УДК 621.865

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СХВАТА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НА ГРУЗ ВНЕШНЕЙ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СИЛЫ

Валюкевич Ю.А., Алепко А.В., Яковенко Д.М., Дубовсков В.В.

ФГБОУ ВПО «Институт сферы обслуживания и предпринимательства» (филиал), Донской государственный технический университет, Шахты, e-mail: mail@sssu.ru

В работе рассматривается математическая модель структуры манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях. Рассматриваемая структура манипулятора с подвесом схвата на гибких связях конструктивно состоит из четырех канатов, одни концы которых соединены в точке крепления схвата, другие концы канатов пропущены через шкивы и закреплены на барабанах. По измеренным значениям полных усилий в звеньях параллельного манипулятора и использованию полученных аналитических выражений, возможно, определить направление и величину вектора внешней возмущающей силы, прикладываемой к точке крепления нагруженного схвата. Определены скорости изменения обобщенных координат при движении нагруженного схвата манипулятора вдоль отрезка прямой с постоянной линейной скоростью. Для проверки адекватности полученной математической модели с использованием среды Matlab была разработана компьютерная модель.

Ключевые слова: манипулятор, тросовый, гибкие связи, параллельный манипулятор, перемещение груза

DEFINING THE PARAMETERS OF MOVEMENT GRIPPER PARALLEL MANIPULATOR WITH FLEXIBLE LINKS UNDER THE INFLUENCE OF THE LOAD ON THE EXTERNAL DISTURBING FORCE

Valyukevich Y.A., Alepko A.V., Yakovenko D.M., Dubovskov V.V.

Institute of the Service Sector and Entrepreneurship (branch), Don State Technical University, Shakhty, e-mail: mail@sssu.ru

In this paper received the mathematical model of the structure of manipulator with the suspension gripper on flexible links. Consider the structure of the manipulator with suspension capture on flexible connections constructively consists of four ropes, one end of which is connected to an anchor point gripper, the other ends of the ropes passed through pulleys mounted on drums. Based measured values of the total effort in the links of the parallel structure manipulator and use of analytical expressions may determine the direction and magnitude of the vector of external perturbing forces applied to the anchor point of the loaded gripper. Identified the rates of change of the generalized coordinates when moving along a line segment with a constant linear velocity. To test the adequacy of the obtained mathematical models using Matlab environment was developed a computer model.

Keywords: manipulator, rope, flexible communication, parallel manipulator, the movement

Манипуляторы параллельной структуры находят все большее применения в отраслях промышленности в таких странах, как Япония, США, Китай, при выполнении различных работ. Это связано с их положительными свойствами: маштабируемостью, хорошим соотношением полезной нагрузки к массе гибких связей манипулятора [1, 4].

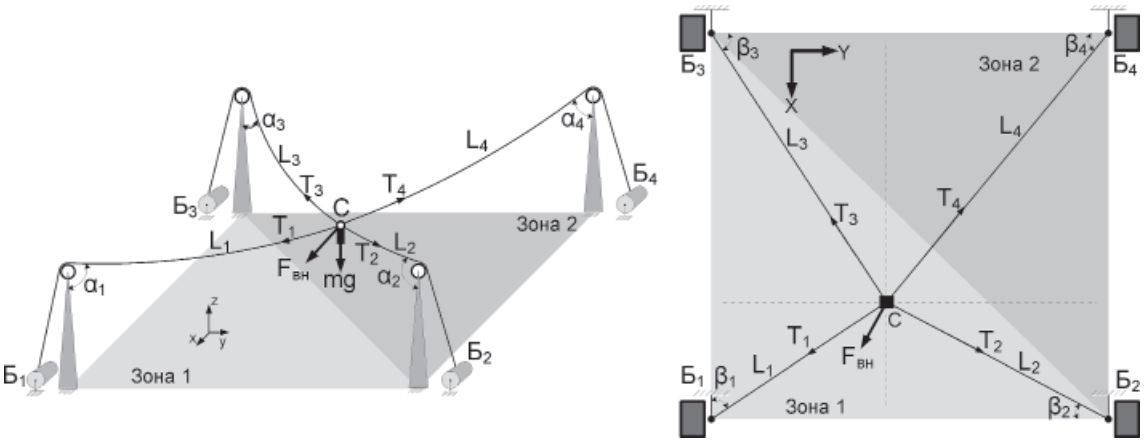
Требуется определить параметры движения нагруженного схвата параллельного манипулятора с гибкими звеньями, вызванного действием внешней возмущающей силы, обозначенной как $F_{вн}$ на рис. 1.

