

УДК 621.865

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ВОСЬМИЗВЕННОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ

**Валукевич Ю.А., Наумов И.И., Егорышев Н.Е.**

*Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного  
технического университета в г. Шахты, Шахты, e-mail: naumov\_ivan85@mail.ru*

В настоящее время получили широкое развитие параллельные мехатронные структуры с гибкими звеньями. Манипуляторы на их основе нашли весьма широкое применение в промышленности, медицине, строительстве, а также широко применяются для показа массовых спортивных и культурных мероприятий. В настоящей работе приведена конструкция минимальной базовой параллельной кинематической структуры с гибкими звеньями. Отмечены основные достоинства и недостатки подобного рода конструкций. К числу основных недостатков отнесена однонаправленная жёсткость каждого звена, что приводит к эффекту колебания перемещаемого груза, особенно сильно проявляющемуся при больших значениях абсолютной координаты  $z$ . Для повышения жесткости конструкции и исключения эффекта колебаний исполнительного устройства (в работе – платформа) предложена кинематическая схема манипулятора с восемью гибкими звеньями. Рассмотрены решения прямой и обратной задач кинематики по положению восьмизвального манипулятора с гибкими звеньями для трёх и пяти абсолютных координат. В качестве дополнительных абсолютных координат в настоящей работе приняты углы вращения вокруг осей  $X$  и  $Y$ , проходящие через геометрический центр платформы. Также показаны возможные области применения манипуляторов подобной конструкции.

**Ключевые слова:** мехатронные структуры, манипулятор параллельной структуры, манипулятор с гибкими звеньями, прямая и обратная задачи кинематики

## KINEMATICS OF EIGHT-DIMENSIONAL PARALLEL MANIPULATOR WITH FLEXIBLE LINKS

**Valyukevich Yu.A., Naumov I.I., Egoryshev N.E.**

*Institute of Service and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University in Shakhty,  
Shakhty, e-mail: naumov\_ivan85@mail.ru*

Currently, parallel mechatronic structures with flexible links have been widely developed. Manipulators based on them have found a very wide application in industry, medicine, construction, and are also widely used to show mass sports and cultural events. In this paper, the design of a minimal basic parallel kinematic structure with flexible links is given. The main advantages and disadvantages of this kind of structures are noted. The main disadvantages include the unidirectional stiffness of each link, which leads to the effect of oscillation of the moving load, which is especially pronounced at large values of the absolute coordinate  $z$ . To increase the rigidity of the structure and eliminate the effect of oscillations of the actuator (platform in operation), a kinematic diagram of a manipulator with eight flexible links is proposed. Solutions of direct and inverse problems of kinematics in the position of an eight-link manipulator with flexible links for three and five absolute coordinates are considered. The angles of rotation around the  $X$  and  $Y$  axes passing through the geometric center of the platform are taken as additional absolute coordinates in this work. Possible areas of application of manipulators of this design are also shown.

**Keywords:** mechatronic structures, parallel structure manipulator, flexible link manipulator, direct and inverse kinematics problems

По сравнению с жесткими параллельными манипуляторами (платформа Стюарта), кабельные, или тросовые, параллельные манипуляторы вместо жестких звеньев используют тросы в качестве исполнительных элементов для управления движением исполнительного устройства (схвата). Согласно анализу литературных источников, кабельные роботы сохраняют основные характеристики традиционных манипуляторов, включая потенциально большое пространство, простоту перенатройки и реализации, высокую скорость перемещения и высокое соотношение полезной нагрузки к весу. Благодаря этим особенностям, некоторые приложения доступны в различных областях человеческой деятельности, например в строительстве

зданий и сооружений [1], астрономических наблюдениях [2], службе спасения [3], обслуживании или реабилитации инвалидов, а также в многофункциональных воздушных роботах [3].

Однако тросовый манипулятор также имеет ряд специфических недостатков. Наиболее распространенным является то, что кабель может находиться только в напряжённом состоянии, т.е. кабель должен быть натянут, чтобы получить фиксированное состояние схвата. Кроме того, провисание кабеля должно учитываться в подвесных кабельных параллельных роботах [4, 5]. Применение рассматриваемой в настоящей работе кинематической схемы позволяет убрать большинство недостатков, присущих тросовым манипуляторам.

