

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРИВОДА МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА

В данной статье рассмотрим схему мехатронного устройства на базе пространственного механизма. Схема спроектирована таким образом, что рабочие органы совмещены с элементами передаточного механизма — звеньями. В основе проектирования объединили два базовых модуля с отбрасыванием соответствующих общих звеньев и шарнира, в результате чего образовали новое устройство. Помимо этого, особое внимание уделили значениям абсолютной угловой скорости и углового ускорения звена для конкретной точки, также линейным скоростям и ускорениям для каждой интересующей точки звена, из которого определяются радиус-вектор и положение точки в пространстве. На основе проведенных расчетов предложена схема мешалки с четырьмя звеньями-лопастями, рабочие органы которых совмещены с элементами передаточного механизма.

**Ключевые слова:** пространственный механизм, четырехзвенный механизм, привод, кривошип, исследование кинематики, синтез механизмов.

**Введение.** Мехатронные технологии вошли как в профессиональную деятельность, так и в повседневную жизнь современного человека, как показывает обзор литературы отечественных [1–2] и зарубежных исследователей [3–5]. Сегодня они находят широкое применение в самых различных областях: космического пространства [6–7] и ракетных технологий, интеграции беспилотных летательных аппаратов в работу современных инфраструктурных систем [8–10], автомобилестроения [11–13].

Любопытно заметить, что в мехатронной системе роль отводится и компьютеру, поскольку компьютерное управление даёт возможность достичь высокой точности и производительности [14–16], реализовать сложные и эффективные алгоритмы управления, учитывающие нелинейные характеристики объектов управления, изменения их параметров и влияние внешних факторов [17–18]. Благодаря этому мехатронные системы приобретают новые качества при увеличении долговечности и снижении размеров, массы и стоимости таких систем [19–23].

Существует множество исследований, целью которых является упрощение конструкций. Рассмотрим в доказательство манипулятор [24], в основе которого лежит механизм параллельной структуры на основе трипода, состоящий из трех активных исполнительных звеньев переменной длины, концы которых соединены между собой посредством

пятиподвижного сферического шарнирного узла, обеспечивающего пересечение геометрических осей этих цилиндров в одной точке. Для увеличения маневренности и манипулятивности основание трипода имеет возможность изменять угол наклона к горизонту за счет дополнительного исполнительного звена.

Также существует синтез шестизвенного пространственного механизма [25] по воспроизведению линейной функции ведомого звена, что имеет место в приборах и устройствах с линейными функциями на определенных углах поворота ведущего и ведомого звеньев. Данный синтез проводится с вращательными шарнирами в определенной последовательности. В первую очередь, решается вопрос об условиях проворачиваемости звеньев механизмов посредством анализа их среднего передаточного отношения. Если оно равно нулю, то ведомое звено будет балансиром, если единице — кривошипом, если двум — кривошипом, делающим два оборота за один оборот ведущего, и т.д.

Возвращаясь к настоящей работе, рассмотрим кинематику мешалки с четырьмя подвижными звеньями-лопастями. Данная тематика становится всё более актуальной на сегодняшний день, так как на данном этапе развития общества повышается производительность вычислений, которые могут быть решены за счет совершенствования архитектуры вычислительных машин: уменьшения объема потока обрабатываемых данных, увеличения скоро-

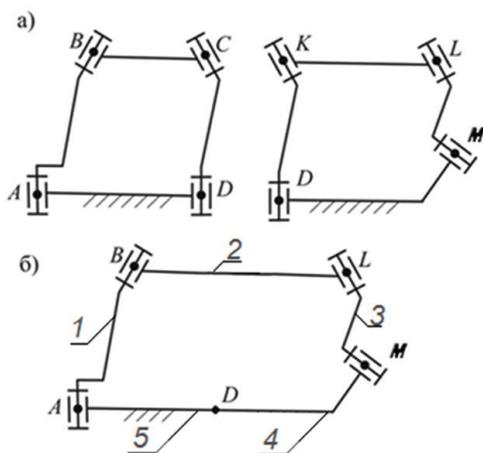


Рис. 1. Графики схем: а) исходная система с базовым модулем; б) образованный передаточный механизм с четырьмя подвижными звеньями станиной