Известно, что действие веса груза mg создает в звеньях параллельного манипулятора усилия, обозначенные через T_1, T_2, T_3, T_4 на рис. 1.

В работе [2, 3] получены уравнения, позволяющие рассчитать значение усилий в звеньях манипулятора в зависимости от положения нагруженного. Добавив к данным уравнениям вектор внешней возмущающей силы $F_{вн}$, получим

$$\begin{cases}(T_1+\Delta T_1)\cdot\sin\alpha_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\sin\alpha_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\sin\alpha_3=mg+F_{внZ},\\(T_1+\Delta T_1)\cdot\cos\alpha_1\cdot\cos\beta_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\sin\beta_2-(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\sin\beta_3=F_{внX},\\-(T_1+\Delta T_1)\cdot\cos\alpha_1\cdot\sin\beta_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\cos\beta_2-(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\cos\beta_3=F_{внY};\end{cases}\quad(1)$$

$$\begin{cases}(T_2+\Delta T_2)\cdot\sin\alpha_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\sin\alpha_3+(T_4+\Delta T_4)\cdot\sin\alpha_4=mg+F_{внZ},\\(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\sin\beta_2-(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\sin\beta_3-(T_4+\Delta T_4)\cdot\cos\alpha_4\cdot\sin\beta_4=F_{внX},\\(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\cos\beta_2-(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\cos\beta_3+(T_4+\Delta T_4)\cdot\cos\alpha_4\cdot\cos\beta_4=F_{внY}.\end{cases}\quad(2)$$



а б

Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса распределения усилий в звеньях параллельного манипулятора: а – общий вид; б – в плоскости XOY; где $Б_1$, $Б_2$, $Б_3$, $Б_4$ – барабаны, осуществляющие изменение длины звеньев манипулятора; P_1, P_2, P_3, P_4 – ролики; C – схват с грузом; mg – вектор силы тяжести

В уравнениях (1) и (2) T_1, T_2, T_3, T_4 – измеренные значения усилий в соответствующих звеньях манипулятора при отсутствии внешней возмущающей силы $F_{вн}$, которая представлена в виде проекций на оси декартовой системы координат $F_{внX}$, $F_{внY}$, $F_{внZ}$; ΔT_1, ΔT_2, ΔT_3, ΔT_4 – приращения усилий в звеньях манипулятора, вызванные действием внешней возмущающей силы $F_{вн}$. Коэффициенты $\sin\alpha_1$, $\sin\alpha_2$, $\sin\alpha_3$, $\sin\alpha_4$, $\cos\alpha_1$, $\cos\alpha_2$, $\cos\alpha_3$, $\cos\alpha_4$, $\sin\beta_1$, $\sin\beta_2$, $\sin\beta_3$, $\sin\beta_4$, $\cos\beta_1$, $\cos\beta_2$, $\cos\beta_3$, $\cos\beta_4$ получены с использованием методом элементарной геометрии [5].

Выразив искомые компоненты вектора внешней возмущающей силы $F_{вн}$ ($F_{внX}$, $F_{внY}$, $F_{внZ}$) из уравнений (1), (2), получим следующие аналитические формулы:

