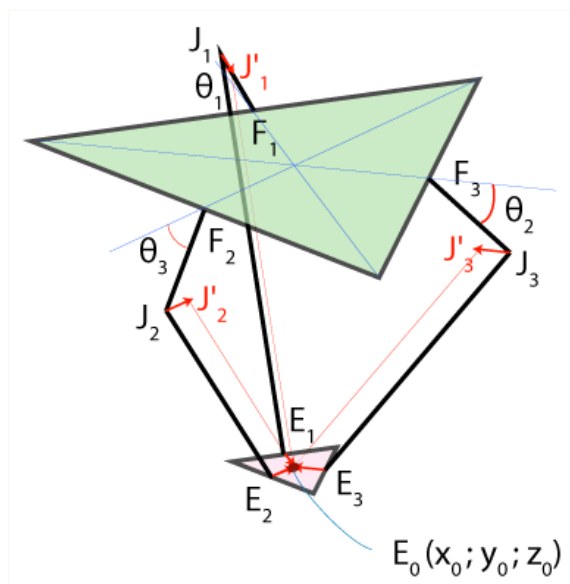


Рис. 8. Плечи рычагов J_1E_1 , J_2E_2 , и J_3E_3

Нарисуем эти сферы, после чего сместим их в сторону оси Z (рисунок 9).

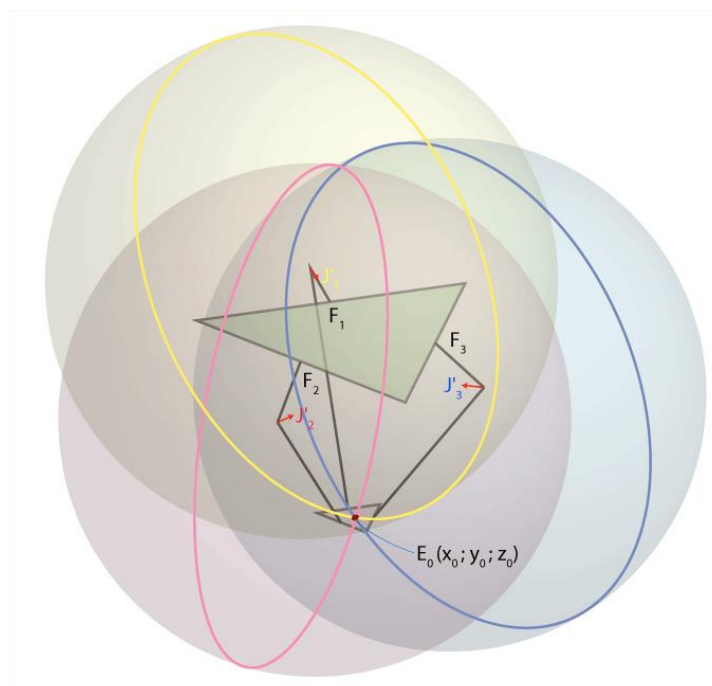


Рис. 9. Сферы, описываемые вокруг точек J_1 , J_2 и J_3

Для решения рассмотрим проекции точек J_1 , J_2 и J_3 на плоскость, связанную с основанием, получив точки J'_1 , J'_2 , J'_3 (рисунок 10). Тогда точка E_0 (центр платформы) будет находиться на пересечении трех сфер с центрами в J'_1 , J'_2 , J'_3 и радиусами, равными длине штанги r_e .

Для определения координат X , Y и Z требуется решить систему из трех уравнений, описывающих эти сферы:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = r_e^2,$$

где r_e – радиус окружностей с центрами в точках J'_1 , J'_2 , J'_3 ; (x_i, y_i, z_i) – координаты центров сфер J'_1 , J'_2 и J'_3 .

