

УДК 621.865.8

Д. А. КЛИМОВСКИЙ, А. Д. КУЧЕРЕНКО, А. С. КАЛАШНИКОВ
Сибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННОЙ НАГРУЗКИ ГИБКИХ ЗВЕНЬЕВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В работе определяются силы натяжения гибких звеньев манипулятора с учетом сил инерции. Механизм имеет две степени свободы. Анализируется воздействие динамических нагрузок на точность механизмов параллельной структурой с гибкими звеньями при производстве манипуляций с крупногабаритными изделиями.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, гибкое звено, ускорение.

Грузоподъемное оборудование является основным при работе с крупногабаритными деталями. Эффективность любого производства, связанного с такими изделиями, напрямую зависит от правильного выбора подобных манипуляторов [1]. Ввиду того, что крупногабаритные элементы обладают большой массой, и манипуляции с ними требуется производить с высокой точностью, необходим учет большего числа параметров, чем при использовании оборудования с жесткими звеньями [2–6].

Для оценки влияния динамических нагрузок на силы натяжения тросов рассмотрим механизм, представленный на рисунке 1. Манипулятор, состоящий из двух тросов, которые соединяются в точке крепления груза, находится в вертикальной плоскости. Управление движением груза осуществляется путем скоординированной намотки и размотки тросов 5 и 6 на барабаны 1 и 2.

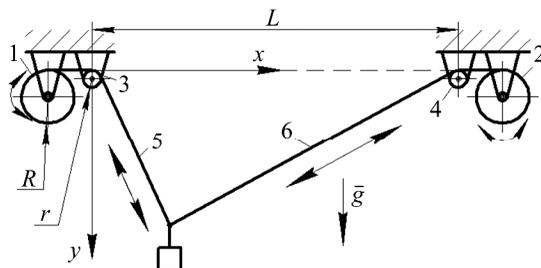


Рисунок 1 – Манипулятор с гибкими звеньями и двумя степенями свободы

Рассмотрим движение груза по вертикали и по горизонтали. Соответствующие расчетные схемы представлены на рисунках 2 и 3.

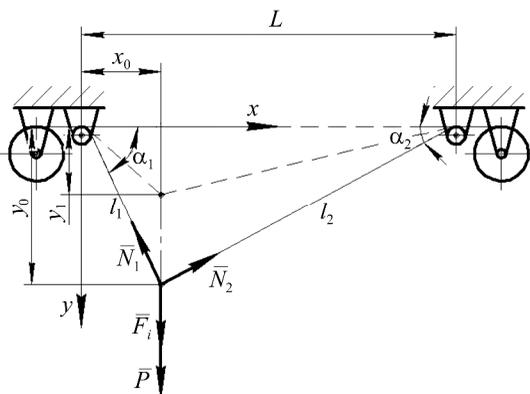


Рисунок 2 – Расчетная схема для движения груза по вертикали

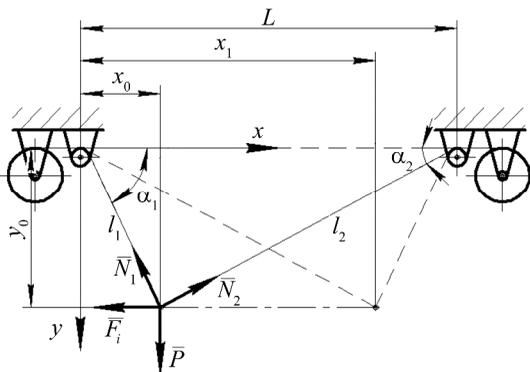


Рисунок 3 – Расчетная схема перемещения груза по горизонтали

Массой и растяжимостью гибких звеньев пренебрегаем, радиус r промежуточного блока считаем бесконечно малым. Тогда, используя принцип Д'Аламбера [7], для движений по вертикали и горизонтали соответственно получаем

$$\begin{cases} -N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2 = 0; \\ N_1 \sin \alpha_1 + N_2 \sin \alpha_2 = P \left(1 - \frac{a}{g} \right); \end{cases} \quad \begin{cases} N_1 \sin \alpha_1 + N_2 \sin \alpha_2 = P; \\ -N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2 = \frac{Pa}{g}. \end{cases} \quad (1)$$

где N_1, N_2 – силы натяжения тросов 1 и 2; α_1, α_2 – углы их наклона; P – сила тяжести груза; a – ускорение груза; g – ускорение свободного падения.