$$\begin{cases} F_{внZ} = (T_1 + \Delta T_1)\cdot \sin\alpha_1 + (T_2 + \Delta T_2)\cdot \sin\alpha_2 + (T_3 + \Delta T_3)\cdot \sin\alpha_3 - mg, \\ F_{внX} = (T_1 + \Delta T_1)\cdot \cos\alpha_1 \cdot \cos\beta_1 + (T_2 + \Delta T_2)\cdot \cos\alpha_2 \cdot \sin\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3)\cdot \cos\alpha_3 \cdot \sin\beta_3, \\ F_{внY} = -(T_1 + \Delta T_1)\cdot \cos\alpha_1 \cdot \sin\beta_1 + (T_2 + \Delta T_2)\cdot \cos\alpha_2 \cdot \cos\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3)\cdot \cos\alpha_3 \cdot \cos\beta_3; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_{внZ} = (T_2 + \Delta T_2)\cdot \sin\alpha_2 + (T_3 + \Delta T_3)\cdot \sin\alpha_3 + (T_4 + \Delta T_4)\cdot \sin\alpha_4 - mg, \\ F_{внX} = (T_2 + \Delta T_2)\cdot \cos\alpha_2 \cdot \sin\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3)\cdot \cos\alpha_3 \cdot \sin\beta_3 - (T_4 + \Delta T_4)\cdot \cos\alpha_4 \cdot \sin\beta_4, \\ F_{внY} = (T_2 + \Delta T_2)\cdot \cos\alpha_2 \cdot \cos\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3)\cdot \cos\alpha_3 \cdot \cos\beta_3 + (T_4 + \Delta T_4)\cdot \cos\alpha_4 \cdot \cos\beta_4. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, по измеренным значениям полных усилий в звеньях параллельного манипулятора и использованию полученных аналитических выражений (3) и (4) возможно определить направление и величину вектора внешней возмущающей силы, прикладываемой к точке крепления нагруженного схвата.

При решении данной задачи примем допущение о том, что приложенное к точке крепления схвата с грузом внешнее возмущающее воздействие в виде силы $F_{вн}$ не изменяет своей величины, а также направления действия. В этом случае нагруженный схват манипулятора будет перемещаться по линейной траектории из точки $M_{нач}(x_{нач}, y_{нач}, z_{нач})$ в точку $M_{кон}(x_{кон}, y_{кон}, z_{кон})$ с постоянной линейной скоростью, определяемой величиной внешней возмущающей силы $F_{вн}$. Так как координаты ($x_{нач}$, $y_{нач}$, $z_{нач}$) точки $M_{нач}$, определяющей начало отрезка линейной траектории движения нагруженного схвата известны, то координаты ($x_{кон}$, $y_{кон}$, $z_{кон}$) точки $M_{кон}$ можно вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} x_{кон} = x_{нач} + S\cdot F_{внXнорм}, \\ y_{кон} = y_{нач} + S\cdot F_{внYнорм}, \\ z_{кон} = z_{нач} + S\cdot F_{внZнорм}, \end{cases} \quad (5)$$

где – величина пути, пройденного схватом с грузом, на протяжении которого действовала внешняя возмущающая сила $F_{вн}$,

$F_{внXнорм}$, $F_{внYнорм}$, $F_{внZнорм}$ – нормированные компоненты вектора $F_{вн}$, определяемые как

$$\begin{cases} F_{внXнорм} = \dfrac{F_{внX}}{|F_{вн}|}, \\ F_{внYнорм} = \dfrac{F_{внY}}{|F_{вн}|}, \\ F_{внZнорм} = \dfrac{F_{внZ}}{|F_{вн}|}. \end{cases} \quad (6)$$

Когда ведущей координатой является координата x, ведомые координаты y и z могут быть вычислены по следующим уравнениям:

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{y_{кон} - y_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + y_{нач} \\ \dfrac{z_{кон} - z_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + z_{нач} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $x_{нач} \le x \le x_{кон}$. Если ведущей является координата y, то ведомые координаты x и z могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{x_{кон} - x_{нач}}{y_{кон} - y_{нач}}(y - y_{нач}) + x_{нач} \\ \dfrac{z_{кон} - z_{нач}}{y_{кон} - y_{нач}}(y - y_{нач}) + z_{нач} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $y_{нач} \le y \le y_{кон}$. По аналогии с (7) и (8), если ведущей является координата z, то ведомые координаты x и y можно найти из уравнений

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{x_{кон} - x_{нач}}{z_{кон} - z_{нач}}(z - z_{нач}) + x_{нач} \\ \dfrac{y_{кон} - y_{нач}}{z_{кон} - z_{нач}}(z - z_{нач}) + y_{нач} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $z_{нач} \le z \le z_{кон}$. Подставив (8) в (3), получим закон изменения обобщенных координат $L1$, $L2$, $L3$ и $L4$ вдоль линейной траектории, заданной двумя точками $M_{нач}$ и $M_{кон}$ в пространстве:

$$\begin{pmatrix} L1(x) \\ L2(x) \\ L3(x) \\ L4(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x1-x)^2 + \left(\dfrac{y_{кон} - y_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + y_{нач} - y1\right)^2 + \left(z1 - \dfrac{z_{кон} - z_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + z_{нач}\right)^2} \\ \sqrt{(x2-x)^2 + \left(\dfrac{y_{кон} - y_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + y_{нач} - y2\right)^2 + \left(z2 - \dfrac{z_{кон} - z_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + z_{нач}\right)^2} \\ \sqrt{(x-x3)^2 + \left(\dfrac{y_{кон} - y_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + y_{нач} - y3\right)^2 + \left(z3 - \dfrac{z_{кон} - z_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + z_{нач}\right)^2} \\ \sqrt{(x-x4)^2 + \left(\dfrac{y_{кон} - y_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + y_{нач} - y4\right)^2 + \left(z4 - \dfrac{z_{кон} - z_{нач}}{x_{кон} - x_{нач}}(x - x_{нач}) + z_{нач}\right)^2} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для определения скорости изменения обобщенных координат $v1$, $v2$, $v3$ и $v4$ при движении нагруженного схвата манипулятора вдоль отрезка прямой с постоянной линейной скоростью v используем векторный метод, сущность которого поясняет рис. 2.

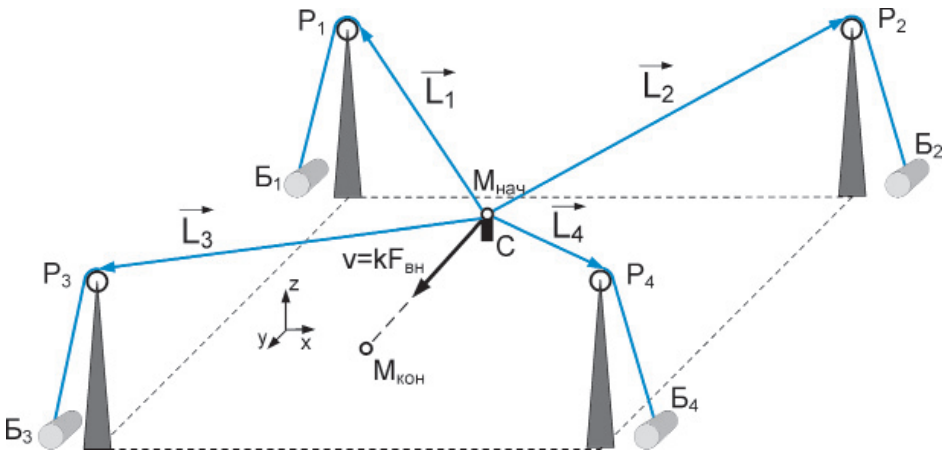


Рис. 2. Схема к задаче о нахождении обобщенных скоростей

При использовании векторного подхода звенья манипулятора представим в виде векторов $\overrightarrow{L1}$, $\overrightarrow{L2}$, $\overrightarrow{L3}$ и $\overrightarrow{L4}$, величина которых является нормированной относительно длин звеньев. Тогда координаты данных векторов можно определить по формулам

$$\begin{pmatrix} L1_X \\ L1_y \\ L1_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{x-x1}{L1(x)} \\ \dfrac{y-y1}{L1(x)} \\ \dfrac{z-z1}{L1(x)} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} L2_X \\ L2_y \\ L2_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{x-x2}{L2(x)} \\ \dfrac{y-y2}{L2(x)} \\ \dfrac{z-z2}{L2(x)} \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} L3_X \\ L3_y \\ L3_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{x-x3}{L3(x)} \\ \dfrac{y-y3}{L3(x)} \\ \dfrac{z-z3}{L3(x)} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} L4_X \\ L4_y \\ L4_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{x-x4}{L4(x)} \\ \dfrac{y-y4}{L4(x)} \\ \dfrac{z-z4}{L4(x)} \end{pmatrix}.$$