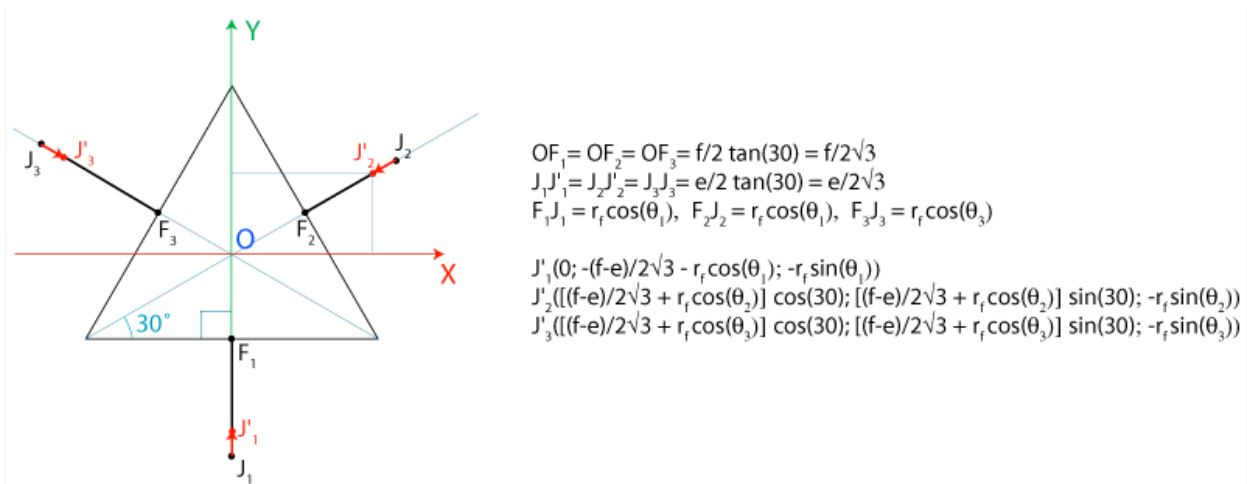


Рис. 10. Координаты точек J'_1, J'_2 и J'_3

Для удобства восприятия записи далее в качестве координат точек J'_1, J'_2 и J'_3 будут использоваться обозначения $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ и (x_3, y_3, z_3) . Здесь важно, что $x_1 = 0$, поскольку точка J'_1 находится в плоскости YZ . В результате получается следующая система уравнений:

$$\Rightarrow \begin{cases} x^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_e^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_e^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_e^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = r_e^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \end{cases}$$

Для перехода из системы квадратичных уравнений к более простой системе линейных уравнений, введем обозначение: $\omega_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ и, произведя вычитание из верхнего уравнения второго и третьего, а из второго – третьего, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x_2x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{2} \\ x_3x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z = \frac{(\omega_1 - \omega_3)}{2} \\ (x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y + (z_2 - z_3)z = \frac{(\omega_2 - \omega_3)}{2} \end{cases}$$

После вычитания из первого уравнения второго (и сокращения таким образом y), а из второго уравнения – третьего (и сокращения в результате x) можно будет выразить x и y через z :

$$x = a_1z + b_1; \quad y = a_2z + b_2;$$

$$a_1 = \frac{1}{d} [(z_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1)];$$

$$a_2 = -\frac{1}{d} [(z_2 - z_1)x_3 - (z_3 - z_1)x_2];$$

$$b_1 = -\frac{1}{2d} [(\omega_2 - \omega_1)(y_3 - y_1) - (\omega_3 - \omega_1)(y_2 - y_1)];$$

$$b_1 = \frac{1}{2a} [(\omega_2 - \omega_1)x_3 - (\omega_3 - \omega_1)x_2].$$

Затем, подставив x и y , выраженные через z , в уравнение для первой окружности, которая имеет центр в точке J'_1 , получим:

$$d = (y_2 - y_1)x_3 - (y_3 - y_1)x_2,$$

$$(a_1^2 + a_2^2 + 1)z^2 + 2[a_1 + a_2(b_2 - y_1) - z_1]z + [b_1^2 + (b_2 - y_1)^2 + z_1^2 - r_e^2] = 0.$$

Решение этого квадратного уравнения имеет два корня: z_1 и z_2 , из которых выбирается меньший по значению (соответствующий конфигурации с рычагами, направленными вниз). Далее, зная Z , можно вычислить координаты X и Y .