Текущие углы α_1 и α_2 определяются из соотношений

$$\alpha_1 = \arctg \frac{y_t}{x_t}; \quad \alpha_2 = \arctg \frac{y_t}{L - x_t},$$

где x_t, y_t – текущие координаты точки подвеса груза.

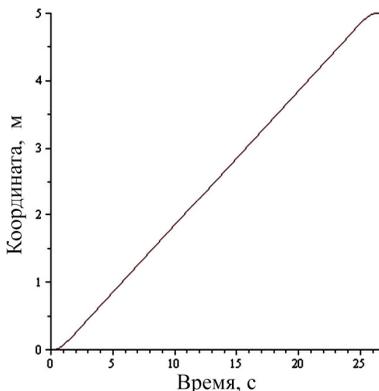


Рисунок 4 – Функция $s(t)$ приращения координаты

При движении по вертикали ($y_0 \rightarrow y_1$) координата y_t изменяется по закону $y_t = y_0 + s(t)$. Закон изменения функции $s(t)$ подобран таким образом (рисунок 4), чтобы выходное звено сначала разгонялось до некоторой предельно допустимой скорости, затем двигалось равномерно, и в конце затормаживалось с ускорением, равным начальному. Такому движению соответствует, в частности, функция, первая производная по времени от которой имеет вид

$$s'(t) = A \cos^n(\omega t + \varphi) + K,$$

где коэффициенты A и K задают максимальное значение скорости, φ – начальная фаза, степень n функции косинуса определяет максимальное ускорение разгона и подбирается эмпирически, $\omega = \pi/T$ – коэффициент, соответствующий периоду T функции, который определяется из условия

$$\int_0^T \left(A \cos^n \left(\frac{\pi}{T} t + \varphi \right) + K \right) dt = y_k - y_0.$$

Коэффициенты функции $s(t)$ подобраны согласно правилам безопасной эксплуатации подъемных приспособлений, т. е. чтобы максимальная скорость груза составляла не более 0,2 м/с (12 м/мин), а его ускорение – не более 0,2 м/с². Зависимости скорости и ускорения груза при движении по вертикали представлены на рисунке 5. При движении по горизонтали ($x_0 \rightarrow x_2$) они аналогичны.

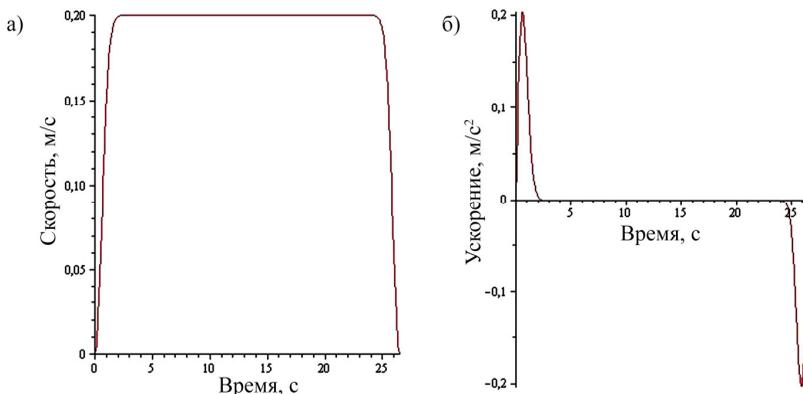


Рисунок 5 – Зависимости от времени скорости и ускорения груза

Решение систем уравнений (1) выполнено при следующих условиях: $L = 15$ м, $x_0 = 2$ м, $y_0 = 10$ м, $y_1 = 5$ м, $x_2 = 13$ м, $m_{гр} = 500$ кг. В результате получены зависимости сил натяжения гибких звеньев от времени $N_1(t)$ и $N_2(t)$ с учетом сил инерции груза и без них (рисунок 6). Также рассчитаны погрешности $\Delta(t)$, связанные с отсутствием учета сил инерции (рисунок 7).