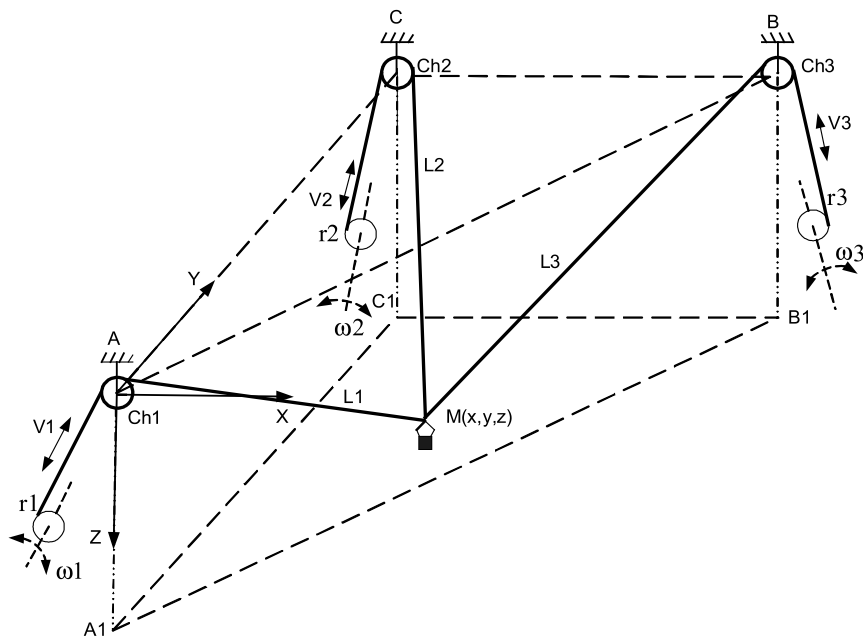


Рис. 1. Кинематическая схема трёхзвенного манипулятора

Цель исследования: разработка тросового манипулятора с улучшенными характеристиками по сравнению с базовой моделью.

#### Материалы и методы исследования

Базовая кинематика манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями представлена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

Ch1, Ch2, Ch3 – опорные шкивы звеньев манипулятора;

L1, L2, L3 – текущие длины (обобщённые координаты) звеньев 1–3 манипулятора соответственно;

r1, r2, r3 – радиусы приведения барабанов, связанных с валами электроприводов звеньев манипулятора;

V1, V2, V4 – линейные скорости обобщённых координат звеньев;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – угловые скорости обобщённых координат звеньев;

M (x, y, z) – абсолютные координаты схвата манипулятора.

Кинематическая структура, представленная на рис. 1, может быть описана следующим образом:

– зона обслуживания манипулятора представлена треугольной призмой ABCA1B1C1;

– нерастяжимые нити, представляющие собой звенья манипулятора, одни концы связаны с барабаном мотор-редуктора электропривода вторые концы нити, проходящие через шкив ch1 ch3, связаны между собой и со столом манипулятора;

– обобщенная координата звена равна расстоянию между точками соединения нитей (точка M (x, y, z)) и точкой схода нити со шкива sh-1 ch3 соответствующего звена;

– в абсолютной системе координат, начало которой совпадает с точкой A, координаты точек A (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>), B (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>), C (x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>, z<sub>3</sub>) известны;

– для кинематической схемы, приведенной на рис. 1, координаты шкивов звеньев соответствуют выражениям

$$x_1 = x_2 = 0, y_1 = 0, y_1 = y_2, z_1 = z_2 = z_3 = 0; \quad (1)$$

– абсолютные координаты положения в зоне обслуживания точки M однозначно определяются величинами обобщённых координат L1÷L3 соответственно.

Уравнения для прямой и обратной задач кинематики подробно рассмотрены в работе [4], там же предложены методы планирования перемещения схвата по заданной траектории.

Основным недостатком базовой модели является эффект колебания перемещаемого груза, особенно сильно проявляющийся при больших значениях абсолютной координаты z.

#### Результаты исследования и их обсуждение

По сравнению с ближайшим аналогом [6] в работе рассмотрены две дополнительные степени свободы платформы и их влияние на вид уравнений для прямой и обратной задач кинематики. На рис. 2 предло-

жена кинематическая схема манипулятора с гибкими звеньями. Зона обслуживания манипулятора представляет собой параллелепипед с длинами рёбер  $X1, Y1, Z1$ , в вершинах которого закреплены мотор-редукторы с барабанами  $M1-M8$ . Звенья манипулятора представлены нерастяжимыми нитями  $L1-L8$ . Один конец каждого звена связан с барабаном мотор-редуктора, второй конец  $L1-L8$  связан с углом платформы  $ABCD$ , причём звенья, связанные с барабанами мотор-редукторов каждого ребра параллелепипеда, попарно крепятся к одно-

му и тому же углу платформы  $ABCD$ . Размеры платформы определены величинами  $AB = CD = a$  и  $AD = BC = b$ . Перемещение платформы в пределах зоны обслуживания достигается за счёт согласованного изменения длины звеньев  $L1-L8$ .

