

Інформаційні технології в економіці, підприємстві та виробництві

УДК 629.73.002

DOI: 10.30748/soi.2017.149.26

В.В. Воронько, И.В. Шостак, И.А. Воронько, В.Н. Степаненко, Д.И. Завистовский

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА ДЛЯ ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В статье разработаны динамические модели «манипулятор с упругой связью в схвате» и «манипулятор – упругий схват – дорновальная машина (пневмоимпульсное устройство)», а также метод формирования уравнений динамики манипулятора при дорновании отверстий в конструкциях летательных аппаратов; синтезирована модель динамики робото-технического комплекса (промышленный робот) по дорнованию отверстий, которая реализована в форме метода вычисления переменных, характеризующих процесс дорнования отверстий пневмоимпульсными устройствами в конструкциях летательных аппаратов. Изложенные теоретические результаты предполагается использовать при роботизации процессов сборки конструкций летательных аппаратов для повышения точности и стабильности результатов, и для снижения доли рутинного труда в работе слесарей-сборщиков.

Ключевые слова: *промышленный робот, робото-технический комплекс, пневмоимпульсные устройства, дорнование отверстий, динамическая модель, манипулятор, конструкции летательных аппаратов.*

Введение

Повышение эффективности отечественного производства летательных аппаратов и его интенсификация определяются необходимостью ускорения научно-технического развития, проявляющимся в росте экономической, социальной и технической значимости внедряемых инноваций. Величина экономического эффекта от внедрения инноваций в значительной степени зависит от того, как сокращаются затраты живого труда. Даже с учетом того, что сейчас в отечественном самолетостроении примерно 60% общей суммы расходов на производство продукции составляют материальные затраты, связанные с овеществленным трудом (производство и первичная переработка сырья, топлива, энергии), доля затрат живого труда на заключительной стадии изготовления (обработка, сборка) все же достаточно высока – свыше 40 % – и распределена неравномерно. Так, трудоемкость сборочных операций в общей трудоемкости изготовления самолетов нередко достигает 60 % и более, тогда как автоматизировано – 9...12 % общего объема сборочных работ (для сравнения – в механообработке соответственно 20 и 80 %) [1–8].

Низкий уровень автоматизации сборочных процессов в отечественном производстве летательных аппаратов объясняется следующими основными факторами:

– спецификой и многообразием сборочных операций, заключающимися в высоких требованиях

к характеристикам сопряжения и необходимости выполнения ряда специфических переходов, в частности, кроме основных, технологический сборочный процесс включает также подготовительные (контроль, сортировка, комплектация), вспомогательные (выходной контроль, поштучное и партионное деление, отсчет, транспортирование к сборочной позиции), сопутствующие (например, гибка, зачистка, рихтовка), а также послесборочные операции (доводка);

– быстрой сменяемостью объектов производства и их выпуском малыми сериями;

– необходимостью адаптации методов и средств автоматизации к существующим техпроцессам без соответствующего анализа технологичности изделия и самого процесса с точки зрения возможности его автоматизированного изготовления и определения требуемого уровня автоматизации.

Качественно новым решением проблемы сокращения доли живого труда в условиях конвейерной сборки конструкций летательных аппаратов является применение промышленных роботов в качестве переналаживаемых сборочных средств с гибкими технологическими свойствами [1; 2]. Последнее сопряжено с рядом трудностей, вызванных необходимостью разработки новых принципов организации производства, изменения технологии сборочных процессов, создания нового технологического оборудования и средств упорядочения среды, с которой взаимодействует про-

мышленный робот. Промышленный робот (ПР) – перепрограммируемое автоматическое устройство, применяемое в производственном процессе для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям человека, при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки [3]. Выполнение ПР двигательных функций сочетается с выполнением функций управления и контроля (например, ПР с адаптивным управлением).

Как показывает мировой опыт [5; 7; 8], успешное внедрение ПР в сборочное производство на самолетостроительном предприятии может быть обеспечено в результате применения гибких перенастраиваемых структур и элементов робототехнических систем, организованных по модульному принципу, и способных использовать при реализации технологических операций устройства, аналогичные по своим характеристикам тем, которые применяются слесарями-сборщиками.

Целью данной статьи является изложение процесса синтеза динамической модели промышленного робота, способного эффективно воспроизводить действия слесаря-сборщика при дорновании отверстий в самолетных конструкциях с использованием дорновальной машины с пневмоприводом.

1. Постановка задачи

Дано: манипулятор с упругим схватом (рис. 1), функционирующий в прямоугольной системе координат; дорновальная машина с пневмоприводом, непосредственно удерживаемая схватом манипулятора.

