

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКЦИЙ В ШАРНИРАХ МЕХАНИЗМА ОРИГИНАЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА

В данной статье рассмотрена разработка методики определения реакций в шарнирах манипулятора на основе классического принципа освобождения от связей в примере его главной части. Составлена модель манипулятора, в которой на рабочую платформу, в общем случае, действует сила F произвольной ориентации. Составлена расчетная схема манипулятора и сделан полный расчет при действии горизонтальной составляющей силой F_x . По аналогии, определены реакции от действия горизонтальной F_y и вертикальной F_z составляющих сил и выведены общие зависимости. Знание численных значений найденных реакций в шарнирах манипулятора позволит, по известным гипотезам, рассчитать данный манипулятор на прочность и жесткость.

Ключевые слова: оригинальный манипулятор, рабочий стол, наклонная платформа, опорно-поворотное устройство, поворотный стол, гидроцилиндр, реакции в шарнирах.

Введение. Оценка технического совершенства технологических машин, разрабатываемых в машиностроении, неразрывно связана с критериями точности исполнительных движений. Данные критерии, в максимальной степени, будут реализованы, если конструктивные элементы механизма будут удовлетворять понятиям прочностной надежности механизма в целом. Исследуем это на примере кинематических пар — вращательных шарниров механизма манипулятора. Для этого рассмотрим механизм манипулятора, описанный в [1–3].

Главная часть пространственного манипулятора (ГПМ) представлена на рис. 1. Под ГПМ будем понимать только его часть, имеющую вращательные кинематические пары — шарниры (рис. 2), в которую не входят: основание и суппорта, движущихся во взаимно перпендикулярных направлениях [1, с. 65].

Как было описано ранее, главная особенность или «оригинальность» данной ГПМ заключается в создании поступательного вертикального движения с помощью двух встречных вращений наклонной платформы 2 и опорно-поворотного стола 3, другими словами, угловые скорости звеньев ω_2 и ω_3 направлены в противоположные стороны [4] (рис. 1). Но, несмотря на особые условия технического решения функционирования манипуляторов [5], главными характеристиками при его эксплуатации являются высокая прочностная надежность и жесткость, которые напрямую связаны с состоянием его кинематических пар или шарниров.

Это особенно проявляется при интенсивных силовых режимах его работы, например, при применении манипуляторов параллельной кинематики

для обеспечения точности обработки [6] и модульного моделирования [7], когда меняются геометрические и кинематические параметры манипулятора. Эти же условия работы возникают при циклических силовых нагрузках в манипуляторах регулярной структуры [8].

Постановка задачи. На рабочий стол 4 в данной ГПМ (рис. 1) действует динамическая сила F произвольной ориентации. Известны геометрические параметры и силы тяжести элементов ГПМ. Задача: разработать методику определения реакций в опорах и реактивные моменты, а также модули и их направления, от действия этой внешней силы и от геометрических характеристик исследуемой ГПМ.

Теория и результаты исследования. Воспользуемся классическим принципом теоретической механики — освобождения от связей: отбросим связи в данном механизме манипулятора, т.е. в исследуемой ГПМ, и заменим их реакциями опор (а где необходимо — реактивными моментами) [9, 10]. При этом запишем систему уравнений равновесия сил и изгибающих моментов, действующих на элементы, из которых состоит ГПМ, в проекциях на координатные оси:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n X_i &= 0; & \sum_{i=1}^n M_{ix} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n Y_i &= 0; & \sum_{i=1}^n M_{iy} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n Z_i &= 0; & \sum_{i=1}^n M_{iz} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где X_i, Y_i, Z_i — проекции действующих сил $F_{x_i}, F_{y_i}, F_{z_i}$ на координатные оси и M_{ix}, M_{iy}, M_{iz} — проекции моментов от действия данных сил относительно координатных осей; n — количество силовых факторов.

Разделим условно ГПМ на 9 элементов: 1 — поворотный стол; a — гидроцилиндр; 2 — наклонная платформа; b — гидроцилиндр; 3 — опорно-поворотное устройство; c — гидроцилиндр; 4 — рабочий стол; cm — левая и правая стойки (рис. 2).