В качестве абсолютных координат принято положение геометрического центра платформы – точка  $M(x, y, z)$ .

Обратная задача кинематики по положению при плоскопараллельном относительно основания или вертикальном перемещении платформы может быть представлена в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} L1 = \sqrt{(x - a/2)^2 + (y - b/2)^2 + (Z1 - z)^2}; \\ L2 = \sqrt{(x - a/2)^2 + (Y1 + b/2 - y)^2 + (Z1 - z)^2}; \\ L3 = \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (Y1 + b/2 - y)^2 + (Z1 - z)^2}; \\ L4 = \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (y - b/2)^2 + (Z1 - z)^2} \\ \\ L5 = \sqrt{(x - a/2)^2 + (y - b/2)^2 + z^2}; \\ L6 = \sqrt{(x - a/2)^2 + (Y1 + b/2 - y)^2 + z^2}; \\ L7 = \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (Y1 + b/2 - y)^2 + z^2}; \\ L8 = \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (y - b/2)^2 + z^2}. \end{array} \right. \quad (2)$$

В соответствии с системой уравнений (2) прямая задача о положении может быть представлена как

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{X1^2 + L2^2 + X1 \cdot a - L3^2}{2 \cdot X1}; \\ y = \frac{Y1^2 + L1^2 + Y1 \cdot b - L2^2}{2 \cdot Y1}; \\ z = \frac{Z1^2 + L5^2 - L1^2}{2 \cdot Z1}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для некоторых приложений могут быть использованы дополнительные степени свободы платформы, а именно на поворот платформы относительно осей  $X, Y$ . Фронтальная проекция манипулятора при вращении платформы вокруг оси  $Y$  представлена на рис. 3.

При этом обратная и прямая задачи кинематики для данного манипулятора несколько видоизменяются. На рис. 3 из всего множества показаны три возможных положения платформы манипулятора, обо-

значенных цифрами 0, 1 и 2. Рабочим положением платформы в рассматриваемом случае является положение 0. При этом появляется дополнительная абсолютная координата  $\varphi$  – угол поворота платформы относительно оси проходящей через центр платформы параллельно оси  $Y$ . Уравнения для прямой задачи кинематики манипулятора для случая, представленного на рис. 3, принимают вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{X1^2 + L2^2 + X1 \cdot a \cdot \text{Cos}\varphi - L3^2}{2 \cdot X1}; \\ y = \frac{Y1^2 + L1^2 + Y1 \cdot b - L2^2}{2 \cdot Y1}; \\ z_1 = \frac{Z1^2 + L5^2 - L1^2}{2 \cdot Z1}; \\ z_2 = \frac{Z1^2 + L8^2 - L4^2}{2 \cdot Z1}; \\ \text{Cos}\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{z_2 - z_1}{a}. \end{array} \right. \quad (4)$$

