

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-60-65

*В. В. Жога, А. В. Нелюбова***ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРА
ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ****Волгоградский государственный технический университет**

mqdschen@yandex.ru

В работе исследуется структура кинетической энергии звена манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной пассивной связью. Расчетная схема манипулятора представляет собой четырехмассовую электромеханическую систему с четырьмя степенями свободы. Приводится методика расчета приведенного момента инерции манипулятора параллельно-последовательной структуры с поворотным основанием. Проведено исследование вклада каждого слагаемого в выражение кинетической энергии актуатора и поворотного основания.

Ключевые слова: манипулятор параллельно-последовательной структуры, кинетическая энергия, приведенный момент инерции.

*V. V. Zhoga, A. V. Nelyubova***SUBSTANTIATION OF THE COMPUTATIONAL DYNAMICS
SCHEME FOR A PARALLEL-SERIAL STRUCTURE
MANIPULATOR WITH ADDITIONAL COUPLING****Volgograd State Technical University**

The paper investigates the structure of the kinetic energy of the manipulator link of a parallel-sequential structure with an additional passive coupling. The computational scheme of the manipulator is a four-mass electromechanical system with four degrees of freedom. A method for calculating the reduced moment of inertia of a manipulator of a parallel-sequential structure with a rotating base is presented. The contribution of each term to the expression of the kinetic energy of the actuator and the rotary base has been researched.

Keywords: manipulator of parallel-sequential structure, kinetic energy, moment of inertia.

Введение

При разработке систем управления манипуляторами необходимо предварительно рассчитывать требуемые законы изменения управляющих сигналов приводных двигателей. Для этого следует сформировать динамическую модель манипулятора. При разработке динамической модели манипулятора с жесткими звеньями используются массово-геометрические параметры его звеньев. Отклонения реальных параметров манипулятора от их номинальных значений приводят к ошибкам. Поэтому аналитический синтез управляющих сигналов предъявляет повышенные требования как к адекватности модели реальной системе, так и к точности идентификации ее параметров.

Расчетная схема манипулятора

В качестве объекта исследования рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью [1–3]. Кинематические характеристики и реше-

ние задачи кинематического синтеза отражены в работах [4], [5], в которых рассматриваются методика решения обратной задачи кинематики манипулятора и алгоритмы определения законов изменения обобщенных координат.

Манипулятор содержит три линейных исполнительных звена (1, 2, 3), связанных с поворотным основанием в точках А, В, С с помощью двух подвижных шарниров. Другие концы исполнительных звеньев закреплены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6. Дополнительная связь в виде полой трубы 5 обеспечивает жесткость конструкции. Изменение длины хотя бы одного звена 1, 2 или 3 способствует изменению положения выходного звена 6. Четвертый линейный привод 4 обеспечивает поворот треугольного основания вокруг горизонтальной оси.

В работе ставится задача адекватного представления модели динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью.

Для описания динамической модели манипулятора принимаем, что механизм состоит из четырех твердых тел: звено AD – линейный привод (электроцилиндр), состоит из двух твердых тел – цилиндра и штока. Цилиндр совершает вращательное движение вокруг неподвижной оси, параллельной оси Ox , шток –

плоское движение. Масса цилиндра m_{41} , его момент инерции относительно оси вращения I_{41} , масса штока m_{42} , его центральный момент инерции I_{42} . Звено ABC (поворотное основание), также является твердым телом, вращающимся вокруг неподвижной оси Ox (BC). Его момент инерции относительно оси вращения – I_{OA} .