сти передачи данных между элементами вычислительной машины, устранения очередей при одновременном обращении к одной памяти нескольких вычислительных устройств, поэтому мы можем выполнять расчеты и рабочие чертежи в специальных программах, также в некоторых программах имеются библиотеки с готовыми и построенными по ГОСТу деталями, которыми мы можем пользоваться, к тому же данные получаются более точными.

**Метод объединения пространственных механизмов.** Методом объединения нескольких базовых механизмов пространственного 4R механизма можно получить сложные механизмы, которые могут обеспечить повышение производительности и расширение диапазона работы современных мехатронных устройств. Рассмотрим случай объединения модулей ABCD и DKLM, которые представлены на рис. 1а.

В данном исследовании механизмы объединим с таким условием, чтобы совпали два звена DC, DK, а соответствующие шарниры совпадали. Звенья, которые совпали, уберем из структурной схемы. В результате объединения получим новый пространственный 5R новый механизм (ABLMD), который представлен на рис. 1б. Полученный механизм используем в качестве базового механизма нового устройства перемешивания сухих строительных и медицинских смесей.

Учитывая, что данный механизм был получен объединением двух пространственных 4R, следует, что условия работы полученного пространственного 5R механизма исходят из условий для базовых механизмов:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_3 \text{ соответственно } l_1 = l_3; \\ l_4 = l_5 \text{ соответственно } \alpha_4 = \alpha_5. \end{aligned}$$

При этом в данном механизме звенья и их параметры связаны следующим уравнением:

$$l_1 = l_4 \sin \alpha_1. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что в полученном пространственном 5R механизме вращательное движение передается от шагового электродвигателя к ведомому звену через шатун, балансир. В результате выбора определенных длин звеньев механизма по-

лучили, что ведомое звено совершает вращательное и возвратное движение, что положительно влияет на процесс перемешивания.

В данном механизме степень неравномерности, которая повышает интенсивность перемешивания, определим по следующему уравнению:

$$\delta = 0,5 \left( \frac{\cos \alpha_1}{1 + \sin \alpha_1} - \frac{\cos \alpha_1}{1 - \sin \alpha_1} - \frac{\cos \alpha_1}{2} \right). \quad (2)$$

При этом ведомое звено будет характеризоваться переменной угловой скоростью, определяемой уравнением

$$\omega_4 = \left[ \frac{c_1}{a_1 - b_1 \cdot \cos \varphi_1} + \frac{c_2}{a_2 - b_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1)} \right] \cdot \omega_1 \quad (3)$$

и угловым ускорением данного звена

$$\varepsilon_4 = \left\{ \begin{aligned} & \frac{b_1 \cdot c_1 \cdot \sin \varphi_1}{(a_1 - b_1 \cdot \cos \varphi_1)^2} + \\ & + \frac{b_2 \cdot c_2 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1)}{[a_2 - b_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1)]^2} \end{aligned} \right\} \cdot \omega_1^2. \quad (4)$$

Из уравнения (3) составляющая угловой скорости определится выражением

$$\overline{\omega_2} = \overline{\omega_1} + \overline{\omega_{2/1}}, \quad (5)$$

где  $\omega_{2/1}$  — угловая скорость звена относительно кривошипа.

Рассматривая данный механизм в проекциях на неподвижные оси XYZ, можем записать выражение (5) в виде

$$\left. \begin{aligned} \omega_2^x &= \omega_{2/1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1, \\ \omega_2^y &= \omega_{2/1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ \omega_2^z &= \omega_1 + \omega_{2/1} \cdot \cos \alpha_1 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

**Исследование схемы мешалки с четырьмя звеньями-лопастями.** Также в данном исследовании рассмотрим схему мешалки, которая представлена на рис. 2. В данной схеме представлены: углы поворота ведомого и ведущего звеньев, угол между объединенными звеньями базовых модулей и угол между осями шарниров ведущего звена, помимо этого, отмечены подвижные и неподвижные оси координат.