Уравнения равновесия (1) (рис. 2) будут:
Поворотный стол 1:

$$\left. \begin{aligned} \sum Y_i = 0 : (Y_1 + Y^n) - Y_2 = 0; \\ \sum Z_i = 0 : (Z_1 + Z^n) - G_1 + Z_2 = 0; \\ \sum M_{O_{ix}} = 0 : -G_1 \cdot \frac{a}{2} + Z_2 \cdot a = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Правый гидроцилиндр a :

$$\left. \begin{aligned} \sum Y_i = 0 : Y_2 - Y_3 = 0; \\ \sum Z_i = 0 : -Z_2 - G_a + Z_3 = 0; \\ \sum M_{O_{ix}} = 0 : -Z_3 \cdot l_1 \cdot \cos \beta + \\ + Y_3 \cdot l_1 \cdot \sin \beta + G_a \cdot \frac{l_1}{2} \cdot \cos \beta = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Наклонная платформа 2:

$$\left. \begin{aligned} \sum Y_i = 0 : -Y_1' - (Y_1 + Y_1^n) + \\ + Y_3 + (Y_5 + Y^n) = 0; \\ \sum Z_i = 0 : Z_1' - (Z_1 + Z_1') - \\ - G_2 - Z_3 + (Z_5 + Z_5^n) = 0; \\ \sum M_{O_{ix}} = 0 : -G_2 \cdot \frac{c}{2} \cdot \cos \gamma - \\ - Z_3 \cdot b \cdot \cos \gamma - Y_3 \cdot b \cdot \sin \gamma + \\ + (Z_5 + Z_5^n) \cdot c \cdot \cos \gamma - (Y_5 + Y^n) \cdot c \cdot \sin \gamma = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Левый гидроцилиндр b :

$$\left. \begin{aligned} \sum Y_i = 0 : Y_1' - Y_4 = 0; \\ \sum Z_i = 0 : -Z_1' - G_b + Z_4 = 0; \\ \sum M_{O_{ix}} = 0 : Y_4 \cdot l_2 \cdot \sin \alpha + \\ + Z_4 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha - G_b \cdot \frac{l_2}{2} \cdot \cos \alpha = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Опорно-поворотное устройство 3:

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i = 0 : X_A + X_6 + X_B = 0; \\ \sum Z_i = 0 : -Z_A - Z_4 - G_3 - \\ - Z_B - (Z_5 + Z^n) + z_6 = 0; \\ \sum M_{Ax} = 0 : -Z_4 \cdot d_1 - G_3 \cdot (d_1 + d_2) - \\ - Z_B \cdot 2(d_1 + d_2) - (Z_5 + Z_5^n) \cdot \left(d_1 + d_2 + \frac{d}{2}\right) + \\ + Z_6 \cdot (d_1 + d_2) = 0; \\ \sum M_{Ay} = 0 : M_A + M_B + Z_5 \cdot \frac{O_5 O_5''}{2} - \\ - Z_5^n \cdot \frac{O_5 O_5''}{2} + Z_6 \cdot r = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

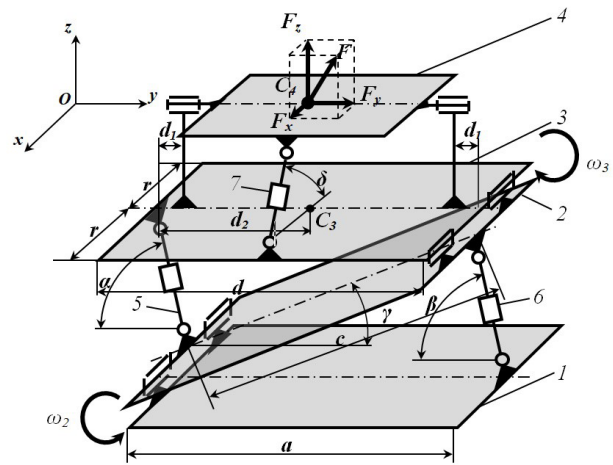


Рис. 1. Модель ГПМ: 1 — поворотный стол; 2 — наклонная платформа; 3 — опорно-поворотное устройство; 4 — рабочий стол; 5, 6, 7 — левый, правый и верхний гидроцилиндры соответственно