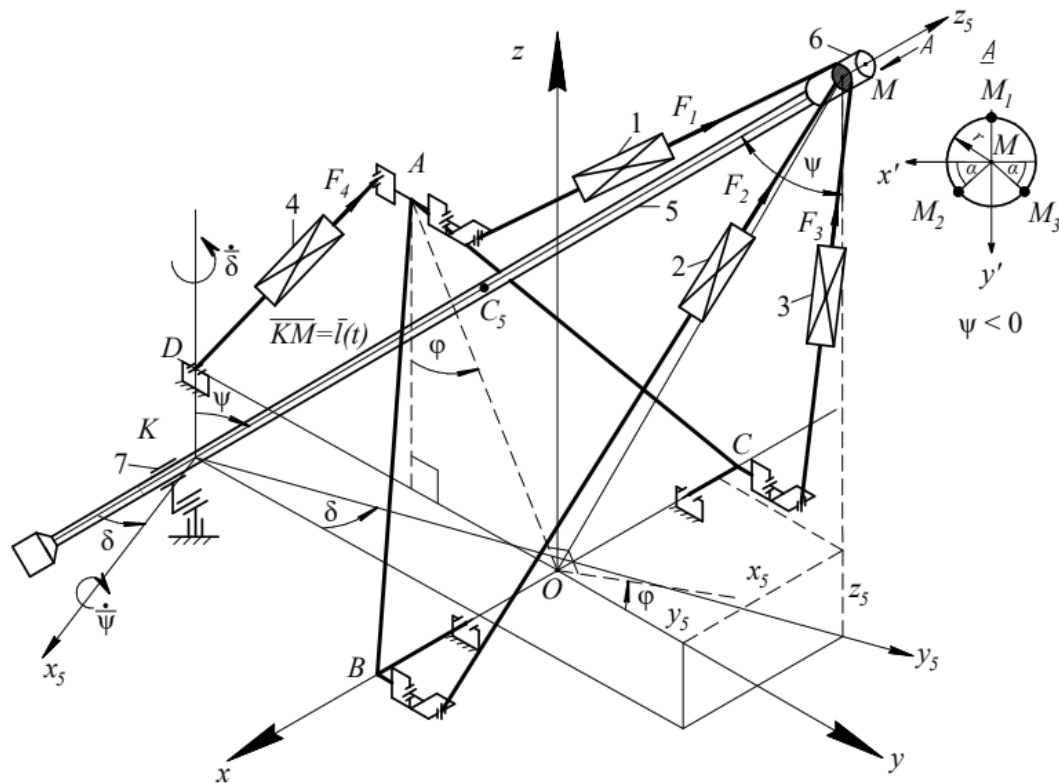


Рис. 1. Схема манипулятора-трипода с дополнительной связью

Звено KM – дополнительная пассивная связь, основа эксплуатационных свойств манипулятора – совершает пространственное движение. Масса звена KM равна m_5 , главные центральные моменты инерции I_5 .

Массово-геометрические параметры манипулятора приведены ниже в таблице. Расчет массово-геометрических параметров модели манипулятора [1] проводился в программе КОМПАС-3D.

Массово-геометрические параметры манипулятора

	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²	Координаты центра масс, м
Рама поворотного основания ABC	$m_{BC} = 2,03$	$I_{OA} = 0,1$ относительно оси Ox	$x_C = 0$ $y_C = 0$ $z_C = 0,18$
Корпус электроцилиндра	$m_{41} = 3,68$	$I_{41} = 0,08$ относительно оси Ox	
Шток электроцилиндра	$m_{42} = 1,11$	$I_{42} = 0,02$ относительно оси Ox	$x_C = 0$ $y_C = 0$ $z_{C04} = 0,23$
Полая труба KM	$m_5 = 6,28$	$I_5 = I_{x5} = I_{y5} = 2.06$ $I_{z5} = 0$	$z_{C05} = 1$

Скорость точки A , как точки звена OA

$$v_A = \dot{\phi} \cdot OA. \quad (6)$$

Скорость точки A , как точки звена DA

$$\bar{v}_A = \bar{v}_r + \bar{v}_\tau, \quad v_r = \dot{l}_4, \quad v_\tau = \omega_4 \cdot l_4, \quad (7)$$

где v_r – относительная скорость.

Так как

$$l_4(\varphi) = \sqrt{OA^2 + OD^2 - 2OA \cdot OD \cdot \sin \varphi},$$

то относительная скорость

$$\frac{dl_4}{dt} = \dot{l}_4 = -\frac{OA \cdot OD \cos \varphi}{l_4} \cdot \dot{\phi}. \quad (8)$$

Из рис. 3 видно, что тангенс угла α равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_r}{v_\tau} = \frac{\dot{l}_4}{\omega_4 \cdot l_4}, \quad \text{откуда} \quad \omega_4 = \frac{\dot{l}_4}{l_4 \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (9)$$

