

УДК 621:534.833

А.И. Бохонский, проф., д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г.Севастополь, Украина,

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ МАНИПУЛЯТОРОВ МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ

Рассмотрены некоторые этапы проектирования рук манипуляторов и предложены оптимальные движения с реализацией пневмоприводами.

Динамике телескопических исполнительных органов манипуляторов посвящена работа [1]; в этой же работе дано решение задачи проектирования руки минимальной массы, но динамическое поведение манипуляторов минимальной массы не исследовалось. Необходимо отметить, что в [2], по существу, дан обзор известных исследований по механике манипуляторов с жесткими исполнительными органами.

Решение задач оптимального перемещения объектов нежесткими манипуляторами актуально не только в земных условиях, но и в космическом пространстве – при монтаже крупногабаритных нежестких конструкций. Поэтому назрела необходимость анализа некоторых характерных для нежестких манипуляторов задач механики.

Использование исполнительных органов (ИО) манипуляторов минимальной массы снижает металлоемкость конструкций и энергетические затраты на рабочие операции, но их податливость ухудшает точность позиционирования и производительность. Эти характерные особенности ИО должны учитываться в методике расчета и проектирования, которая предполагает реализацию ряда этапов.

Первый этап состоит в решении собственно задач оптимального проектирования, т.е. в поиске минимума массы (или объема) материала конструкции при ограничениях (на прочность, жесткость и др.).

Новые задачи возникают в связи с необходимостью устранения перемещений центра масс схвата с грузом, обусловленных упругими деформациями ИО. Компенсация перемещений схвата при произвольном положении руки предполагается несколькими путями: поворотом руки или ее элемента как абсолютно твердого тела (стабилизация положения, соответствующего недеформируемому состоянию); управлением деформированием, при котором стабилизация положения центра масс схвата осуществляется за счет дополнительного силового воздействия на упругую конструкцию; параметрической компенсацией упругих перемещений, т.е. таким изменением геометрической конфигурации руки в процессе выполнения рабочих

операций, при котором остается постоянной ее обобщенная жесткость в произвольном рабочем положении.

Актуальные задачи возникают в связи с функционированием манипуляторов малой жесткости, в частности, задачи оптимального управления переносным движением руки с устранением колебаний в точке позиционирования. Предлагаемая методика расчета в виде отдаленных процедур иллюстрируется на простых примерах.

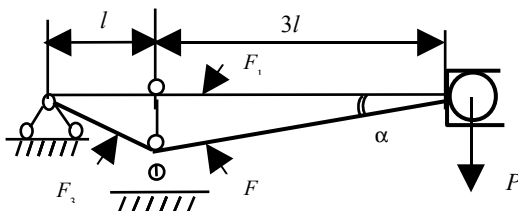


Рисунок 1 – Рука манипулятора

1. Пример упрощенной стержневой конструкции руки изображен на рисунке 1.

В качестве критерия оптимальности принят объем материала (тождественный минимуму массы), который записывается как

$$V = 4lF_1 + 3lF_2 / \cos \alpha + l\sqrt{9\operatorname{tg}^2 \alpha + 1} \cdot F_3 = \min, \quad (1)$$

где l – длина; F_1 , F_2 , F_3 – площади поперечных сечений стержней. Минимум (1) достигается, если напряжения в стержнях равны допускаемым. Из равновесия узлов следуют ограничения в виде равенств, накладываемых на неизвестные F_1 , F_2 , F_3

$$[\sigma]F_2 \sin \alpha - P = 0, \quad F_2 \cos \alpha - F_1 = 0, \quad F_3 / \sqrt{9\operatorname{tg}^2 \alpha + 1} = 0, \quad (2)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение на растяжение – сжатие материала. Необходимо найти минимум (1) при ограничениях (2).

Пример. Исходные данные: $l=0,5$ м; $P=2$ кН; $\operatorname{tg} \alpha=0,5$; $[\sigma]=160$ МПа. При решении задачи на условный экстремум использовалась процедура $\$ \min(v)$ (в системе EURIKA). Результаты расчета: $F_1=25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $F_2=28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $F_3=45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $V=14 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. Отметим, что в настоящее время существуют достаточно надежные программы исследования функций многих переменных на условный экстремум, что позволяет решать сложные задачи оптимизации.

Задачи управляемого деформирования твердых тел решались ранее в [3] и здесь в приложении к манипуляторам малой жесткости рассматриваться не будут.