Используя известные методы аналитической геометрии, величины обобщенных скоростей $v1$, $v2$, $v3$ и $v4$ определим как проекции вектора линейной скорости v на вектора $\overrightarrow{L1}$, $\overrightarrow{L2}$, $\overrightarrow{L3}$, $\overrightarrow{L4}$, то есть

$$\begin{pmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{(L1_X \cdot kF_{\text{вн}X}) + (L1_Y \cdot kF_{\text{вн}Y}) + (L1_Z \cdot kF_{\text{вн}Z})}{\sqrt{kF_{\text{вн}X}^2 + kF_{\text{вн}Y}^2 + kF_{\text{вн}Z}^2}} \\ \dfrac{(L2_X \cdot kF_{\text{вн}X}) + (L2_Y \cdot kF_{\text{вн}Y}) + (L2_Z \cdot kF_{\text{вн}Z})}{\sqrt{kF_{\text{вн}X}^2 + kF_{\text{вн}Y}^2 + kF_{\text{вн}Z}^2}} \\ \dfrac{(L3_X \cdot kF_{\text{вн}X}) + (L3_Y \cdot kF_{\text{вн}Y}) + (L3_Z \cdot kF_{\text{вн}Z})}{\sqrt{kF_{\text{вн}X}^2 + kF_{\text{вн}Y}^2 + kF_{\text{вн}Z}^2}} \\ \dfrac{(L4_X \cdot kF_{\text{вн}X}) + (L4_Y \cdot kF_{\text{вн}Y}) + (L4_Z \cdot kF_{\text{вн}Z})}{\sqrt{kF_{\text{вн}X}^2 + kF_{\text{вн}Y}^2 + kF_{\text{вн}Z}^2}} \end{pmatrix}, \tag{11}$$

где k – некоторый постоянный коэффициент передачи, связывающий величину внешней возмущающей силы $F_{\text{вн}}$ и линейной скорости движения нагруженного схвата манипулятора v.

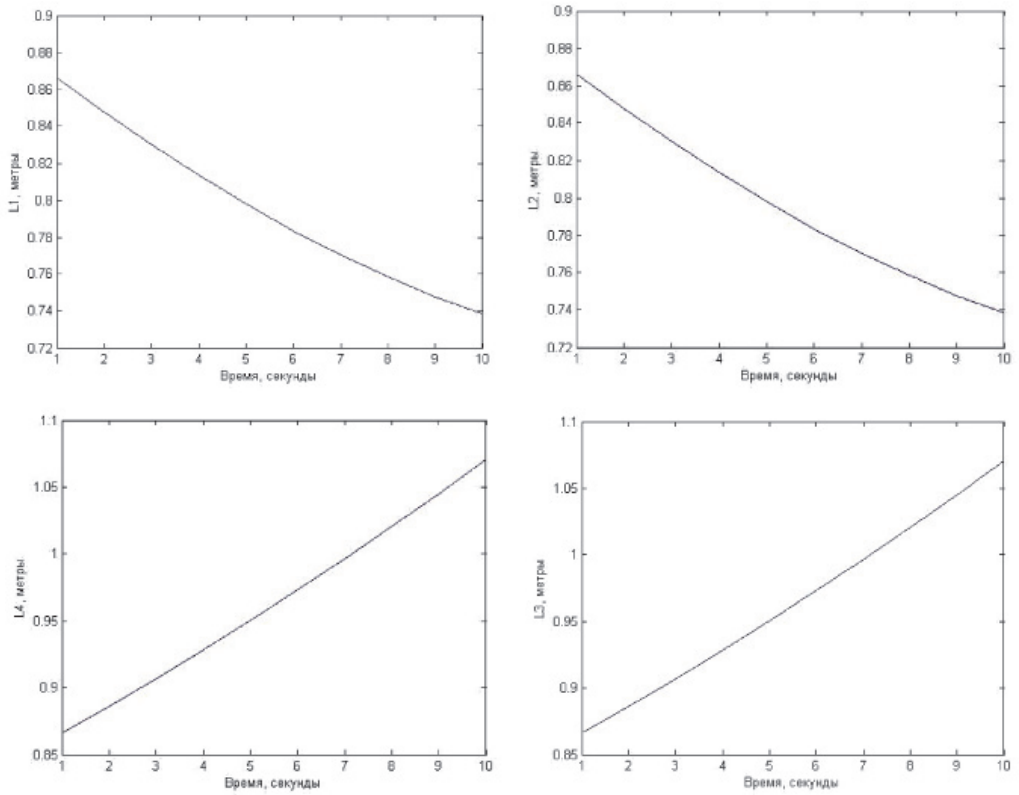


Рис. 3. Изменение длин тросов для перемещения нагруженного схвата согласно заданному вектору внешней силы