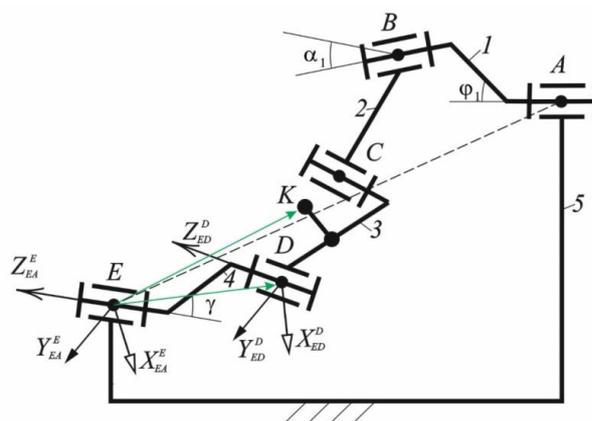


Рис. 2. Схема мешалки с четырьмя звеньями-лопастями

Принимая в расчет, что  $\omega_{21} = \omega_B$ , можем определить угловую скорость ведомого звена объединяемого базового модуля пространственного механизма

$$\omega_B = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \varphi_1} \cdot \omega_1, \quad (7)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — углы скрещивания осей шарниров первого объединяемого базового модуля;  $\varphi_1$  — угол поворота ведущего звена.

Учитывая уравнение (7), запишем выражение (6) в виде

$$\left. \begin{aligned} \omega_2^X &= \omega_B \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1, \\ \omega_2^Y &= \omega_B \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ \omega_2^Z &= \omega_1 + \omega_0 \cdot \cos \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В результате абсолютная угловая скорость звена данного механизма составит

$$\omega_2 = \sqrt{(\omega_2^X)^2 + (\omega_2^Y)^2 + (\omega_2^Z)^2}. \quad (9)$$

Для расчета проекций углового ускорения звена на оси XYZ продифференцируем по времени выражение (8), получив уравнение

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_2^X &= \varepsilon_B \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1 - \omega_1 \cdot \omega_0 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ \varepsilon_2^Y &= \varepsilon_B \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1 + \omega_1 \cdot \omega_0 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1, \\ \varepsilon_2^Z &= \varepsilon_B \cdot \cos \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Приняв во внимание уравнение (10), определим значение углового ускорения выражением

$$\varepsilon_B = \frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \cdot \sin \varphi_1}{(1 - \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \varphi_1)^2} \times \omega_1^2. \quad (11)$$

Рассмотрим проекции угловой скорости на оси координат  $X_D Y_D Z_D$ , которые жестко связаны с корпусом мешалки

$$\left. \begin{aligned} \omega_3^{X_D} &= \omega_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos \varphi_1, \\ \omega_3^{Y_D} &= \omega_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \sin \varphi_1, \\ \omega_3^{Z_D} &= \omega_1 + \omega_4 \cdot \cos \alpha_4 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $\omega_4$  — угловая скорость ведомого звена, определяемая уравнением (3).

В результате составляющая угловой скорости звена определится выражением

$$\overline{\omega_3} = \overline{\omega_4} + \overline{\omega_{3/4}}, \quad (13)$$

где  $\omega_{3/4}$  — угловая скорость звена относительно ведомого звена кривошипа.

Продифференцировав по времени выражение (10), получим проекции углового ускорения звена

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_3^{X_D} &= \varepsilon_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos \varphi_1 - \omega_1 \cdot \omega_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \sin \varphi_1, \\ \varepsilon_3^{Y_D} &= \varepsilon_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \sin \varphi_1 + \omega_1 \cdot \omega_4 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos \varphi_1, \\ \varepsilon_3^{Z_D} &= \varepsilon_4 \cdot \cos \alpha_4 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

здесь  $\varepsilon_4$  — угловое ускорение звена.