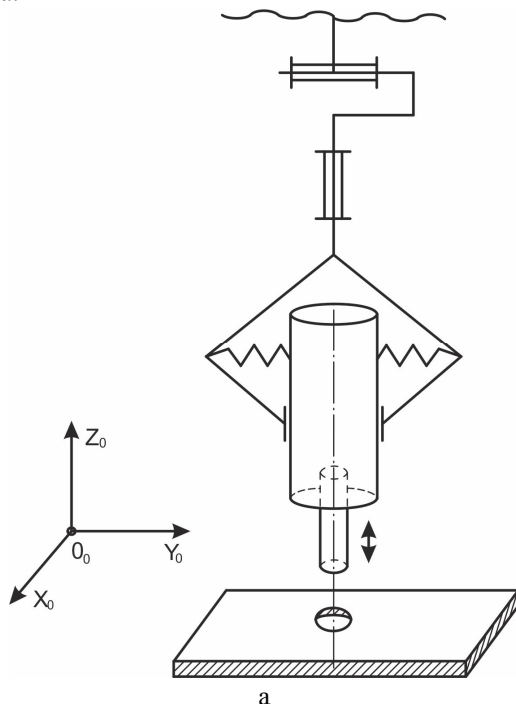


Рис. 1. Фрагмент кинематической схемы манипулятора с выходным звеном типа "упругий схват"

Получить: модель динамики манипулятора и метод управления им при дорновании отверстий.

Методический базис решения задачи: методы механики для построения динамической модели манипулятора; метод кинестатики, основанный на управлениях Лагранжа и позволяющий реализовать управление манипулятором в процессе дорнования отверстий, принцип Даламбера.

Последовательность этапов решения задачи:

- а) синтез динамической модели манипулятора с упругой связью в схвате;
- б) синтез динамической модели "манипулятор – упругий схват–дорновальная машина";
- в) разработка метода формирования управлений динамики манипулятора при дорновании отверстий.

2. Динамическая модель манипулятора с упругой связью в схвате

Рассмотрим систему "схват–дорновальная машина" n -звенного промышленного робота–манипулятора при наличии упругой связи между ними (рис. 2).

Введем следующие системы координат: система $O_n X_n Y_n Z_n$ и $O_{n+1} X_{n+1} Y_{n+1} Z_{n+1}$ подвижные и связаны соответственно с геометрическим центром схвата и центром масс дорновальной машины. Примем, что в положении равновесия геометрические центры схвата и дорновальной машины совпадают и деформации упругих элементов равны нулю.

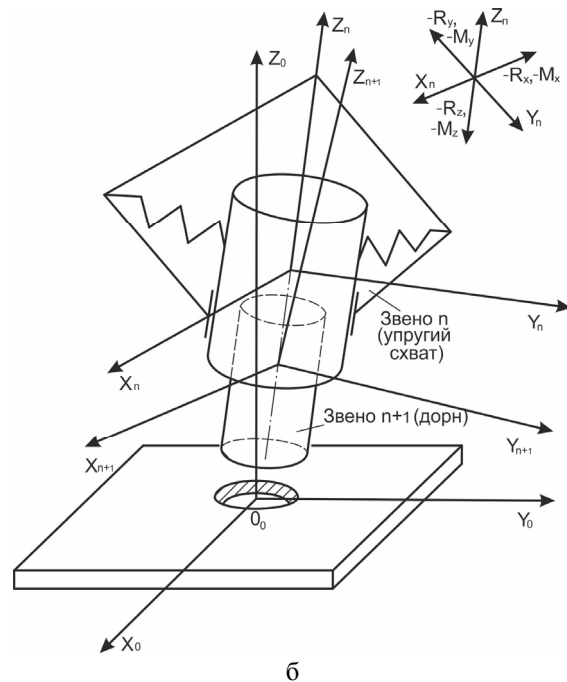


Рис. 2. Кинематическая система "упругий схват–дорновальная машина"

Примем также, что линейные и угловые жесткости закрепления дорновальной машины в схвате соответственно равны $C_x = C_y = C_z = C$; $C_{\varphi_x} = C_{\varphi_y} = C_{\varphi_z} = C_\varphi$, сила упругости $F_i = c_i \Delta x_i$, где C_i – жесткость i -й упругой связи; Δx_i – деформация упругого элемента соответствующей координаты, которая равна смещению x_{in} -й оси относительно $x_{i(n+1)}$ -й, то есть $\Delta x_i = x_{i(n+1)} - x_{in}$.

Будем считать, что угловые отклонения схвата и дорновальной машины от осей неподвижной системы координат $O_0x_0y_0z_0$ малы, тогда за обобщенные координаты можно принять углы поворота этих тел относительно осей системы $O_0x_0y_0z_0$.