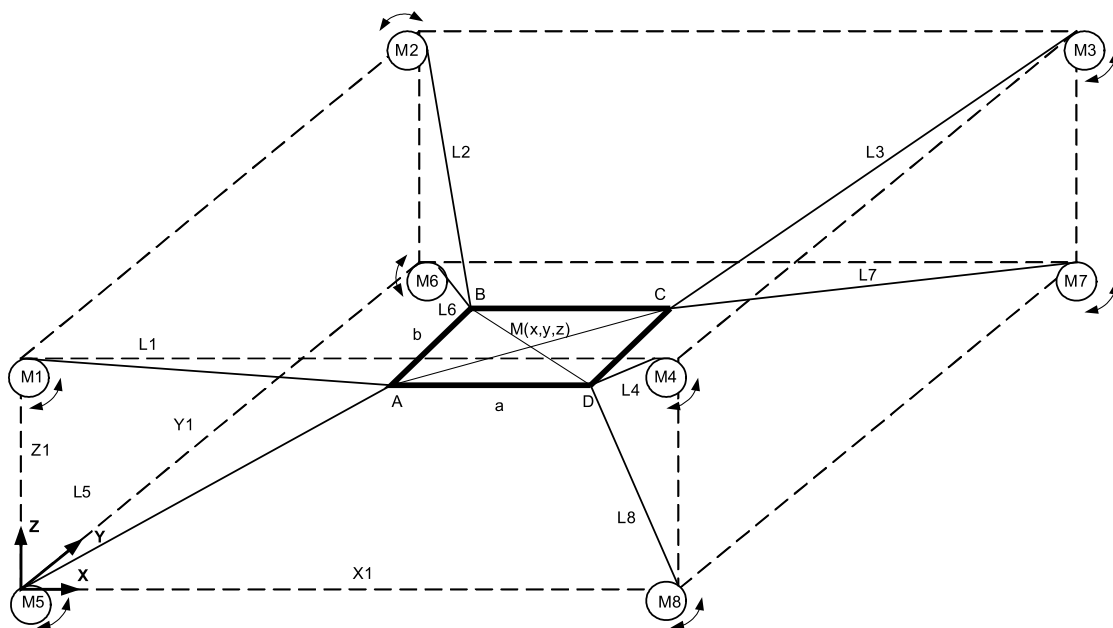


Рис. 2. Кинематическая схема восьмизвенного манипулятора

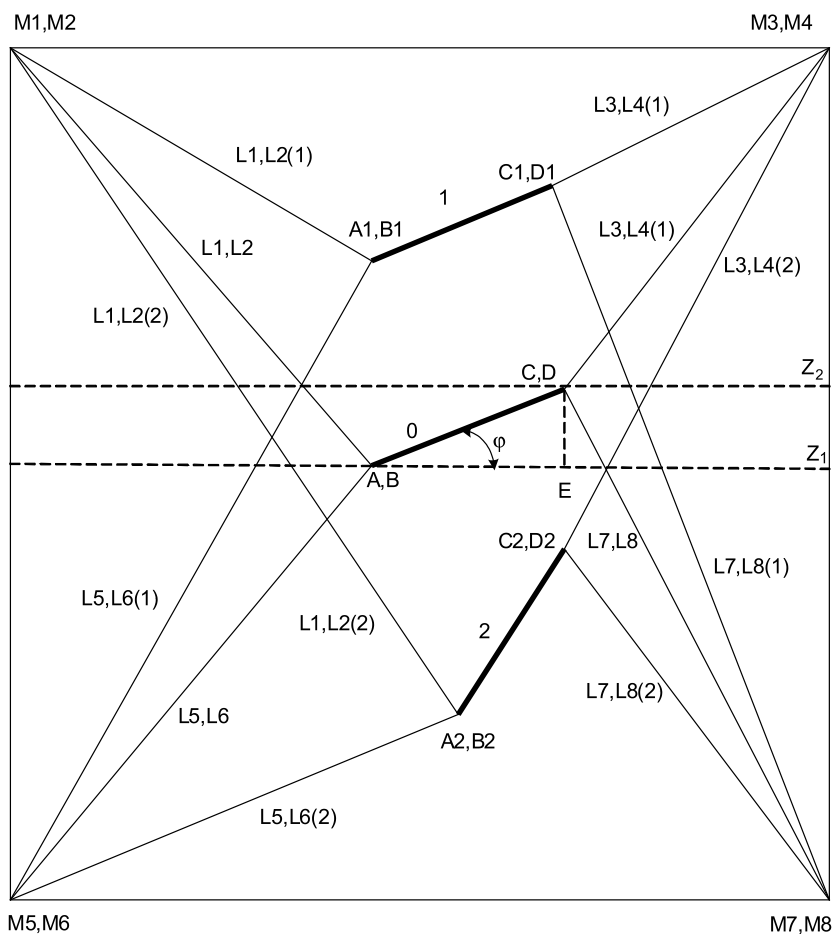


Рис. 3. Фронтальная проекция кинематической схемы восьмизвенного манипулятора

При вращении платформы относительно оси X используется абсолютная угловая координата  $\alpha$  и система уравнений для прямой задачи кинематики принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{X1^2 + L2^2 + X1 \cdot a - L3^2}{2 \cdot X1}; \\ y = \frac{Y1^2 + L1^2 + Y1 \cdot b \cdot \text{Cos}\alpha - L2^2}{2Y1}; \\ z_1 = \frac{Z1^2 + L5^2 - L1^2}{2 \cdot Z1}; \\ z_2 = \frac{Z1^2 + L6^2 - L2^2}{2 \cdot Z1}; \\ \text{Cos}\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{z_2 - z_1}{a}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Перемещения платформы с одновременным использованием обеих угловых координат обычно на практике не находят применения.