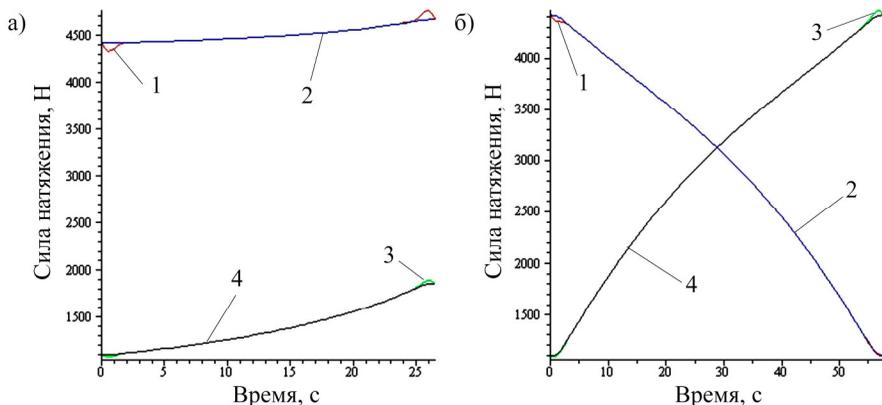


Рисунок 6 – Силы натяжения гибких звеньев при движении груза по вертикали (а) и горизонтали (б):

N_1 (1 – с учетом, 2 – без учета сил инерции) и N_2 (3 – с учетом, 4 – без учета сил инерции)

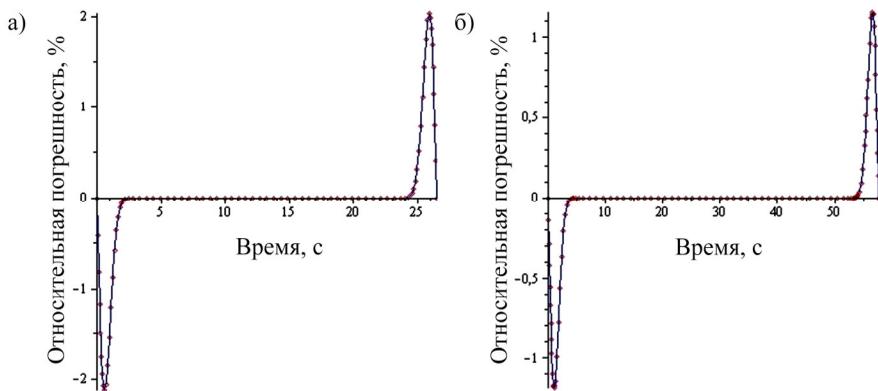


Рисунок 7 – Погрешность при расчетах сил без учета сил инерции при движении по вертикали (а) и горизонтали (б)

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 6 и 7, показывает, что при использовании механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями, предназначенных для перемещения крупногабаритных изделий, при до-

пустимых скоростях и ускорениях груза уточнение результатов расчетов сил натяжения, связанное с наличием сил инерции, составляет не более 3 %.

Таким образом, построена математическая модель работы манипулятора параллельной структуры, обеспечивающего перемещение груза в плоскости. Показано, что при соблюдении нормативных требований безопасности эксплуатации подъемных машин по скорости и ускорению грузов при проектировании рассмотренных механизмов силами инерции можно пренебречь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Грузоподъемные машины : учеб. для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование»/ М. П. Александров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 400 с.

2 **Климовский, Д. А.** Применение тросо-управляемых механизмов параллельной структуры в производстве ракетной техники / Д. А. Климовский, Н. А. Смирнов // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (9–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – С. 35–36.

3 **Gosselin, C.** Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives / C. Gosselin // Mechanical Engineering Reviews. – 2014. – Vol. 1, No. 1. – Article DSM0004. – 17 p.

4 **Albus, J.** The NIST Robocrane / J. Albus, R. Bostelman, N. Dagalakis / Journal of Robotic Systems. – 1993. – Vol. 10, Is. 5. – P. 709–724.

5 **Tang, X.** An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator / X. Tang // Advances in Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 6. – Article ID 823028. – 9 p.

6 **Климовский, Д. А.** Алгоритм решения обратной задачи кинематики механизма параллельной структуры с гибкими растяжимыми звеньями / Д. А. Климовский, Н. А. Смирнов, Е. В. Фальков // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 114–118.

7 **Тарг, С. М.** Краткий курс теоретической механики : учеб. для вузов / С. М. Тарг. – 10-е изд., перераб и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 416 с.

D. A. KLIMOVSKY, A. D. KUCHERENKO, A. S. KALASHNIKOV

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

INERTIAL LOAD ESTIMATION OF FLEXIBLE LINKS FOR A SPATIAL MANIPULATOR OF LARGE-SIZED PRODUCTS

In the paper the tension forces of the manipulator flexible links are determined taking into account the inertia forces. The mechanism has two degrees of freedom. There is analyzed the impact of the dynamic loads on the accuracy of the parallel structure kinematic machines with flexible links at the large-sized products manipulation.

Получено 23.04.2019