Для проверки адекватности полученной математической модели с использованием среды Matlab 7.11.0 (R2010b) была разработана компьютерная модель, позволяющая для заданной конфигурации параллельного манипулятора (координатам установки вертикальных колонн ($x1$, $y1$, z1), ($x2$, $y2$, z2), ($x3$, $y3$, z3), ($x4$, $y4$, z4)), веса груза mg, его начальным координатам ($x_{нач}$, $y_{нач}$, $z_{нач}$), а также величинам приращения усилий в его звеньях ΔT_1, ΔT_2, ΔT_3, ΔT_4, вызванным воздействием внешней возмущающей силы $F_{вн}$, рассчитать координаты вектора $F_{вн}$, а также изменение длин и скоростей обобщенных координат при движении нагруженного схвата вдоль линейной траектории, определяемой величиной и направлением силы $F_{вн}$.

Результаты компьютерного моделирования для случая, когда вертикальные колонны установлены в точках P_1(1; 0; 1), P_2(1; 1; 1), P_3(0; 0; 1), P_4(0; 1; 1), вес груза mg = 1, координаты точки, определяющей его начальное положение в пространстве $M_{нач}$ (0,5;0,5;0,5), вектор внешней возмущающей силы направлен параллельно плоскости XOY и величины приращений $\Delta T_1 = 0{,}87$, $\Delta T_2 = 0{,}015$, $\Delta T_3 = -0{,}85$, $\Delta T_4 = 0$, представлены на рисунках.

В настоящей статье приведена математическая модель, позволяющая определить вектор внешней возмущающей силы по величине усилий в звеньях параллельного манипулятора. В результате полученных систем нелинейных уравнений математическая модель позволяет отслеживать усилие не только в горизонтальной плоскости, но также в любом 3D направлении. Также данная система позволит в режиме реального времени отслеживать текущее внешнее усилие и регулировать скорость перемещения груза. В среде Matlab была разработана компьютерная модель. В результате моделирования получены результаты, которые свидетельствуют об адекватной полученной математической модели.

Данные исследования могут быть использованы при проектировании САУ данного манипулятора с целью транспортировки груза за счет прямого влияния на процесс перемещения. влияния на процесс перемещения.

Работа выполнена в рамках гранта (проекта) РФФИ 14-08-31484.

Список литературы

1. Башарин А.В. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с., ил.

2. Валюкевич Ю.А., Алепко А.В. Планирование траектории перемещения манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях (часть 1) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки». – Новочеркасск, 2011. – № 6 (159).

3. Валюкевич Ю.А. Планирование траектории перемещения манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях (Часть 2) / Ю.А. Валюкевич, А.В. Алепко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (160). – С. 2831.

4. Чистяков А.Ю. Роботизированные системы с механизмами параллельной структуры на основе подвесных платформ: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05. – СПб., 2006. – 139 с. РГБ ОД, 61:06-5/2483

5. Jason J. Gorman, Kathryn W. Jablokow, and David J. Cannon. The cable array robot: Theory and experiment. In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, pages 2804–2810, Seoul, Korea, May 2001.

References

1. Basharin A.V. Upravlenie jelektroprivodami. L.: Jenergoizdat, 1982. 392 p., il.

2. Valjukevich Ju.A., Alepko A.V. Planirovanie traektorii peremeshhenija manipuljatora s podvesom shvata na gibkih zvenjah (chast 1) // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki». Novocherkassk, 2011. no. 6 (159).

3. Valjukevich Ju.A. Planirovanie traektorii peremeshhenija manipuljatora s podvesom shvata na gibkih zvenjah (Chast 2) / Ju.A. Valjukevich, A.V. Alepko // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 2012. no. 1 (160). pp. 28 31.

4. Chistjakov A.Ju. Robotizirovannye sistemy s mehanizmami parallelnoj struktury na osnove podvesnyh platform: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.05. SPb., 2006. 139 s. RGB OD, 61:06-5/2483

5. Jason J. Gorman, Kathryn W. Jablokow, and David J. Cannon. The cable array robot: Theory and experiment. In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, pages 2804–2810, Seoul, Korea, May 2001.