Численный пример решения прямой задачи

Введем обозначения: верхнее основание со стороной f , нижняя платформа со стороной e , длина верхнего плеча рычага – r_f , длина нижнего плеча (длинная сторона параллелограмма) – r_e (рисунок 11). Для вычислений будет использована система координат с точкой отсчета, которая совпадает с центром верхнего треугольника. Ось Z , как и полагается, будет направлена вверх, что приведет к тому, что z -координата подвижной платформы всегда будет отрицательной.

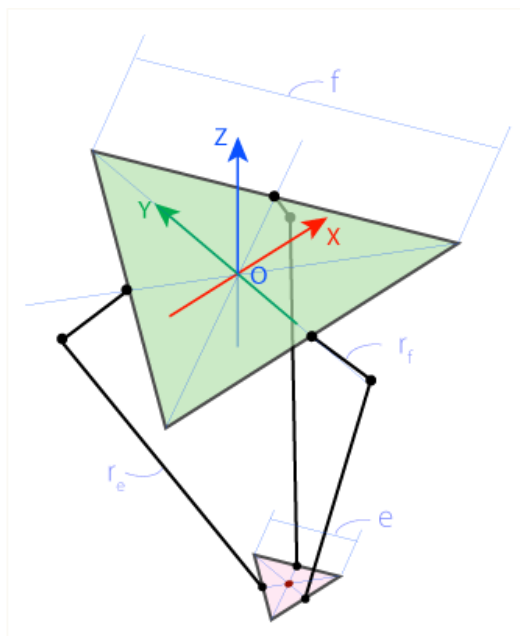


Рис. 11. Условные обозначения

Проведем расчет для робота со следующими параметрами: длина стороны верхнего основания $f = 300$ мм, нижняя платформа со стороной $e = 100$ мм, длина верхнего плеча рычага $r_f = 150$ мм, длина нижнего плеча $r_e = 400$ мм. Заданы углы: $\theta_1 = 25^\circ$; $\theta_2 = 30^\circ$; $\theta_3 = 20^\circ$.

Шаг 1. По геометрии основания и заданным углам вычисляем координаты точек J'_1, J'_2, J'_3 . Например, для $\theta_1 = 25^\circ$: $J'_1 (0; -141,3; 63,4)$.

Шаг 2. По приведенным выше формулам находим коэффициенты a_1, b_1, a_2, b_2 . Для данных значений они составили: $a_1 \approx 0,021$; $b_1 \approx 13,1$; $a_2 \approx -0,015$; $b_2 \approx -9,8$.

Шаг 3. Подставляем коэффициенты и получаем два корня: $z_1 \approx -305,2$; $z_2 \approx -420,7$. Выбираем $z = -305,2$ мм.

Шаг 4. Далее определяем: $x \approx a_1 \cdot (-305,2) + b_1 \approx 6,7$ мм; $y \approx a_2 \cdot (-305,2) + b_2 \approx -5,2$ мм.

Таким образом, координаты центра платформы: $(6,7; -5,2; -305,2)$ мм. Данная последовательность шагов может быть легко алгоритмизирована.

Решение обратной задачи кинематики для описания движения дельта-робота

Обратная задача кинематики заключается в нахождении углов поворота рычагов ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$), необходимых для позиционирования центра платформы в заданной точке (x_0, y_0, z_0) :

$$f(x_0, y_0, z_0) \rightarrow (\theta_1, \theta_2, \theta_3).$$

Эти углы механизм выставит между плоскостью верхнего основания и рычагами, которые закреплены на нем на одноподвижных шарнирах (обеспечивают вращение).

Устройство робота имеет особенность: рычаг F_1J_1 может вращаться только в плоскости YZ , описывая окружность радиусом r_f с центром в точке F_1 . Другая особенность конструкции состоит в том, что в узлах J_1 и E_1 используются универсальные трехподвижные шарниры, обеспечивающие свободное вращение плеча E_1J_1 относительно точки E_1 , с описанием сферы радиусом r_e с центром в точке E_1 (рисунок 12).