Система уравнений для обратной задачи кинематики для случая, приведенного на рис. 3 (поворот платформы против часовой стрелки), принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} L1 = \sqrt{\left(x - \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(Z1 - \frac{z_2 - z_1}{2} - z\right)^2}; \\ L2 = \sqrt{\left(x - \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2}\right)^2 + \left(Y1 + \frac{b}{2} - y\right)^2 + \left(Z1 - \frac{z_2 - z_1}{2} - z\right)^2}; \\ L3 = \sqrt{\left(X1 + \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2} - x\right)^2 + \left(Y1 + \frac{b}{2} - y\right)^2 + \left(Z1 + \frac{z_2 - z_1}{2} - z\right)^2}; \\ L4 = \sqrt{\left(X1 + \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2} - x\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(Z1 + \frac{z_2 - z_1}{2} - z\right)^2}; \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L5 = \sqrt{\left(x - \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2}; \\ L6 = \sqrt{\left(x - \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2}\right)^2 + \left(Y1 + \frac{b}{2} - y\right)^2 + \left(z - \frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2}; \\ L7 = \sqrt{\left(X1 + \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2} - x\right)^2 + \left(Y1 + \frac{b}{2} - y\right)^2 + \left(z + \frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2}; \\ L8 = \sqrt{\left(X1 + \frac{a \cdot \text{Cos}\varphi}{2} - x\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(z + \frac{z_2 - z_1}{2}\right)^2}. \end{array} \right.$$

При повороте платформы относительно оси Y в сторону, противоположную показанной на рис. 3, знак при переменной  $\frac{z_2 - z_1}{2}$  в уравнении 6 меняется на противоположный.

При повороте платформы относительно оси X система уравнений для обратной задачи кинематики может быть представлена как

$$\left\{ \begin{aligned} L1 &= \sqrt{(x - a/2)^2 + (y - b \cdot \text{Cos}\alpha/2)^2 + (Z1 - \frac{z_2 - z_1}{2} - z)^2}; \\ L2 &= \sqrt{(x - a/2)^2 + (Y1 + b \cdot \text{Cos}\alpha/2 - y)^2 + (Z1 + \frac{z_2 - z_1}{2} - z)^2}; \\ L3 &= \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (Y1 + b \cdot \text{Cos}\alpha/2 - y)^2 + (Z1 + \frac{z_2 - z_1}{2} - z)^2}; \\ L4 &= \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (y - b \cdot \text{Cos}\alpha/2)^2 + (Z1 - \frac{z_2 - z_1}{2} - z)^2}; \\ \\ L5 &= \sqrt{(x - a/2)^2 + (y - b \cdot \text{Cos}\alpha/2)^2 + (z - \frac{z_2 - z_1}{2})^2}; \\ L6 &= \sqrt{(x - a/2)^2 + (Y1 + b \cdot \text{Cos}\alpha/2 - y)^2 + (z + \frac{z_2 - z_1}{2})^2}; \\ L7 &= \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (Y1 + b \cdot \text{Cos}\alpha/2 - y)^2 + (z + \frac{z_2 - z_1}{2})^2}; \\ L8 &= \sqrt{(X1 + a/2 - x)^2 + (y - b \cdot \text{Cos}\alpha/2)^2 + (z - \frac{z_2 - z_1}{2})^2}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что ввиду односторонней жесткости звена манипулятора на дополнительные обобщенные координаты (углы поворота вокруг осей X и Y) накладываются определенные ограничения, а именно на угол между плоскостью платформы и векторами обобщенных координат не может превышать значения равного  $\pi$ . На рис. 3 это ограничение представлено положениями платформы 2 и 3.

Для представленной кинематической схемы была разработана двухуровневая система управления. Нижний уровень иерархии представлен восемью идентичными САУ вентильно-синхронных двигателей привода звеньев. САУ реализованы с помощью электронных модулей на базе микроконтроллеров семейства STM и драйверов управления вентильно-синхронными двигателями.