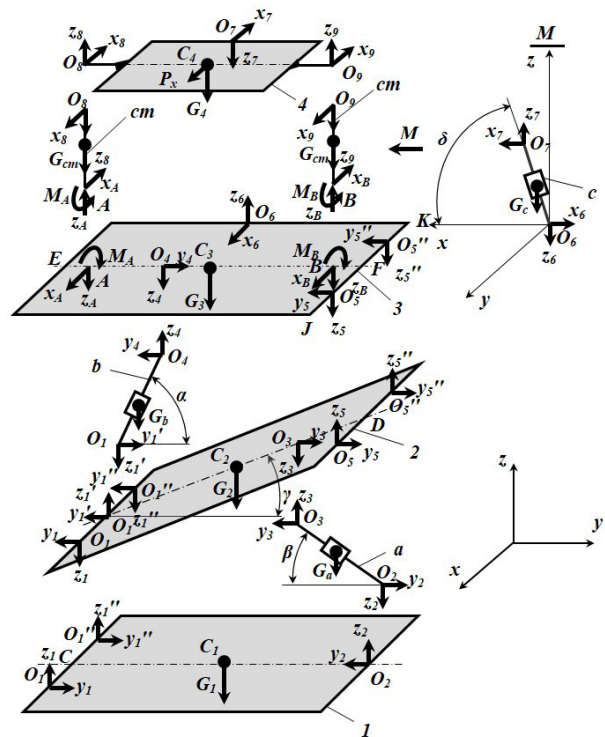


Рис. 2. Расчетная схема ГПМ при нагружении силой P_x : 1 — поворотный стол; a — правый гидроцилиндр; 2 — наклонная платформа; b — левый гидроцилиндр; 3 — опорно-поворотное устройство; c — верхний гидроцилиндр; cm — левая и правая стойки; 4 — рабочий стол

Верхний гидроцилиндр c :

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i = 0 : -X_6 + X_7 = 0; \\ \sum Z_i = 0 : -Z_6 - G_c + Z_7 = 0; \\ \sum M_{O_{iy}} = 0 : X_7 \cdot l_3 \cdot \sin \delta - \\ - Z_7 \cdot l_3 \cdot \cos \delta + G_c \cdot \frac{l_3}{2} \cdot \cos \delta = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Левая стойка cm :

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i = 0 : X_8 - X_A = 0; \\ \sum Z_i = 0 : Z_A - Z_8 - G_{cc} = 0; \\ \sum M_{Ay} = 0 : -M_A + Z_8 \cdot l_{cm} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Правая стойка cm :

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i = 0 : X_9 - X_B = 0; \\ \sum Z_i = 0 : Z_B - Z_9 - G_{cc} = 0; \\ \sum M_{Ay} = 0 : -M_B + X_9 \cdot l_{cc} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Рабочий стол 4

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i = 0 : -X_7 - X_8 - X_9 + P_x = 0; \\ \sum Z_i = 0 : -Z_7 + Z_8 + Z_9 - G_4 = 0; \\ \sum M_{O_{8x}} = 0 : -G_4 \cdot (d_1 + d_2) - \\ - Z_7 \cdot (d_1 + d_2) + Z_9 \cdot 2(d_1 + d_2) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из системы уравнений (2)–(10) путем подстановки и приведения находим:

$$X_6 = X_7 = -\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{l_{cm}}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x + \frac{G_c}{tg\delta} \cdot \left(1 - \frac{l_{cc}}{2(r \cdot tg\delta - l_{cm})} \right) \right] \quad (11)$$

$$X_8 = X_9 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r \cdot tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x - \frac{r \cdot G_c}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} \right) \quad (12)$$

$$Y_1 = Y_1'' = \frac{G_1 + G_a}{4tg\beta}, \quad Y_2 = Y_3 = \frac{G_1 + G_a}{2tg\beta}, \quad (13)$$

$$Y_4 = Y_1' = - \frac{\left[\left(1 - \frac{b}{2c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{tg\beta} \right) \right) \cdot G_1 + \frac{1}{2} \cdot G_2 + \left(1 - \frac{b}{c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{2tg\beta} \right) \right) \cdot G_a + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{tg\gamma}{tg\alpha} \right) \cdot G_b \right]}{tg\alpha - tg\gamma} \quad (14)$$