Составим уравнение движения схвата манипулятора относительно неподвижной системы координат. Используя уравнения Эйлера для абсолютно твердого тела, закрепленного в одной точке, и теорему об изменении кинематического момента твердого тела [1], заметим для схвата:

$$\begin{aligned} \ddot{E} J_{xn} \varphi_{xn} &= -R_{yn} \dot{1}_n + \\ &+ C_\varphi (\varphi_{x(n+1)} - \varphi_{xn}) + M_{nx}; \\ \ddot{E} J_{yn} \varphi_{yn} &= -R_{xn} \dot{1}_n + \\ &+ C_\varphi (\varphi_{y(n+1)} - \varphi_{yn}) + M_{ny}; \\ \ddot{E} J_{zn} \varphi_{zn} &= C_\varphi (\varphi_{z(n+1)} - \varphi_{zn}) + \\ &+ M_{nz}. \end{aligned} \quad (1)$$

На основе теоремы о движении центра масс запишем:

$$\begin{aligned} \ddot{E} m_n x_n &= C_\varphi (x_{n+1} - x_n) + R_{xn}; \\ \ddot{E} m_n y_n &= C_\varphi (y_{n+1} - y_n) + R_{yn}; \\ \ddot{E} m_n z_n &= C_\varphi (z_{n+1} - z_n) + R_{zn}, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ_{xn} , φ_{yn} , φ_{zn} – обобщенные координаты, определяющие угловое положение схвата относительно неподвижной системы координат; $\varphi_{x(n+1)}$, $\varphi_{y(n+1)}$, $\varphi_{z(n+1)}$ – обобщенные координаты, определяющие угловое положение дорновальной машины относительно неподвижной системы координат; J_{xn} , J_{yn} , J_{zn} – моменты инерции схвата относительно осей неподвижной системы координат; R_{xn} , R_{yn} , R_{zn} , M_{nx} , M_{ny} , M_{nz} – силы и моменты в шарнире n , соединяющем схват с предыдущим звеном; m_n – масса звена; F_i – сила упругости i -й связи.

Запишем уравнение движения дорновальной машины относительно неподвижной системы координат:

$$\begin{aligned} \ddot{E} J_{x(n+1)} \varphi_{x(n+1)} &= -C_\varphi (\varphi_{x(n+1)} - \varphi_{xn}); \\ \ddot{E} J_{y(n+1)} \varphi_{y(n+1)} &= -C_\varphi (\varphi_{y(n+1)} - \varphi_{yn}); \\ \ddot{E} J_{z(n+1)} \varphi_{z(n+1)} &= -C_\varphi (\varphi_{z(n+1)} - \varphi_{zn}). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{E} m_{n+1} x_{n+1} &= -C_\varphi (x_{n+1} - x_n); \\ \ddot{E} m_{n+1} y_{n+1} &= C_\varphi (y_{n+1} - y_n); \\ \ddot{E} m_{n+1} z_{n+1} &= C_\varphi (z_{n+1} - z_n). \end{aligned} \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений (3–4) представляет собой динамическую модель упруго-вязанной системы "манипулятор–дорновальная машина".

Построим уравнения движения манипулятора с учетом сил и моментов, действующих на любое из n звеньев, используя при этом принцип Даламбера – Лагранжа. В результате будет получена математическая модель n -звенного манипулятора с учетом упругой связи в схвате и массы закрепленной в схвате дорновальной машины, графическое представление фрагмента данной модели показано на рис. 2.

Для звена i манипулятора момент сил инерции может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} \overline{M}_{c_i}^n &= (\overline{\omega}_i \overline{\theta}_{c_i}) \overline{\omega}_i + \overline{\theta}_{c_i} \overline{\varepsilon}_i = (\overline{\omega}_i \overline{\theta}_{c_i}) \overline{\omega}_i + \\ &+ \overline{\theta}_{c_i} \left(\sum_{k=1}^i q_k \overline{a}_k + \overline{b}_i \right) = \sum_{k=1}^i \overline{M}_{ik} \overline{q}_k + \overline{M}_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{M}_{ik} &= \overline{\theta}_{c_i} \overline{a}_k; \\ \overline{M}_i &= \overline{\theta}_{c_i} \overline{b}_i + (\overline{\omega}_i \overline{\theta}_{c_i}) \overline{\omega}_i; \end{aligned}$$

$$\overline{\theta}_c = \begin{vmatrix} J_x & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_y & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_z \end{vmatrix}, \quad (6)$$

$\overline{\theta}_c$ – тензор инерции i -го звена в связанных с ним осях; $\overline{\omega}_i$ – вектор угловой скорости i -го звена; $\overline{b}_i = \overline{b}_i \begin{pmatrix} q_i \\ q_i \end{pmatrix}$ – векторный коэффициент, инвариантный к обобщенным ускорениям.