Для нахождения линейной скорости и линейного ускорения звеньев пространственного механизма необходимо составить замкнутый векторный многоугольник, из которого получаем радиус-вектор для определения положения точек в пространстве относительно неподвижной системы координат XYZ через длины звеньев и направляющие косинусы соответствующих осей.

Определим линейные скорости и линейные ускорения конкретной точки К лопасти. Для начала найдем из замкнутости векторного контура EDSK радиус-вектор  $\overline{EK}$ , который, в свою очередь, определяет положение точки К

$$\overline{EK} = \overline{ED} + \overline{DS} + \overline{SK}. \quad (15)$$

Затем запишем данный радиус-вектор в проекциях на оси координат XYZ через длины звеньев и направляющие косинусы

$$\left. \begin{aligned} X_{EK} &= -I_4 \cdot K_X^{X_E} - I_S \cdot K_X^{Y_C} + I' \cdot K_X^{Z_C}, \\ Y_{EK} &= -I_4 \cdot K_Y^{X_E} - I_S \cdot K_Y^{Y_C} + I' \cdot K_Y^{Z_C}, \\ Z_{EK} &= -I_4 \cdot K_Z^{X_E} - I_S \cdot K_Z^{Y_C} + I' \cdot K_Z^{Z_C} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $K_X^{X_E}, K_X^{Y_C}, \dots, K_Z^{Y_C}, K_Z^{Z_C}$  — направляющие косинусы соответствующих осей, которые можно представить в виде  $K_X^{X_E} = \cos X_E \cdot X, K_Z^{Z_C} = \cos Z_C \cdot Z$  и т.д.

Учитывая выражения (16), определим следующие значения направляющих косинусов в виде уравнений

$$\left. \begin{aligned} K_X^{X_E} &= \sin \gamma, \quad K_Y^{X_E} = -\cos \gamma, \quad K_Z^{X_E} = 0, \\ K_X^{Y_C} &= -\left[ \begin{aligned} &\cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &\sin \gamma \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \end{aligned} \right]; \\ K_Y^{Y_C} &= \cos \gamma \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &\quad - \cos \alpha_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot \sin \gamma; \\ K_Y^{Z_C} &= -\sin \alpha_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1); \\ K_X^{Z_C} &= \cos \gamma \left[ \begin{aligned} &\cos \alpha_4 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &\cos \alpha_4 \cdot \cos \alpha_1 \end{aligned} \right] - \\ &\quad - \sin \alpha_1 \times \sin \gamma \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1); \\ K_Y^{Z_C} &= \left[ \begin{aligned} &\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &\cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_4 \end{aligned} \right] \cdot \sin \gamma + \\ &\quad + \sin \alpha_1 \times \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cos \gamma; \\ K_Z^{Z_C} &= \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 + \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Для получения проекций радиус-вектора  $\overline{EK}$  на оси XYZ подставим значения выражений (17) в (16)

$$\left. \begin{aligned} X_{EK} &= \left[ \begin{aligned} &I_S \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - I_4 - \\ &- I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) \end{aligned} \right] \sin \gamma + \\ &\quad + \left[ \begin{aligned} &I_S \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &- I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + I' \times \\ &\times \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \end{aligned} \right] \cdot \cos \gamma; \\ Y_{EK} &= \left[ \begin{aligned} &I_S \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &+ I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &- I' \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos \alpha_1 \end{aligned} \right] \cdot \sin \gamma + \\ &\quad + \left[ \begin{aligned} &I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &- I_S \times \cos(\varphi_1 + \beta_1) - I_4 \end{aligned} \right] \cdot \cos \gamma; \\ Z_{EK} &= I_S \cdot \left[ \begin{aligned} &\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 + \sin \alpha_1 \times \\ &\times \sin \alpha_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \end{aligned} \right] + \\ &\quad + I' \cdot \sin \alpha_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В результате преобразований составляющая абсолютного радиус-вектора определится выражением