$$Y_5 = Y_5'' = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\left[\left(1 - \frac{b}{2c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{tg\beta} \right) \right) \cdot G_1 + \frac{1}{2} \cdot G_2 + \left(1 - \frac{b}{c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{2tg\beta} \right) \right) \cdot G_a + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{tg\gamma}{tg\alpha} \right) \cdot G_b \right]}{tg\alpha - tg\gamma} \quad (15)$$

$$Z_1 = Z_1'' = \frac{G_1}{4}, \quad Z_2 = \frac{G_1}{2}, \quad Z_3 = \frac{G_1}{2} + G_a \quad (16)$$

$$Z_1' = \frac{\left[\left(1 - \frac{b}{2c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{tg\beta} \right) \right) \cdot G_1 + \frac{1}{2} \cdot G_2 + \left(1 - \frac{b}{c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{2tg\beta} \right) \right) \cdot G_a \right] \cdot tg\alpha + \frac{1}{2} \cdot G_b \cdot tg\gamma}{tg\alpha - tg\gamma} \quad (17)$$

$$Z_4 = \frac{\left[\left(1 - \frac{b}{2c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{tg\beta} \right) \right) \cdot G_1 + \frac{1}{2} \cdot G_2 + \left(1 - \frac{b}{c} \left(1 + \frac{tg\gamma}{2tg\beta} \right) \right) \cdot G_a + \left(1 - \frac{tg\gamma}{2tg\alpha} \right) \cdot G_b \right] \cdot tg\alpha}{tg\alpha - tg\gamma} \quad (18)$$

$$Z_5 = Z_5'' = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\frac{b}{2c} \cdot \left(1 + \frac{tg\gamma}{tg\beta} \right) \cdot tg\alpha - tg\gamma}{tg\alpha - tg\gamma} \cdot G_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{tg\alpha - 2tg\gamma}{tg\alpha - tg\gamma} \cdot G_2 + \frac{\frac{b}{c} \cdot \left(1 + \frac{tg\gamma}{2tg\beta} \right) \cdot tg\alpha - tg\gamma}{tg\alpha - tg\gamma} \cdot G_a - \frac{1}{2} \cdot \frac{tg\gamma}{tg\alpha - tg\gamma} \cdot G_b \right] \quad (19)$$

$$Z_6 = - \left[\frac{l_{cm} \cdot tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x - \frac{l_{cm} \cdot G_c}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} \right] \quad (20)$$

$$Z_8 = Z_9 = -\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{l_{cm} \cdot tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x - \frac{l_{cm} \cdot G_c}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} + \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_a + G_b + 2G_{cm}}{2} \right] \quad (22)$$

$$Z_7 = - \left[\frac{l_{cm} \cdot tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x - \frac{l_{cm} \cdot G_c}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} + \frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_a + G_b + 2G_{cm}}{2} \right] \quad (21)$$

$$Z_A = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r \cdot tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x - \frac{r \cdot G_c}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} \right) + G_{cm} \quad (23)$$

$$Z_B = -\frac{1}{2} \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{l_{cm} \cdot tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot P_x - \\ - \frac{l_{cm} \cdot G_c}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} + G_1 + G_2 + G_3 + G_a + G_b \end{array} \right] \quad (24)$$

$$M_A = M_B = \left[\frac{r \cdot tg\delta}{2r \cdot tg\delta - 2l_{cm}} \cdot P_x - \frac{r \cdot G_c}{4r \cdot tg\delta - 4l_{cm}} \right] \cdot (25)$$

Аналогично составляются расчетные схемы ГПМ для определения реакций в шарнирах при нагружении силами F_y и F_z . Опуская выкладки и приведение, запишем выведенные зависимости для расчёта составляющих реакций опор:

$$Y_4 = Y'_1 = - \left[\begin{array}{l} \left(\frac{l_{cm}}{d_2 + \frac{d}{2}} \right) \cdot tg\alpha \times \\ \times P_y - \frac{(G_3 + G_4 + 2G_{cm}) \cdot \frac{d}{2}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha} - \frac{G_b}{2tg\alpha} \end{array} \right] \quad (26)$$

$$Y_5 = Y''_5 = \frac{1}{2} \cdot \left[\begin{array}{l} \left(1 - \frac{l_{cm}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha} \right) \cdot P_y + \\ + \frac{(G_3 + G_4 + 2G_{cm}) \cdot \frac{d}{2}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha} + \frac{G_b}{2tg\alpha} \end{array} \right] \quad (27)$$