При совершении каждого виртуального перемещения $\delta \overline{\varphi}_j$, $\delta \overline{S}_j$ во вращательной или поступательной паре i -е звено, для которого $i > j$ получает перемещение, а приложенные к нему силы и момен-

ты совершают работу. При этом виртуальная работа при виртуальном угловом перемещении $\delta\bar{\varphi}_j$ в j -м звене:

$$\sum_{i=j}^n [\bar{M}_i^n \delta\bar{\varphi}_j + (\bar{P}_i + \bar{F}_i^n) (\delta\bar{\varphi}_j; \bar{r}_{ji}) + \bar{M}_i \delta\bar{\varphi}_j + \bar{R}_n (\delta\bar{\varphi}_j; \bar{r}_{jn}) + \bar{M}_n \delta\bar{\varphi}_j] = 0; \quad (7)$$

для поступательного же виртуального перемещения $\delta\bar{S}_j$ в j -м звене, виртуальная работа представляется как:

$$\sum_{i=j}^n (\bar{P}_i + \bar{F}_i^n) \delta\bar{S}_i^{(j)} + \bar{Q}_j \delta\bar{S}_i^{(j)} + \bar{R}_n \delta\bar{S}_i^{(j)} = 0. \quad (8)$$

Введенные в уравнения (7–8) математические объекты имеют следующий смысл: $(\delta\bar{\varphi}_j; \bar{r}_{ji})$ – перемещение центра масс j -го звена при виртуальном угловом перемещении, причем $\delta\bar{\varphi}_j = \delta\varphi_j \bar{e}_j$; \bar{e}_j – направляющий вектор j -го звена; \bar{r}_{ji} – радиус-вектор, определяющий положение центра звена i относительно звена j .

Для получения математической модели динамики манипулятора, учитывающей наличие упругой связи в схвате, и массу упруго закрепленной дорновальной машины, необходимо подставить в уравнение (7) и (8) выражение для \bar{F}_i^n и \bar{M}_i^n :

$$-\sum_{i=j}^n [\sum_{i=j}^n \bar{M}_i \bar{e}_j - m_i \bar{e}_{ik} (\bar{e}_j + \bar{r}_{ji})] + (\delta\bar{\varphi}_j; \bar{r}_{ji}) q_k + \bar{P}_i (\bar{e}_j; \bar{r}_{ji}) + \bar{M}_j + \bar{R}_n (\bar{e}_j; \bar{r}_{jn}) + \bar{M}_n \bar{e}_j = 0; \quad (9)$$

$$\sum_{i=j}^n m_i \bar{e}_{ik} \bar{e}_j q_k + \bar{P}_j \bar{e}_j + \bar{Q}_j + \bar{R}_n \bar{e}_j = 0. \quad (10)$$

Уравнение (9) описывает вращательное движение звена, соответствующего упругому схвату промышленного робота-манипулятора, (10) – движение того же звена.

3. Динамическая модель "манипулятор – упругий схват–дорновальная машина"

Рассмотрим задачу дорнования отверстия в роботизированном режиме, когда положение дорновальной машины задается промышленным роботом-манипулятором с упругим элементом в схвате.

Будем считать, что манипулятор перемещается в прямоугольной системе координат (рис. 3).

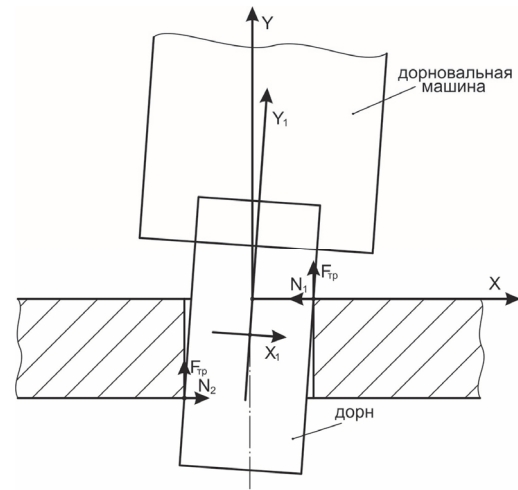


Рис. 3. Кинематическая схема комплекса "манипулятор с упругим схватом–дорновальная машина"

Система уравнений, описывающих динамику рассматриваемого манипулятора:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= c_x (x_2 - x_1) \cos \beta; \\ \ddot{y}_1 &= c_y (y_2 - y_1) \sin \beta - P_M; \\ J_c \ddot{\alpha} &= c_\alpha (\beta - \alpha). \end{aligned} \quad (11)$$

где x_2, y_2 – координаты геометрического центра манипулятора в неподвижной системе координат O_{xy} , связанной с отверстием; β – угол между осью схвата манипулятора и осью y неподвижной системы координат; x_1, y_1 – координаты центра дорна в системе координат O_{xy} ; α – угол, который может возникнуть между осями дорна и отверстия; J_M – момент инерции схвата относительно горизонтальной оси поворота; M – приведенная масса манипулятора; P_M – вес манипулятора; c_x, c_y, c_β – коэффициенты упругости механизма захвата дорновальной машины; $F_{x \text{ упр}}, F_{y \text{ упр}}$ – управляющие силы по осям x_2 и y_2 ; $F_{\beta \text{ упр}}$ – управляющий момент по углу β .