$$EK = \sqrt{X_{EK}^2 + Y_{EK}^2 + Z_{EK}^2}. \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} V_{X_k} &= -\omega_1 \{ [I' \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma + I_s \cdot \sin \gamma] \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &+ [I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma + I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma] \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \} + \\ &+ \omega_4 \cdot \{ (-I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma) \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &+ (I_s \cdot \cos \gamma - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma) \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - \\ &- I_4 \cdot \cos \gamma + I' \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma \}; \\ V_{Y_k} &= \omega_1 \cdot \{ (I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma + I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma) \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &+ (I_s \cdot \cos \gamma - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma) \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) \} + \\ &+ \omega_4 \cdot \{ (I_s \cdot \sin \gamma + I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma) \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &+ (I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma + I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma) \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + \\ &+ I_4 \cdot \sin \gamma - I' \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \gamma \}; \\ V_{Z_k} &= \omega_1 \cdot (I' \cdot \sin \alpha_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) - I_s \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1)) \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

В результате составляющая абсолютной скорости конкретной точки К определится выражением

$$V_K = \sqrt{V_{X_k}^2 + V_{Y_k}^2 + V_{Z_k}^2}. \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} W_{X_k} &= \omega_1^2 \{ -\cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma + I_s \cdot \sin \gamma) + \sin(\varphi_1 + \beta_1) \times \\ &\times (I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma + I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma) \} + \omega_4^2 \{ \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma - \\ &- I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma) - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot \cos \gamma - I' \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \times \\ &\times \sin \gamma - I \cdot \sin \gamma \} + \omega_1 \cdot \omega_4 \cdot \{ \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (2I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma - I_s \cdot \cos \gamma) - \\ &- 2I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot \cos \gamma \} + \varepsilon_4 \{ \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (-I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma - \\ &- I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma) - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot \sin \gamma + I' \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \times \\ &\times \cos \gamma + I_4 \cdot \cos \gamma \}; \\ W_{Y_k} &= \omega_1^2 \cdot \{ \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I_s \cdot \cos \gamma - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma) - \sin(\varphi_1 + \beta_1) \times \\ &\times (I_s \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma - I' \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma) \} + \omega_4^2 \cdot \{ \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I_s \cdot \cos \gamma - \\ &- I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma) - \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma + I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma) + \\ &+ I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \sin \gamma + I_4 \cdot \cos \gamma \} + \omega_1 \cdot \omega_4 \cdot \{ 2 \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I_s \cdot \cos \alpha_4 - \\ &- I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma) - 2 \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 + I_s \cdot \sin \gamma) \} + \\ &+ \varepsilon_4 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) \cdot (I_s \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma - I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \gamma) + \cos(\varphi_1 + \beta_1) \times \\ &\times (I_s \cdot \sin \gamma + I' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \gamma) + I_4 \cdot \sin \gamma - I' \cdot \cos \alpha_4 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \gamma \}; \\ W_{Z_k} &= -\omega_1^2 \cdot \sin \alpha_4 \cdot (I' \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + I_s \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1)) \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

В результате получим составляющую абсолютного ускорения точки К в виде

$$W_K = \sqrt{W_{X_k}^2 + W_{Y_k}^2 + W_{Z_k}^2}. \quad (23)$$

Данные выражения скоростей и ускорений точки К отличаются сложностью и переменным характером, что использовано нами в конструкции смесителя.

**Заключение.** Рассмотрели схему мешалки с четырьмя звеньями-лопастями, устройство которой спроектировано таким образом, что рабочие органы совмещены с элементами передаточного механизма — звеньями, в основе которого было спроектировано объединение двух базовых модулей с отбрасыванием соответствующих общих звеньев и шарнира. В основе проектирования объединили два базовых модуля с отбрасыванием соответствующих общих звеньев и шарнира, в результате чего образовали устройство.