$$Y_8 = Y_9 = Y_A = Y_B = \frac{1}{2} \cdot P_y \quad (28)$$

$$Z'_1 = \left(\frac{l_{cm}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right)} \right) \cdot P_y - \frac{(G_3 + G_4 + 2G_{cm}) \cdot \frac{d}{2}}{d_2 + \frac{d}{2}} - G_b \quad (29)$$

$$Z_4 = \left(\frac{l_{cm}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right)} \right) \cdot P_y - \frac{(G_3 + G_4 + 2G_{cm}) \cdot \frac{d}{2}}{d_2 + \frac{d}{2}} \quad (30)$$

$$Z_5 = Z''_5 = -\frac{1}{2} \cdot \left[\begin{array}{l} \left(\frac{l_{cm}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right)} \right) \times \\ \times P_y + \frac{(G_3 + G_4 + 2G_{cm}) \cdot \frac{d}{2}}{d_2 + \frac{d}{2}} \end{array} \right] \quad (31)$$

$$Z_6 = Z_7 = \frac{G_c}{2} \quad (32)$$

$$Z_8 = Z_9 = \frac{1}{2} \cdot \left(P_z - G_4 - \frac{G_c}{2} \right) \quad (33)$$

$$Z_A = Z_B = - \left[\frac{1}{2} \cdot \left(G_4 + \frac{G_c}{2} \right) + G_{cm} \right] \quad (34)$$

$$M_A = M_B = \frac{1}{2} \cdot P_y \cdot l_{cm} \quad (35)$$

Итоговые реакции и реактивные моменты найдём по известной формуле [9, с. 97]:

$$R_i = \sqrt{X_R^2 + Y_R^2 + Z_R^2}, \quad M_i = \sqrt{M_{Rx}^2 + M_{Ry}^2} \quad (36)$$

где X_{Ri} , Y_{Ri} , Z_{Ri} — это реакции в шарнирах от действия приложенных внешних сил, в направлении координатных осей x , y и z соответственно; M_{Rxi} , M_{Ryi} — реактивные моменты от действия приложенных внешних сил в направлении координатных осей x , y ; i — индекс шарнира.

В частности, если необходимо определить реакции опор для макета данного оригинального манипулятора при проведении экспериментов в динамике, например, в крутильных колебаниях (вибрациях) ротора, установленного на рабочем столе, то можно опустить массы элементов конструкции как сравнительно малые величины. Тогда для данного примера:

$$R_{8x} = R_{9x} \approx \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \cdot \sqrt{r^2 + l_{cm}^2} \right) \cdot P_x,$$

$$R_{8y} = R_{9y} \approx \frac{1}{2} \cdot P_y, \quad R_{8z} = R_{9z} \approx \frac{1}{2} \cdot P_z,$$

$$R_8 = R_9 \approx \frac{1}{2} \times$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{tg\delta}{r \cdot tg\delta - l_{cm}} \right)^2 \cdot (r^2 + l_{cm}^2) \cdot P_x^2 + P_y^2 + P_z^2},$$

$$R_{6x} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{l_{cm} \cdot \sqrt{1 + 3 \sin^2 \delta}}{(r \cdot tg\delta - l_{cm}) \cdot \cos \delta} \cdot P_x,$$

$$R_{7x} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{l_{cm} \cdot \sqrt{1 + 3 \sin^2 \delta}}{(r \cdot tg\delta - l_{cm}) \cdot \cos \delta} \cdot P_x,$$

$$R_6 = R_7 \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{l_{cm} \cdot \sqrt{1 + 3 \sin^2 \delta}}{(r \cdot tg\delta - l_{cm}) \cdot \cos \delta} \cdot P_x,$$

$$R_{5y} = R_{5'y} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha - l_{cm} \right]^2 + (l_{cm} \cdot tg\alpha)^2}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha} \cdot P_y,$$

$$R_{5z} = R_{5'z} \approx 0,$$

$$R_5 = R_{5''} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha - l_{cm} \right]^2 + (l_{cm} \cdot tg\alpha)^2}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right) \cdot tg\alpha} \cdot P_y,$$

$$R_{4y} \approx \frac{l_{cm}}{\left(d_2 + \frac{d}{2} \right)} \cdot P_y,$$

$$R_{4z} = \sqrt{y_4^2 + z_4^2} \approx \sqrt{0^2 + 0^2} = 0,$$

$$R_4 = R_{O_1} \approx \frac{I_{cm}}{\left(d_2 + \frac{d}{2}\right)} \cdot P_y \cdot \sin \alpha$$

Выводы. 1. Таким образом, используя зависимости (11)–(25), (26)–(35), определяются составляющие реакции в шарнирах оригинального манипулятора, действующие в направлении координатных осей x , y и z . Далее, по известному соотношению (36), находятся полные реакции и реактивные моменты в шарнирах.