Поскольку угловая жесткость манипулятора значительно превышает угловую жесткость крепления дорновальной машины в схвате, для декартовой системы координат допустимо принять $\beta = \text{const}$, $\beta \ll \alpha$, $c_x = c_y$. С учетом принятых допущений, уравнения движения дорновальной машины в упругом схвате будут иметь вид:

$$\begin{aligned} m \ddot{x}_1 &= c_x (x_2 - x_1) \cos \beta; \\ m \ddot{y}_1 &= c_y (y_2 - y_1) + \\ &+ (f \cos \alpha + \sin \alpha) N_1 - P_M; \\ J_c \ddot{\alpha} &= \left(f \frac{d}{2} - \frac{l}{2} + h \right) N_1 + \\ &+ c_\alpha (\beta - \alpha). \end{aligned} \quad (12)$$

где m – масса дорновальной машины;

J_c – момент инерции дорновальной машины относительно ее центра масс.

Построим динамическую модель отклонения дорновальной машины (и, соответственно, дорна) в вертикальной плоскости. При этом уравнения движения для случая, показанного на рис. 3, имеют вид:

$$\begin{aligned} m \ddot{x}_1 &= c_x (x_2 - x_1) - \\ &- (f \sin \alpha - \cos \alpha) N_1; \\ m \ddot{y}_1 &= c_y (y_2 - y_1) + \\ &+ (f \cos \alpha + \sin \alpha) N_1 - P_M; \\ J_c \ddot{\alpha} &= \left(f \frac{d}{2} - \frac{l}{2} + h \right) N_1 + \\ &+ c_\alpha (\beta - \alpha). \end{aligned} \quad (13)$$

где $\frac{l}{2} + h = y_1 \cos \alpha - \left(\frac{D}{2} - x_1 \right) \sin \alpha$; f – коэффициент трения; l – рабочая длина дорна; d – диаметр дорна; D – диаметр обрабатываемого отверстия; N_1 – реакция обрабатываемой поверхности в зоне контакта с дорном.

Для случая, представленного на рис. 3, уравнения движения примут вид:

$$\begin{aligned} m \ddot{x}_1 &= c_x (x_2 - x_1) + \\ &+ (f \sin \alpha - \cos \alpha) N_2; \\ m \ddot{y}_1 &= c_y (y_2 - y_1) + \\ &+ (f \cos \alpha + \sin \alpha) N_2 - P_M; \\ J_c \ddot{\alpha} &= \left(f \frac{d}{2} - \frac{l}{2} + h \right) N_2 + \\ &+ c_\alpha (\beta - \alpha). \end{aligned} \quad (14)$$

И в первом, и во втором случае на движение дорна накладываются условия связи вида:

$$\left(\frac{D}{2} - x_1 \right) \cos \alpha + y_1 \sin \alpha = \frac{d}{2}. \quad (15)$$

Таким образом, уравнения (12–14) и (15) в комплексе представляют собой динамическую модель роботизированного дорнования отверстий для случая, когда дорновальная машина удерживается упругим схватом манипулятора.

4. Метод формирования уравнений динамики манипулятора при дорновании отверстий

В качестве промышленного робота, управляющего дорновальной машиной, рассмотрим n -звенный манипулятор как систему, состоящую из твердых тел, соединенных вращательными парами. Будем считать, что движения любой пары отражаются в правой декартовой системе координат. При этом: начало координат O_i любого i -го звена расположено в центре шарнира; ось O_{iz_i} направлена по оси шарнира; ось O_{iy_i} образуется общим перпендикуляром к осям O_{i-1} и O_{iz_i} , имеющим направление от O_{i-1} к O_{iz_i} ; ось O_{ix_i} дополняет декартову систему координат до правой. Очевидно, нулевая система координат должна быть привязана к стойке манипулятора.

Пусть $q_i(t)$ – угол поворота i -го звена относительно $(i-1)$ -го. Совокупность углов поворота всех вращательных пар однозначно определяет положение манипулятора в пространстве. Исходя из этого обстоятельства, логично совокупность значений $q_i(t)$ назвать обобщенными координатами манипулятора.

Будем считать, что в подвижной системе координат любого i -го звена известны векторы, определяющие геометрию звеньев: \vec{r}_i – радиус-вектор центра масс c_i i -го звена; \vec{b}_i – радиус-вектор смещения точки O относительно x_i ; \vec{h}_i – радиус-вектор точки пересечения осей x_i и z_i ; $\vec{R}_i = \vec{h}_i + \vec{b}_i$ – радиус-вектор между началами i -й и $(i+1)$ -й систем координат.