Верхний уровень иерархии системы управления реализован программным способом на базе ПК. Все элементы системы управления манипулятором объедине-

ны в единую сеть с помощью интерфейса Ethernet, работающую по протоколу UDP.

Всё программное обеспечение написано на языке C (ПК, STM). Экранные копии пользовательского интерфейса информационно-управляющей оболочки представлены на рис. 4, 5. Пользовательский интерфейс содержит таблицу параметров обобщенных координат, таблицу параметров истинных координат клавиши управления и графические окна, показывающие истинное положение платформы в фронтальной и горизонтальной проекциях.

В представленном варианте ПО координаты и угловое положение задаются непосредственной записью необходимых значений в соответствующий столбец таблицы истинных координат. Скорость перемещения по траектории жестко задана в программном коде. В последующем планируется ввод произвольной скорости и ввод траектории из файла в G-кодах. После инициализации клавиши «Пуск» информацион-

но-управляющая оболочка переходит в режим управления перемещением платформы манипулятора. При этом ПК через заданные промежутки времени, определяемые заданной линейной скоростью платформы,

на основе решения прямой и обратной задач (уравнения (4)–(7)) на САУ каждого звена по интерфейсу передаёт текущее значение приращения по каждой из обобщённых координат.

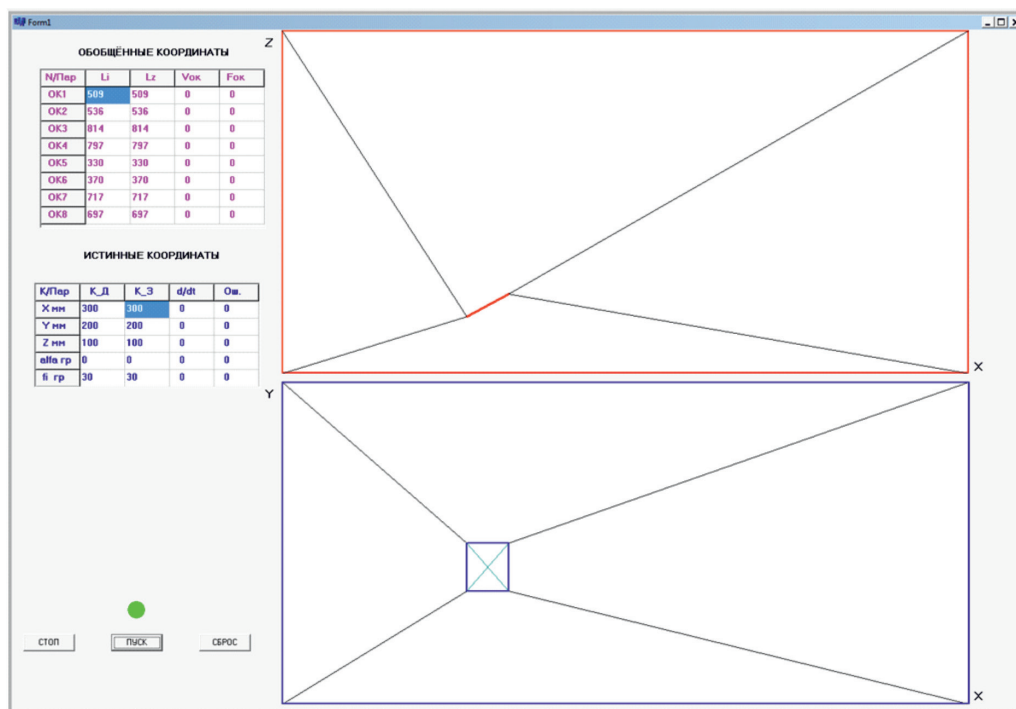


Рис. 4. Экранная копия интерфейса – перемещение с поворотом относительно оси Y

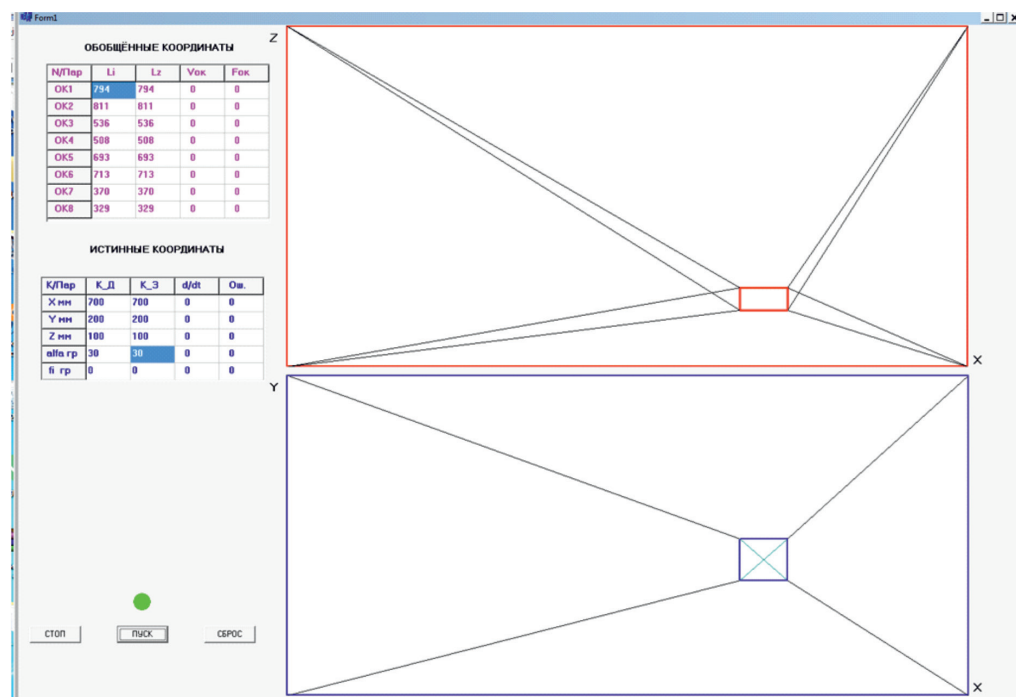


Рис. 5. Экранная копия интерфейса – перемещение с поворотом относительно оси X



В работе [7] приведена методика расчёта пошаговых приращений. При достижении заданного положения перемещение прекращается. В процессе перемещения все параметры обобщённых и истинных координат отображаются в соответствующих таблицах, истинное положение платформы отображается на графических панелях экранного интерфейса.

Предварительные тестовые испытания (без механической части) показали полную работоспособность устройства. Точность позиционирования по каждой из координат составила  $\pm 2$  дискреты углового положения барабана.