Выражение для угла α имеет вид

$$\alpha = \varphi + \beta, \quad \sin \beta = \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4},$$

$$\beta = \arcsin \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4},$$

Тогда тангенс угла α , после подстановки этих выражений, имеет вид

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\sin(\varphi + \arcsin \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4})}{\cos(\varphi + \arcsin \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4})} = \frac{OD \cdot \cos \varphi}{OA - OD \sin \varphi} \quad (10)$$

Тогда из (9), с учетом (10), получаем выражение для угловой скорости

$$\omega_4 = -\frac{OA(OD - OA \sin \varphi)}{l_4^2} \dot{\phi}. \quad (11)$$

Кинетическая энергия механизма $DABC$ с учетом (3), (4), (5), (11)

$$T_4 = \frac{1}{2}(I_{41} + I_{42})\omega_4^2 + \frac{1}{2}m_{42}[\dot{l}_4^2 + \omega_4^2(l_4 - l_{40} + z_{C04})^2] + \frac{1}{2}I_{OA}\dot{\phi}^2, \quad (12)$$

где $\dot{l}_4^2 + \omega_4^2(l_4 - l_{40} + z_{C04})^2 = v_{C4}^2$ – квадрат скорости центра масс штока электроцилиндра 4; координата центра масс $z_C(t) = (l_4 - l_{40} + z_{C04})$.

С учетом выражений (8) и (11) кинетическая энергия механизма $DABC$ (12)

$$T_4 = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 \left\{ \left[I_{41} + I_{42} + m_{42}(l_4 - l_{40} + z_{C04})^2 \right] \cdot \frac{OA^2(OA - OD \sin \varphi)^2}{l_4^4} + \right. \\ \left. + I_{OA} + m_{42} \frac{OA^2 OD^2 \cos^2 \varphi}{l_4^2} \right\}. \quad (13)$$

$$T_4 = \frac{1}{2}I_{np}(\varphi) \cdot \dot{\phi}^2$$

Рассмотрим слагаемые, входящие в функцию приведенного момента инерции, и исследуем величину вклада каждого слагаемого в формулу (13).

Первое слагаемое в формуле (13) представляет собой выражение, пропорциональное квадрату угловой скорости ω_4 электроцилиндра:

$$K1(\varphi) = \left[I_{41} + I_{42} + m_{42}(l_4(\varphi) - l_{40} + z_{C04})^2 \right] \cdot \frac{OA^2(OA - OD \sin \varphi)^2}{l_4(\varphi)}.$$

Второе слагаемое представляет собой момент инерции рамы поворотного основания $I_{OA} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и является постоянной величиной.

Третье слагаемое в формуле представляет собой выражение, пропорциональное квадрату линейной скорости штока электроцилиндра:

$$K3(\varphi) = m_{42} \frac{OA^2 OD^2 \cos^2 \varphi}{l_4^2}.$$

Третье слагаемое в формуле представляет

На рис. 4 представлены графики, отражающие изменения величины каждого слагаемого от угла поворотного основания φ .

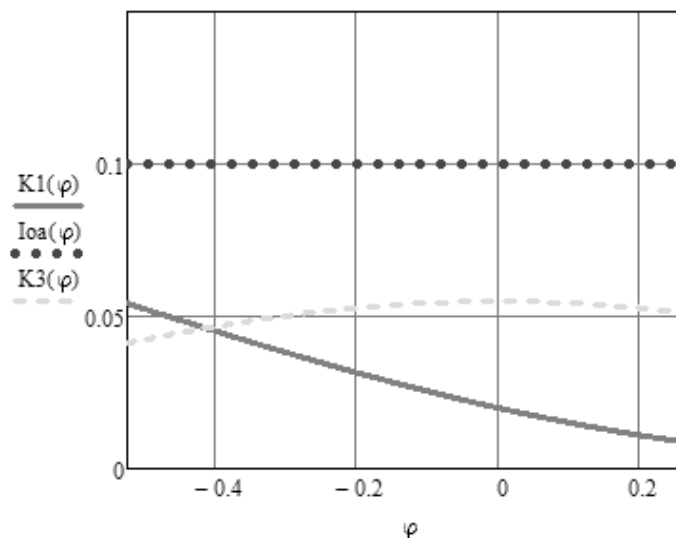


Рис. 4. Зависимость слагаемых приведенного момента инерции $I_{np}(\varphi)$ от угла поворотного основания φ

Таким образом, вклад каждого слагаемого кинетической энергии системы «электроцилиндр 4 – поворотное основание» значителен, и принимать приведенный момент инерции постоянным некорректно [7–14].