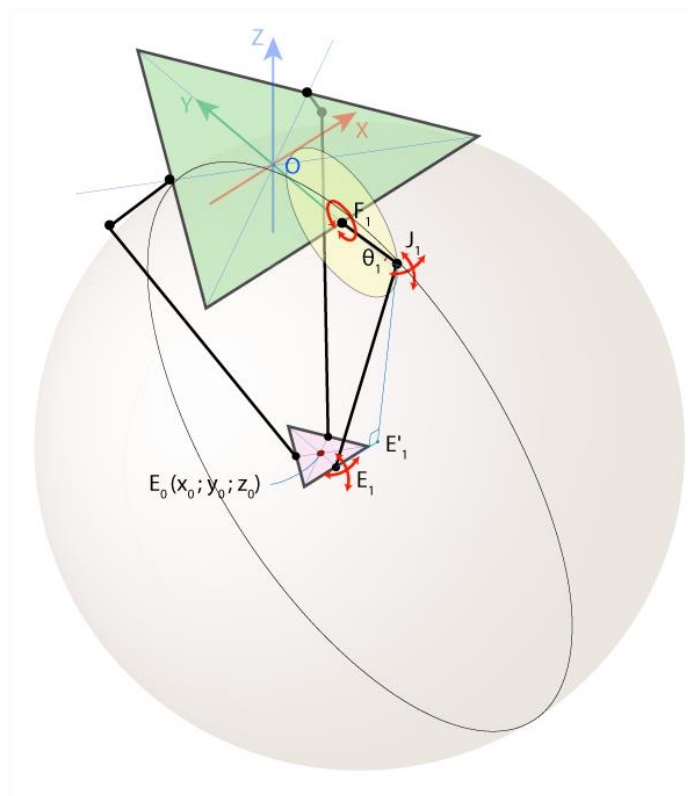


Рис. 12. Сфера, описываемая плечом E_1J_1 вокруг точки E_1 , и окружность, описываемая рычагом F_1J_1

Пересечением полученной сферы и плоскости YZ будет окружность с центром в точке E'_1 и радиусом E'_1J_1 , где точка E'_1 находится как проекция точки E_1 на плоскость YZ . В таком случае точка J_1 будет находиться на пересечении двух окружностей с центрами в точках E'_1 и F_1 , чьи радиусы могут быть определены. Особенность данного построения заключается в следующем: окружности пересекаются в двух точках. Для корректной работы кинематической схемы робота необходимо выбирать точку с меньшей ординатой (y). Данное условие является математическим критерием, обеспечивающим требуемую пространственную ориентацию звеньев манипулятора – такую, при которой они образуют внешний угол. После определения координаты точки J_1 становится возможным найти и угол θ_1 . Для удобства восприятия система будет показана с вида на плоскости YZ (рисунок 13).

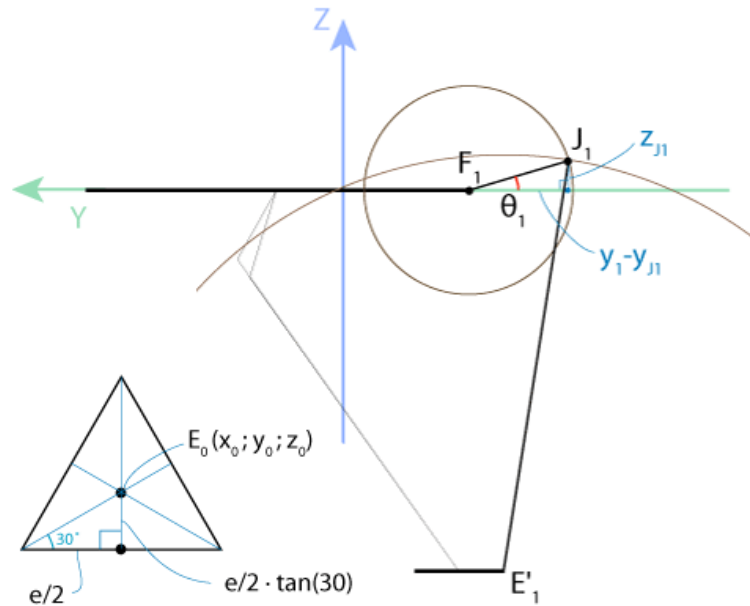


Рис. 13. Система с вида на плоскости YZ

Нижняя платформа является равносторонним треугольником с центром в точке $E_0(x_0, y_0, z_0)$, откуда следует:

$$E_0E_1 = \frac{e}{2} \tan(30^\circ) = \frac{e}{2\sqrt{3}}.$$

Из этого выражения получаются следующие координаты точки E_1 и ее проекции E'_1 на плоскость YZ:

$$E_1 \left(x_0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0 \right) \Rightarrow E'_1 \left(0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0 \right).$$