Кроме того, предположим, что известны α_i – углы поворота оси z_i относительно z_{i-1} и углы начального положения q_{i0} для любого i -го звена.

Для обеспечения коллинеарности базисов подвижных систем координат и инерциальной системы координат используем матрицы поворота:

$$M_{qi} = \begin{vmatrix} \cos q_i & -\sin q_i & 0 \\ \sin q_i & \cos q_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (16)$$

$$M_{ai} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{vmatrix}, \quad (17)$$

где M_{qi} – матрица поворота осей $O_{x_i y_i z_i}$ относительно z_i до момента, когда оси x_i и x_{i-1} станут

коллинеарными; M_{oi} – матрица поворота осей $O_{x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}}$ относительно оси x_{i-1} до момента, когда оси z_i и z_{i-1} станут коллинеарными.

Преобразование координат векторов, заданных в i -й системе, в координаты неподвижной системы достигается умножением на матрицы поворота (16) и (17), начиная с i -й системы координат до системы $O_{x_0y_0z_0}$.

Проекции векторов в неподвижной системе координат для любого i -го звена вычисляются следующим образом:

$$[r_i] = \prod M_k [r_i]^i, \quad (18)$$

где $[r_i]$ – столбец координат вектора \vec{r}_i в системе $O_{x_0y_0z_0}$.

Проекции векторов \vec{R}_{ci} и \vec{R}_{oi} в неподвижной системе координат вычисляются по формулам:

$$[R_{ci}] = \sum_{j=1}^{i-1} R_j, [R_{oi}] = [R_{ci}] + [r_i]. \quad (19)$$

С использованием выражений (15–19) определяются выражения линейных и угловых скоростей и ускорений центров масс звеньев C_i и центров шарниров O_i в зависимости от первых и вторых производных обобщенных координат q_i по времени, с учетом геометрических параметров звеньев.

$$\vec{\Omega}_i = \sum_{j=1}^i \vec{e}_j q_j, \quad (20)$$

где $\vec{\Omega}_i$ – абсолютная угловая скорость i -го звена, \vec{e}_j – единичный вектор (орт оси); q_j – первая производная по времени от обобщенной координаты.

$$\vec{v}_{oi} = \vec{v}_{o(i-1)} = \sum_{j=1}^{i-1} \vec{e}_j q_j \cdot \vec{R}_{i-1}, \quad (21)$$

где \vec{v}_{oi} , $\vec{v}_{o(i-1)}$ – соответственно линейные скорости центров i -го и $(i-1)$ -го шарниров манипулятора.

$$\vec{v}_{ci} = \vec{v}_{oi} + \sum_{j=1}^i \vec{e}_j q_j \cdot \vec{r}_{ji}, \quad (22)$$

где \vec{v}_{ci} – линейная скорость центра масс i -го звена; \vec{r}_{ji} – радиус-вектор с началом в центре шарнира O_j и концом в центре масс C_i .

$$\vec{\xi}_i = \sum_{j=1}^i \vec{e}_j \ddot{q}_j + \sum_{s=2}^{i-1} \sum_{j=1}^{s-1} (\vec{e}_j \cdot \vec{e}_s) q_j q_s, \quad (23)$$

где $\vec{\xi}_i$ – абсолютное угловое ускорение i -го звена;

$$\vec{a}_{ci} = \vec{a}_{o(i-1)} + \vec{\xi}_{i-1} \cdot \vec{R}_{i-1} + \vec{\Omega}_i \cdot (\vec{\Omega}_i \cdot \vec{e}_{i-1}), \quad (24)$$

где \vec{a}_{ci} – линейное ускорение центра масс i -го звена.

Проведя ряд следующих замен, получим обобщенное выражение для ускорения центра масс i -го звена:

$$\vec{a}_{ci} = \sum_{j=1}^i [(\vec{e}_i \cdot \vec{r}_{ji}) + (\vec{e}_i \cdot \vec{R}_{i-1})] \ddot{q}_j + \vec{B}_j,$$

или
$$\vec{a}_{ci} = \sum_{j=1}^i A_{ij} \ddot{q}_j + \vec{B}_i,$$

где

$$\vec{B}_i = \sum_{s=2}^{i-1} \sum_{j=1}^{s-1} (\vec{e}_j \cdot \vec{e}_s) q_j q_s + \vec{\Omega}_{i-1} \cdot (\vec{\Omega}_{i-1} \cdot \vec{R}_{i-1}) + \sum_{s=2}^i \sum_{j=1}^{s-1} (\vec{e}_j \cdot \vec{e}_s) q_j q_s + \vec{\Omega}_i \cdot (\vec{\Omega}_i \cdot \vec{r}_{ii});$$

$$\vec{A}_{ci} = \left[\left(\sum_{k=1}^{i-1} R_k \right) \cdot \vec{e}_j + \vec{r}_i \cdot \vec{e}_j \right],$$