На рис. 5 представлена зависимость приведенного момента инерции $I_{np}(\varphi)$ от угла поворота φ основания $ABC - \frac{\pi}{6} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{12}$.

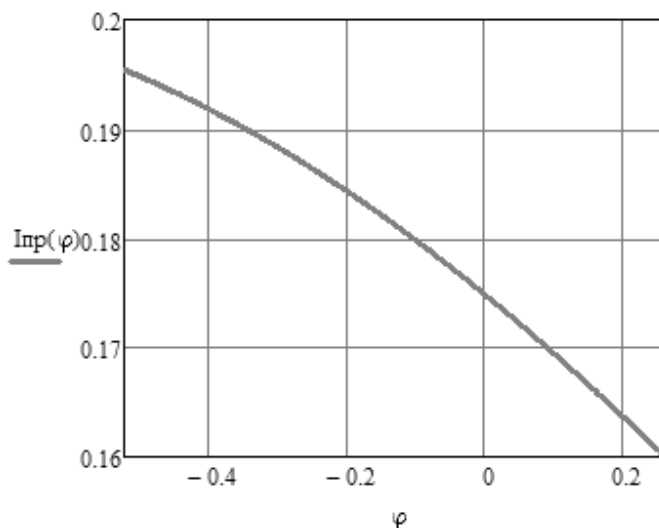


Рис. 5. График зависимости приведенного момента инерции от угла поворота основания

Зависимость (13) $I_{np}(\varphi)$ интерполируем линейной функцией $I_{np}(\varphi) \approx 0.172 - \frac{0.14}{\pi} \varphi$. Тогда выражение для кинетической энергии механизма $DABC$ принимает вид:

$$T_4 = \frac{1}{2} \left(0.172 - \frac{0.14}{\pi} \varphi \right) \cdot \dot{\varphi}^2. \quad (14)$$

Заключение

Таким образом, для адекватного представления модели динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью необходимо применять уточненное выражение кинетической энергии, что позволит обоснованно использовать методы аналитического программирования входных управляющих сигналов приводных двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 218886 Российская Федерация, МПК В66С 23/00. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
2. П. м. 218887 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
3. *Нелюбова, А. В.* Расчет кинематических характеристик манипулятора-трипода с дополнительной кинематической связью / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, И. П. Вершинина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 71–76.
4. *Нелюбова, А. В.* Кинематический синтез манипулятора-трипода с дополнительной связью / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2023) : материалы мультиконф. – Волгоград, 2023. – С. 89–93.
5. *Жога, В. В.* Условия управляемости манипулятора параллельно-последовательной структуры / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов // XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 г.) : сб. тез. В 4 т. / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого [и др.]. – СПб., 2023. – Т. 1. Общая и прикладная механика. – С. 492–494.
6. *Лурье, А. И.* Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1961. – 824 с.
7. Динамика и синтез управляющих сигналов манипулятора параллельно-последовательной структуры / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 8(749). – С. 3–12.
8. *Коловский, М. З.* Основы динамики промышленных роботов / М. З. Коловский, А. В. Слоущ. – М. : Наука, 1988. – 239 с.
9. Исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода : моногр. / Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин. – Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2022. – 272 с.
10. О неустойчивых режимах работы электропривода манипулятора / И. А. Несмиянов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 3. – С. 18–25.
11. *Борисов, И. И.* Имитационное моделирование мехатронных систем / И. И. Борисов, С. А. Колубин. – СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2020. – 103 с.
12. *Добриборщ, Д.* Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой / Д. Добриборщ, С. А. Колубин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 850–857.
13. *Хейло, С. В.* Манипуляционные механизмы параллельной структуры: структурный синтез, кинематический и силовой анализ / С. В. Хейло, В. А. Глазунов, С. В. Палочкин. – М. : МГТУ, 2011. – 153 с.
14. *Дяшкин-Титов, В. В.* Математическая модель динамики шестимассовой системы механизма манипулятора параллельной структуры / В. В. Дяшкин-Титов, Н. С. Воробьева, В. В. Жога // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(256) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 32–37.