Расстояние $E_1E'_1 = x_0$, а с учетом теоремы Пифагора:

$$E'_1J_1 = \sqrt{E_1J_1^2 - E_1E'_1^2} = \sqrt{r_e^2 - x_0^2}.$$

Ввиду того, что верхняя платформа является равносторонним треугольником, точка F_1 имеет следующие координаты:

$$F_1 \left(0, \frac{-f}{2\sqrt{3}}, 0 \right).$$

Чтобы найти координаты точки J_1 , которая является пересечением двух окружностей, нужно решить систему уравнений:

$$\begin{cases} (y_{J_1} - y_{F_1})^2 + (z_{J_1} - z_{F_1})^2 = r_f^2 \\ (y_{J_1} - y_{E'_1})^2 + (z_{J_1} - z_{E'_1})^2 = r_e^2 - x_0^2 \end{cases}$$

После подстановки координат центров окружностей приходим к следующему выражению:

$$\begin{cases} \left(y_{J_1} - \frac{f}{2\sqrt{3}} \right)^2 + z_{J_1}^2 = r_f^2 \\ \left(y_{J_1} - y_0 + \frac{e}{2\sqrt{3}} \right)^2 + (z_{J_1} - z_0)^2 = r_e^2 - x_0^2 \end{cases}$$

Если раскрыть скобки и вычесть одно уравнение из другого, можно выразить линейным образом z -координату точки J_1 через y -координату. Затем, подставив ее во второе уравнение, получим квадратное уравнение относительно координаты y , из двух решений которого следует выбрать наименьшее. Это требуется для того, чтобы обеспечить ориентацию плеч рычагов в радиальном направлении (наружу). После этого по координатам точки J_1 можно найти и угол:

$$\theta = \arctan\left(\frac{z_{J_1}}{y_{F_1} - y_{J_1}}\right).$$

Для нахождения углов θ_2 и θ_3 удобно будет воспользоваться симметрией конструкции дельта-робота. Для этого достаточно повернуть систему координат вокруг оси Z на 120° и 240° и применить тот же алгоритм для преобразованных координат целевой точки (рисунок 14).

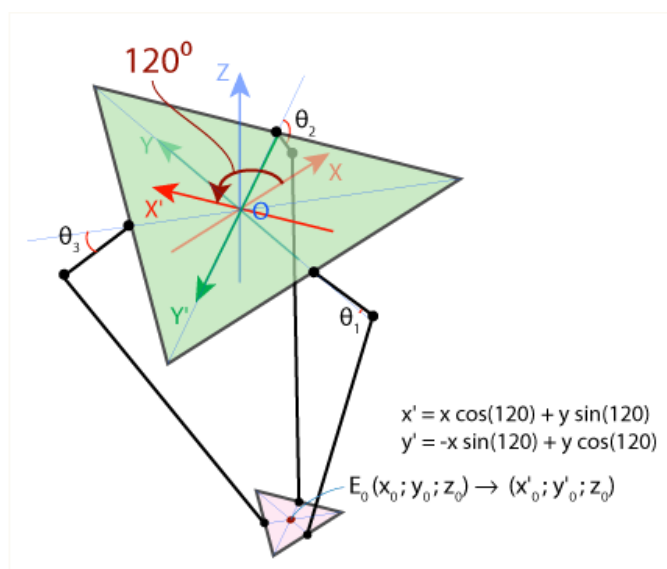


Рис. 14. Нахождение углов $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.

Полученная функция при использовании в программе позволяет получить необходимые углы $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.

Параметры и испытания созданного прототипа

Для верификации математической модели был разработан и собран функциональный прототип дельта-робота (рисунок 15). Его основные технические характеристики приведены ниже.