Результаты натурных испытаний системы управления восьмизвенным манипулятором параллельной структуры показали их полную адекватность представленной математической модели.

### Заключение

В работе рассмотрен базовый вариант манипулятора параллельной кинематической структуры. Отмечен основной недостаток базовой модели – эффект колебания перемещаемого груза.

Предложена кинематическая схема восьмизвенного манипулятора параллельной структуры с шестью абсолютными координатами. Приведены системы уравнений для решения прямой и обратной задач кинематики подобного манипулятора.

Приведено краткое описание системы управления манипулятором и результаты её тестирования.

Предложенное в работе техническое решение может быть использовано при технической реализации 3D принтера с рабочей зоной до 10 м, а также для перемещения сыпучих грузов.

### Список литературы

1. Albus J.S., Bostelman R.V., Dagalakis N.G. The NIST ROBOCRANE. A Robot Crane. *Journal of Robotic Systems*. 1992. Vol. 5. No. 10.
2. Du J., Ding W., Bao H. Cable vibration analysis for large workspace cable-driven parallel manipulators. In: *Cable-Driven Parallel Robots*. Springer. Berlin. 2013. No. 437–449.
3. Bai G., Ge Y., Soby D., Leavitt B., Stoerger V., Kirchgessner N., Irmak S., Graef G., Schnable J., Awada T. NUSpidercam: A large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research. *Comput. Electron. Agric.* 2019. Vol. 160. No. 71–81.
4. Валюкевич Ю.А., Алепо А.В. Планирование траектории перемещения манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях (ч. 1) // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 6 (159). С. 168–175.
5. Tang X., Liu Z., Shao Z., Wang L. Self-excited vibration analysis for the feed support system in fast. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014. Vol. 4. No. 11. P. 63.
6. Zelensky A., Dubovskov V., Kuptsov V. Investigation of the configuration of a parallel manipulator for additive manufacturing of solid structures. *IOP Conference Series: Materials Science & Engineering*. 2020. V. 747. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012095.
7. Валюкевич Ю.А., Дубовсков В.В., Нуждяк А.В., Козырев П.А. Исследование системы планирования траектории манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 5–2. С. 278–282.