Для удобства исследования определили углы скрещивания осей шарниров, углы поворота ведущего и ведомого звена, углы между осями шарниров ведущего кривошипа. Особое внимание уде-

Для получения проекций вектора скорости точки К на координатные оси XYZ продифференцируем по времени выражение (18)

Для получения проекций вектора ускорения точки К на координатные оси XYZ продифференцируем по времени выражение (19)

лили значениям абсолютной угловой скорости и углового ускорения звена для конкретной точки, линейным скоростям и ускорениям для каждой интересующей точки звена, из которого определяются радиус-вектор и положение точки в пространстве. На основании данного исследования определили, что базовый механизм мешалки с четырьмя подвижными звеньями-лопастями можно использовать в конструкциях мехатронных устройств в емкостях смесителей, в дезинтеграторах и т.д.

#### Библиографический список

1. Мудров А. Г., Сахапов Р. А. Синтез шестизвального пространственного механизма // Техника и технология транспорта. 2019. № 5 (13). С. 18.
2. Хабибуллин Ф. Ф., Мудров А. П., Яруллин М. Г. Определение динамических параметров пространственного 4R механизма // Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 8. С. 341–354. DOI: 10.1872/MMF-2019-28.
3. Liu K., Kong X., Yu J. Operation mode analysis of lower-mobility parallel mechanisms based on dual quaternions // Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 142. 103577. DOI: 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2019.103577.

4. Song Y., Ma X., Dai J.S. A novel 6R metamorphic mechanism with eight motion branches and multiple furcation points // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 142. 103598. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103598.
5. Li X., Wu T., Liu W. [et al.]. Kinematic analysis and dimension synthesis of a spatial RRPCR mechanism // *Proceedings—2020 6th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science, ICMEAS*. 2020. 9356883. P. 87–92. DOI: 10.1109/ICMEAS51739.2020.00024.
6. Хабибуллин Ф. Ф., Дихтяренко А. А. Проектирование приводов мехатронных устройств на базе пространственных 4R механизмов // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. / редкол. М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. Могилев, 2021. С. 79.*
7. Шамутдинов А. Х., Балакин П. Д. Динамика пространственного механизма // *Наука и военная безопасность*. 2017. № 1 (8). С. 34–39.
8. Иванов А. Г., Воробьева Н. С. Синтез оптимальных алгоритмов перемещения рабочего органа роботизированного пропольщика для точечного удаления сорняков // *Научное обоснование стратегии развития АПК и сельских территорий в XXI веке: материалы Нац. науч.-практ. конф. Волгоград, 2021. С. 72–78.*
9. Иванов А. Г., Воробьева Н. С. Кинематика движения манипуляционного механизма роботизированного пропольщика при выполнении технологического процесса прополки // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2021. № 4 (64). С. 452–463. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-44.
10. Glazunov V., Filippov G., Rashoyan G. [et al.]. Analysis of Mechanisms with Parallel-Serial Structure 5-DOF and Extended Working Area // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. № 232. P. 3–12. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6\_1.
11. Zalyubovs'kyi M. G., Panasyuk I. V., Koshe' S. O. [et al.]. Synthesis and Analysis of Redundant-Free Seven-Link Spatial Mechanisms of Part Processing Machine // *International Applied Mechanics*. 2021. № 57 (4). P. 466–476.
12. Cheng P., Ding H., Cao W.-A. [et al.]. A novel family of umbrella-shaped deployable mechanisms constructed by multi-layer and multi-loop spatial linkage units // *Mechanism and Machine Theory*. 2021. Vol. 161. 104169. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104169.
13. Зеленский А. А., Илюхин Ю. В., Грибков А. А. Память-центрические модели систем управления движением промышленных роботов // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28, № 4. С. 245–256. DOI: 10.34759/vst-2021-4-245-256.
14. Крылов Э. Г., Валиев Р. Ф. Замена в плоском зубчатом рычажном механизме высших кинематических пар низшими парами // *Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2020. Т. 23, № 2. С. 38–45. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-38-45.
15. Кукушкин Е. В. Уравнения движения карданного шарнира // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2021. Т. 23, № 2. С. 79–86. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.10.
16. Саламандра К. Б. Классификация и синтез трехточечных вально-планетарных коробок передач // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. № 1. С. 55–67.
17. Майоров А. В., Мидяков С. М., Петухов В. П. Модернизация тестомесильной машины // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2021. № 4-1 (55). С. 67–70. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-4-1-67-70.
18. Cao Y., Han J. Solution region-based synthesis methodology for spatial HCCC linkages // *Mechanism and Machine Theory*. 2020. Vol. 143. 103619. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103619.
19. Kheylo S. V., Tsarkov A. V., Garin O. A. Kinematic Analysis of Novel 6-DOF Robot // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1126. P. 442–450. DOI: 10.1007/978-3-030-39162-1\_40.
20. Long S., Terakawa T., Komori M. Type synthesis of 6-DOF mobile parallel link mechanisms based on screw theory // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*. 2022. № 16 (1). DOI: 10.1299/jamdsm.2022jamdsm0005.
21. Glazunov V. A., Rashoyan G. V., Aleshin A. K. [et al.]. Structural Synthesis of Spatial 1-Coordinate Mechanisms with Additional Links for Technological Robots // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 902. P. 683–691. DOI: 10.1007/978-3-030-12082-5\_62.
22. Уразаков К. Р., Шайжанов Н. С., Кашбуллин Ю. Р. Автоматический натяжитель приводных ремней станка-качалки // *Нефтегазовое дело*. 2018. Т. 16, № 5. С. 37–43. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-37-43.
23. Трубачев Е. С., Пушкарев А. Э., Пушкарева Т. А. Структурная модель приводов трубопроводной арматуры // *Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2017. Т. 20, № 1. С. 6–8. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-1-6-8.
24. Воробьева Н. С. Стабилизация пространственного положения манипулятора параллельно-последовательной структуры // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 9 (256). С. 17–21. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-9-256-17-21.
25. Пат. 2713662 Российская Федерация, МПК F16H21/48. Шестизвенный шарнирно-рычажный механизм / Мудров А. Г., Сахапов Р. Л. № 2019112698; заявл. 25.04.19, опубл. 06.02.20.