2. Из примера по определению реакций для макета видно, что основные нагружения шарниров находятся в точках O_4 , O_5 , O_6 и O_7 , т.е. непосредственно — сдвоенные шарниры наклонной платформы 2 и шарниры с соединения верхнего гидроцилиндра с рабочим столом 4 и опорно-поворотным устройством 3, что не противоречит теории прочностной надежности в структурном анализе манипулятора.

3. Знание численных значений найденных реакций в шарнирах позволяет по известным гипотезам рассчитать данный манипулятор на прочность, что очень важно при значительных статических и внешних динамических нагрузках на рабочие элементы манипулятора.

4. Несмотря на конкретную особенность или оригинальность исследуемого манипулятора, данная методика определения составляющих реакций в кинематических парах (шарнирах) манипулятора является универсальной и технологичной в расчетах, т.к. используются простые классические уравнения статики, применяемые во многих элементах механизмов и машин.

Библиографический список

1. Балакин П. Д., Шамутдинов А. Х. Схемное решение механизма пространственного манипулятора // Омский научный вестник. 2012. № 2. С. 65–69.
2. Пат. 170930 Российская Федерация, МПК В 25 J 1/00. Пространственный механизм с шестью степенями свободы / Балакин П. Д., Шамутдинов А. Х. № 2016115295; заявл. 19.05.2016; опубл. 15.05.2017, Бюл. № 14.
3. Богатырева Ж. И., Серебрянский А. И., Кубарев А. С. Методика определения эксплуатационных показателей в узлах трения манипуляторного технологического оборудования специальной авиационной техники // Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф., 06–07 июня 2019 г. Воронеж: Изд-во Ин-

ститута экономики и права, 2019. С. 34–37. ISBN 978-5-94638-103-1.

4. Люкшин В. С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. Москва: Машиностроение, 1967. 372 с.
5. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1966. Vol. 38, no. 4. P. 30–35. DOI:10.1108/EB034141.
6. Koltsov A. G., Blokhin D. A., Krivonos E. V., Shamutdinov A. H. Analysis of parameters for technological equipment of parallel kinematics based on rods of variable length for processing accuracy assurance // Journal of Physics: Conference Series. 2018. 944012053. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012053.
7. Orsino R. M. M., Hess-Coelho T. A., Malvezzi F. Applications of the modular modelling methodology to the dynamic analysis of parallel manipulators with common subsystems // International Conference on the theory of machines and mechanisms. 2021. Vol. 85. P. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-030-83594-1_13.
8. Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Москва: Наука, 2006. Кн. 1. 383 с. ISBN 5-02-033952-0.
9. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. В 2 ч. Ч. 1. Статика. Кинематика. Москва: Высшая школа, 1966. 439 с.
10. Артоболовский И. И. Теория механизмов и машин. Москва: Наука, 1975. 640 с. ISBN 5-02-013810-X.

ШАМУТДИНОВ Айдар Харисович, кандидат технических наук, профессор РАЕ (Российской Академии Естествознания), доцент кафедры «Техническая механика» Омского автобронетанкового инженерного института, г. Омск.

SPIN-код: 4939-6254

AuthorID: 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ЛЕСНЯК Иван Юрьевич, кандидат технических наук, и. о. заведующего, доцент кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6114-0646

ResearcherID: E-6397-2014

ORCID: 0000-0002-9481-5985.

Для переписки: lesnyak.ivan@gmail.com

Для цитирования

Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю. Методика определения реакций в шарнирах механизма оригинального манипулятора // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 28–32. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-28-32.

Статья поступила в редакцию 04.02.2022 г.

© А. Х. Шамутдинов, И. Ю. Лесняк