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, i}.$$

При синтезе модели динамики манипулятора при дорновании отверстий будем использовать принцип Даламбера. Применение данного принципа даст возможность путем фиктивного разрыва кинематической цепи рассматривать движение отсеченной части манипулятора (в нашем случае, шарнире упругого схвата, в котором закреплена дорновальная машина) и движущего момента в шарнире под действием сил инерции \vec{F}_i^n и сил тяжести \vec{G}_i , обобщенной силы в шарнире M_i . Суммы моментов для рассматриваемого шарнира:

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i^n + \vec{M}(\vec{G}_i) + \vec{m}_i (\vec{F}_i^n) + \vec{M}_i = 0. \quad (24)$$

При этом вектор \vec{F}_i^n сил инерции, приложенный в центре масс i -го звена, определяется как $\vec{F}_i^n = -m_i \vec{a}_{ci}$, или путем замены \vec{a}_{ci} :

$$\vec{F}_i^n = -\sum_{j=1}^i m_j (A_{ij} \ddot{q}_j + \vec{B}_i). \quad (25)$$

Главный момент сил инерции в рассматриваемом шарнире определим по формуле:

$$\vec{M}_{ni} = (\vec{\Omega}_i \cdot \vec{\theta}_i) \vec{\Omega}_i + \vec{\theta}_i \vec{\xi}_i, \quad (26)$$

при замене входящих в формулу угловой скорости и ускорения, получим:

$$\vec{M}_{ni} = \sum_{j=1}^i (\vec{c}_{ij} \ddot{q}_j + \vec{D}_i), \quad (27)$$

где $\vec{C}_{ij} = \vec{\theta}_i \cdot \sum_{j=1}^i \vec{e}_{ij}$;

$$\bar{D}_i = \widehat{\Omega}_i \bar{\theta}_i \bar{\Omega}_i + \bar{\theta}_i \sum_{j=1}^{s-1} (\bar{e}_j \cdot \bar{e}_s) q_j q_s \quad - \text{орт оси } j\text{-го}$$

шарнира в i -м звене; $\bar{\theta}_i$ – тензор инерции;

$$\widehat{\Omega}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

– матрица, составленная из элементов вектора $\bar{\Omega}_i$.

Момент, возникающий вследствие воздействия сил тяжести в шарнире, определяется из формулы:

$$\bar{M}(G_i) = \sum_{j=n}^i m_j \bar{g} \cdot \bar{r}_{ij}, \quad (29)$$

где \bar{g} – ускорение свободного падения.

Таким образом, управление движения манипулятора может быть представлено в виде:

$$\bar{M}_i \ddot{q}_j + \bar{B}_i^0 = \bar{E}, \quad (30)$$

где \bar{A}_{ij}^0 и \bar{B}_i^0 – векторы-столбцы, элементы которых не зависят от q_j , то есть:

$$\bar{A}_{ij}^0 = \bar{A}_{ij} + \bar{c}_{ij}; \quad (31)$$

$$\bar{B}_i^0 = \sum_{j=n}^i \left(\sum_{m=1}^{j-1} (\bar{R}_r + \bar{r}_j) \cdot (-m_i \bar{B}_i) + \bar{D}_i \right). \quad (32)$$

В результате решения полученного уравнения движения относительно \ddot{q} , окончательный вид уравнения движения манипулятора:

$$\ddot{q} = [A_0]^{-1} \bar{M} - [A_0]^{-1} \bar{B}_0. \quad (33)$$

Метод деформирования управляющих воздействий для роботизированного технологического комплекса по дорнованию отверстий обобщенно можно представить в виде последовательности таких этапов.

1. Ввод исходных данных: геометрии звеньев (h, b, r), их массы (m_i), тензоров инерции \bar{Q}_i , начальных условий для манипулятора (q_{ih}, \dot{q}_{ih}), шага интегрирования (Δt).

2. Формирование матриц A_i перехода из i -й системы координат в систему координат, коллинеарную нулевой.

3. Пересчет векторов $\bar{e}_i, \bar{r}_i, \bar{R}_i, \bar{b}_i$, и \bar{h}_i из собственной системы координат в нулевую.

4. Определение, по зависимости (18), координат положений центров масс звеньев и шарниров манипулятора.

5. Вычисление, по зависимости (20), абсолютных угловых скоростей звеньев.

6. Вычисление, по зависимости (22), линейных скоростей центров масс звеньев манипулятора.

7. Вычисление абсолютных ускорений для звеньев манипулятора, по формулам (23) и (24).