Кинематические параметры:

- неподвижное (верхнее) основание со стороной f : 300 мм;
- подвижная (нижняя) платформа со стороной e : 100 мм;
- длина приводного рычага (верхнего плеча) r_f : 150 мм;
- длина штанги параллелограмма (нижнего плеча) r_e : 400 мм;

Аппаратные компоненты:

- приводы: три шаговых двигателя NEMA 17;
- шарниры: шаровые, на подшипниках качения ($\varphi_{\max} \approx 30^\circ$);
- система управления: микроконтроллер Arduino Mega 2560;
- рабочий орган: пневматический захват.

Программное обеспечение:

Разработана программа управления на языке C++, обеспечивающая базовые команды позиционирования и работу с захватом. Интерфейс позволяет задавать целевые точки в декартовых координатах, после чего система автоматически вычисляет необходимые углы поворота двигателей [7].

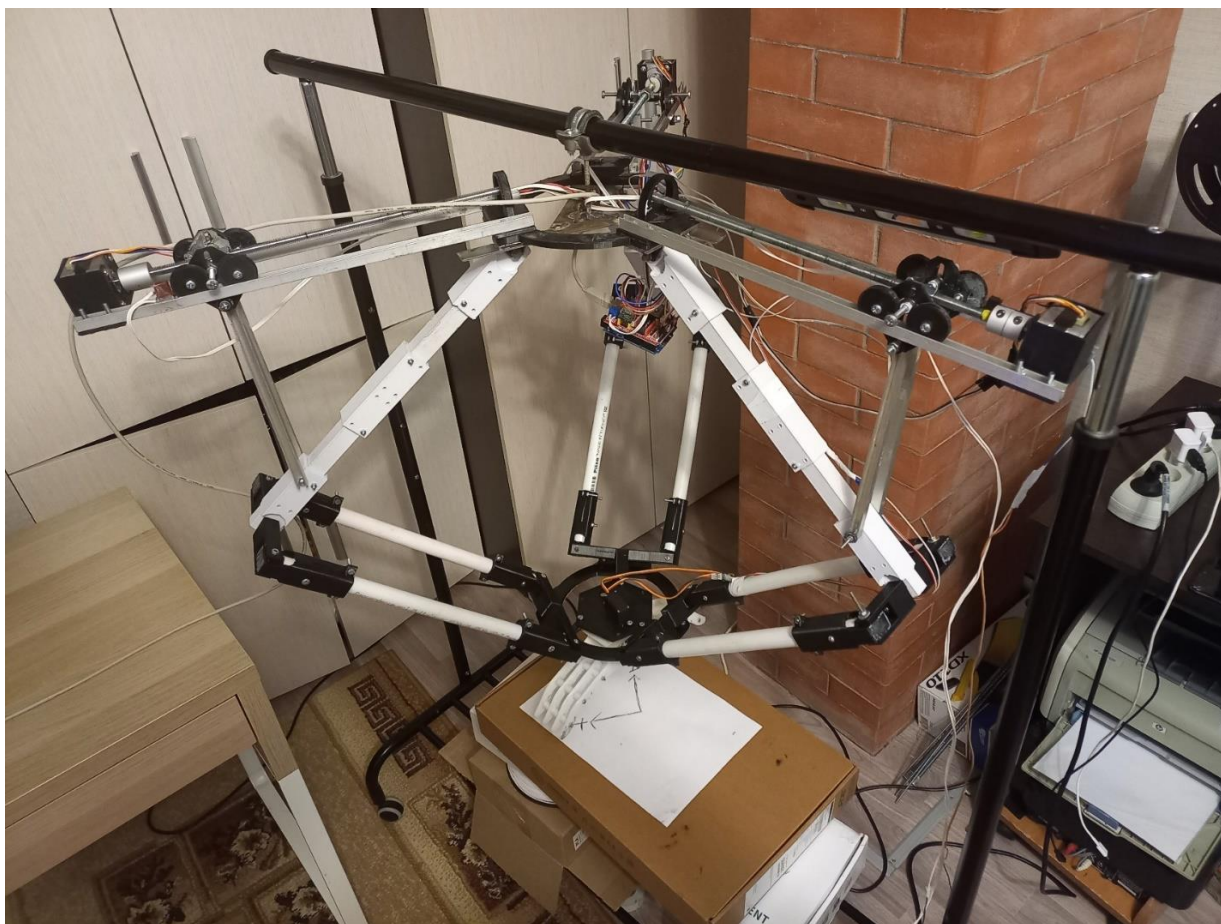


Рис. 15. Внешний вид собранного прототипа

Выводы

Испытания прототипа подтвердили адекватность математической модели. Максимальная скорость перемещения платформы составила около 1 м/с. Точность позиционирования в центральной части рабочей зоны оценивалась в $\pm 0,7$ мм, что удовлетворительно для задач сортировки и упаковки мелких деталей. Экспериментально определенный рабочий объем соответствовал цилиндру диаметром ~ 200 мм и высотой ~ 250 мм, что согласуется с результатами теоретического расчета с учетом ограничений.

В работе представлен комплексный подход к проектированию дельта-робота, включающий математическое моделирование, анализ конструктивных ограничений и практическую реализацию. Полученные результаты демонстрируют, что:

во-первых, выбор типа шарниров существенно влияет на кинематические характеристики: увеличение предельного угла поворота с 22° до 30° позволяет расширить рабочий объем на 10–12 %;

во-вторых, разработанный прототип с конкретными техническими параметрами подтвердил работоспособность примененных расчетных методик;

в-третьих, приведенный численный пример решения прямой задачи кинематики наглядно иллюстрирует применение выведенных формул.

Предложенная методика и конструкция могут служить основой для создания недорогих и эффективных систем автоматизации.

Литература

1. Нахушев Р. С., Шевхужев А. О., Атабаева Д. М., Солодилов В. И. Оптимизация технологии автоматизированной намотки с использованием станка с ЧПУ // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 20–26. DOI: 10.30987/article_5bf3cb4dbfae69.76028868. EDN: VNZOTW

2. Dandekar C. K., Shin Y. C. Modeling of Machining of Composite Materials: A Review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. Vol. 57. PP. 102–121. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006
3. Сапрыкина Н. А., Проскоков А. В., Сапрыкин А. А. Пространственный синтез линейного дельта-робота с параллельной кинематикой // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 47–52. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-1-47-52. EDN: KYVKAD