---

**ХАБИБУЛЛИН Фаниль Фаргатович**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиноведения и инженерной графики Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева — КАИ (КНИТУ — КАИ), г. Казань. SPIN-код: 1710-6050  
AuthorID (РИНЦ): 798589  
AuthorID (SCOPUS): 57191953523  
Адрес для переписки: fanil\_arsk@mail.ru

**ИСЛАМОВ Ринат Тагирович**, аспирант кафедры машиноведения и инженерной графики КНИТУ — КАИ, г. Казань.  
Адрес для переписки: Rinat.Islamov@tpprt.ru

**МУСТАФАЕВ Тимур Азисович**, инженер кафедры машиноведения и инженерной графики КНИТУ — КАИ, г. Казань.  
SPIN-код: 1868-5202  
AuthorID (РИНЦ): 1034876  
Адрес для переписки: mustafaev.t@yandex.ru

**КРЫМОВА Виктория Николаевна**, студентка кафедры реактивных двигателей и энергетических установок Института авиации, наземного транспорта и энергетики КНИТУ — КАИ, г. Казань.  
Адрес для переписки: vikulka\_18\_01@mail.ru

#### Для цитирования

Хабибуллин Ф. Ф., Исламов Р. Т., Мустафаев Т. А., Крымова В. Н. Исследование кинематики привода мехатронного устройства на базе пространственного механизма // *Омский научный вестник*. 2022. № 3 (183). С. 48–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-48-52.

Статья поступила в редакцию 09.03.2022 г.

© Ф. Ф. Хабибуллин, Р. Т. Исламов, Т. А. Мустафаев, В. Н. Крымова