8. Вычисление значений коэффициентов A_{ij}^0 и B_i^0 (по выражениям (31) и (32) соответственно).

9. Реализация модели движения манипулятора (выражение (33)).

10. Интегрирование значений, полученных на шаге 9 с заданным шагом интегрирования Δt .

11. Формирование, на основе вычисленных линейных и угловых скоростей, а также ускорений, управляющих воздействий на исполнительные органы манипулятора.

Заключение

1. Принцип Даламбера и кинето-статический метод на его основе, могут быть использованы для анализа динамики робототехнического комплекса "манипулятор с упругим схватом + дорновальная машина".

2. Синтезированная модель динамики РТК по дорнованию отверстий реализована в форме метода вычисления переменных, характеризующих процесс дорнования отверстий.

3. На основе разработанного метода может быть разработана управляющая программа для манипулятора в составе РТК по дорнованию отверстий.

Список литературы

1. Афонин В.Л. Интеллектуальные робототехнические системы / В.Л. Афонин, В.А. Макушкин. – М.: ИНТУИТ, 2005. – 208 с.

2. Алексеев А.В. Интеллектуальные системы принятия проектных решений [Текст] / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.Р. Вилломс, Н.Н. Слядзь, С.А. Фомин. – Рига: Зинатне, 1997. – 320 с.

3. Фу К. Робототехника: Пер. с англ. / К. Фу, Ф. Гонсалес, К. Лик. – М.: Мир, 1989. – 624 с.

4. Воронько В.В. Основные направления и тенденции развития зарубежных технологий сборки авиационных конструкций [Текст] / В.В. Воронько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – X, 2010. – Вып. 45. – С. 87-98.

5. DARPA official materials. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.darpa.mil>.

6. Макаров И.М. Робототехника: история и перспективы / И.М. Макаров, Ю.И. Топчиев. – М.: Наука, Издательство МАИ, 2003.

7. FIRA official materials. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.fira.net>.

8. RoboCup Federation. Official materials. [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: <http://www.robocup.org>.

9. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики / Ю.Ф. Голубев. – М.: МГУ, 2000. – 719 с.

10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://www.rtc.ru> – сайт Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технологической кибернетики (ЦНИИ РТК).

11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу <https://www.robotobot.ru> – сайт отдела специаль-

ных мехатронных и робототехнических систем НИИ Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Поступила в редколлегию 22.03.2017

Рецензент: д-р техн. наук ст. научн. сотр. С.В. Герасимов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

СИНТЕЗ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ДЛЯ ДОРНУВАННЯ ОТВОРІВ В КОНСТРУКЦІЯХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В.В. Воронько, І.В. Шостак, І.О. Воронько, В.М. Степаненко, Д.І. Завістовський

У статті розроблені динамічні моделі «маніпулятор з пружним зв'язком в схопив» і «маніпулятор - пружний схват - дорновальна машина (пневмоімпульсний пристрій)», а також метод формування рівнянь динаміки маніпулятора при дорнуванні отворів в конструкціях літальних апаратів; синтезована модель динаміки робото-технічного комплексу (промисловий робот) по дорнуванню отворів, яка реалізована у формі методу обчислення змінних, що характеризують процес дорнування отворів пневмоімпульсними пристроями в конструкціях літальних апаратів. Викладені теоретичні результати передбачається використовувати при роботизації процесів складання конструкцій літальних апаратів для підвищення точності і стабільності результатів, і для зниження частки рутинної праці в роботі слюсарів-складальників.

Ключові слова: промисловий робот, робото-технічний комплекс, пневмоімпульсні пристрої, дорнування отворів, динамічна модель, маніпулятор, конструкції літальних апаратів.

SYNTHESIS OF THE DYNAMIC MODEL OF INDUSTRIAL ROBOT FOR DORNING HOLES IN THE DESIGN OF FLIGHTING DEVICES

V. Voronko, I. Shostak, I. Voronko, V. Stepanenko, D. Zavistovsky

Dynamic models "manipulator with elastic coupling in the gripper" and "manipulator - elastic gripper - dornoval machine (pneumatic impulse device)" are developed in the article, as well as a method for forming the dynamics equations of the manipulator when docking holes in aircraft structures; The model of the dynamics of the robot-technical complex (industrial robot) for the drilling of holes is synthesized, which is implemented in the form of a method for calculating the variables characterizing the process of hole leveling by pneumatic impulse devices in the designs of aircraft. The above theoretical results are supposed to be used in robotizing the processes of assembly of aircraft structures to improve the accuracy and stability of the results, and for decrease in the proportion of routine work in the work of locksmiths.

Keywords: industrial robot, robot-technical complex, pneumatic impulse devices, doweling of holes, dynamic model, manipulator, aircraft structures.