4. Виноградов С. В., Передистов Е. Ю. Моделирование дельта-автоматизированного устройства // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 г.). Т. 3. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 518–522. EDN: TJSRDV
5. Шалюхин К. А. Построение и анализ пространственных механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.18. М., 2018. 108 с. EDN: RXGZHG
6. Закиров Р. И., Алиев М. И., Морозов А. И. Определение кинематических характеристик дельта-робота по заданным параметрам рабочей области // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 4. С. 11–16. EDN: YQXVHV
7. Виноградов С. В., Передистов Е. Ю. Программа для контроля и управления роботизированной платформой. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023682414. Дата публикации: 25.10.2023. EDN: FVCSEA

Статья поступила 29 апреля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 24 октября 2025 г.
Принята к публикации 04 декабря 2025 г.

Информация об авторах

Виноградов Сергей Витальевич – студент группы ИКТ3-26 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Email: vinogradov.sv@sut.ru

Передистов Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Email: peredistov.eu@sut.ru

Physical and Mathematical Modeling Delta-Automated Device

S. Vinogradov, E. Peredistov ✉

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Statement of the problem: the growth of production volumes in the domestic electronics industry creates a demand for optimizing the work of sorting and packaging sections. One of the promising directions is the introduction of delta-automated devices (delta robots). **The purpose of the work** is the modeling, design, and practical implementation of one type of delta robot. **Methods used:** the work is based on the fundamental principles of physical and mathematical modeling of delta mechanism kinematics. The obtained dependencies can be used at the stages of structural calculation and design of similar systems. **Result:** the designed and assembled device represents one of the varieties of a parallel structure robot. An analysis of theoretical calculations was conducted, the limits of the model's applicability were determined, and practical implementation with experimental verification of the prototype's functionality was carried out.

Key words: delta-automated mechanism, direct kinematics problem, inverse kinematics problem, working area calculation, joint connection

Information about Authors

Vinogradov Sergey – 4 Year Study Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: vinogradov.sv@sut.ru

Peredistov Evgenii – Ph. D. of Engineering Sciences, Head of Department of Physics (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: peredistov.eu@sut.ru