2. Заслуживает критики стабилизация жесткости руки, основанная на ее растяжении внутренними усилиями, создаваемыми, например, при заполнении полости руки сжатым воздухом. На рисунке 2 изображены два поло-

жения телескопической руки с грузом, для которых имеет место продольно-поперечный изгиб. Максимальные прогибы вычисляются по формулам

$$W_1 = \frac{Pl_1^3/3EJ}{1 + \frac{S_1}{\pi^2 EJ/4l_1^2}},$$

$$W_2 = \frac{Pl_2^3/3EJ}{1 + \frac{S_2}{\pi^2 EJ/4l_2^2}},$$

(3)

где W_1, W_2 – перемещения центра масс схвата от поперечной и компенсирующей продольной сил; l_1, l_2 – длины руки в первом и во втором состояниях ($l_2 > l_1$); S_1, S_2 – растягивающие усилия; P – сила тяжести (поперечная сила); E – модуль упругости; J – осевой момент инерции поперечного сечения. В качестве примера найдено усилие S_2 при $S_1 = 0$ и $W_1 = W_2$, что соответствует равенству обобщенных жесткостей руки первого и второго положений.

В результате преобразований получено выражение для продольного усилия

$$S_2 = \left[\left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2 - 1 \right] P_9, \quad (4)$$

где $P_9 = \pi^2 EJ/4l_2^2$.

Численные эксперименты показывают, что стабилизация обобщенной жесткости путем растяжения требует больших продольных усилий, которые могут привести к разрушению конструкции. Поэтому следует отдать предпочтение методам компенсации перемещений центра масс схвата путем изгиба руки поперечными силами [3].

3. В [4, 5] найдено оптимальное переносное движение упругих объектов из исходного в конечное состояние абсолютного покоя (при допущении колебаний только на временном интервале движения). Отметим, что для устранения колебаний руки манипулятора по высшим модам необходимо выполнить условия кратности собственных частот. Алгоритм проектирования си-

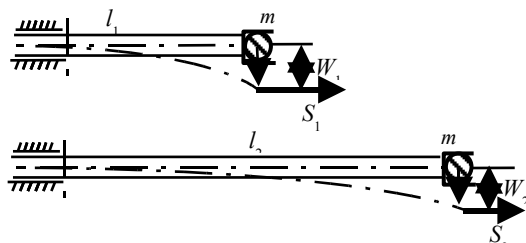


Рисунок 2 – Схемы продольно-поперечного изгиба руки

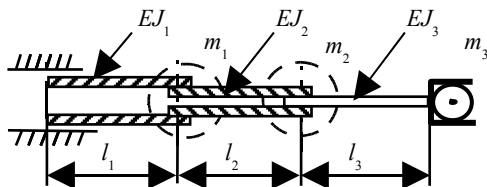


Рисунок 3 – Схема телескопической руки

стемы с такими частотами иллюстрируется на примере руки с тремя степенями свободы (рисунок 3).

Частотный определитель записывается как

$$\begin{vmatrix} \delta_{11}m_1 - \lambda & \delta_{12}m_2 & \delta_{13}m_3 \\ \delta_{21}m_1 & \delta_{22}m_2 - \lambda & \delta_{23}m_3 \\ \delta_{31}m_1 & \delta_{32}m_2 & \delta_{33}m_3 - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

где m_1, m_2, m_3 – сосредоточенные массы; $\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{21}, \delta_{22}, \delta_{23}, \delta_{31}, \delta_{32}, \delta_{33}$ – удельные перемещения; $\lambda = 1/\omega^2$ или $\omega = 1/\sqrt{\lambda}$, ω – частота собственных колебаний. Из (5) следует полином

$$\lambda^3 + A_2\lambda^2 + A_1\lambda + A_0 = 0, \quad (6)$$

которому, с другой стороны, соответствует сопряженный факторизованный, учитывающий кратность корней

$$(\lambda - \lambda_1)(\lambda - n\lambda_1)(\lambda - n^2\lambda_1) = 0, \quad (7)$$

где λ_1 – наименьший корень; n – целое число (кратность). Из (7) после преобразований получаем:

$$\lambda^3 - (\lambda_1 + n^2 + n)\lambda_1\lambda^2 + (1 + n + n^2)n\lambda_1^2 - n^3\lambda_1^3 = 0. \quad (8)$$

Из равенства коэффициентов в (6) и (8) следует система нелинейных алгебраических уравнений, которая дополнена геометрическим соотношением:

$$\begin{aligned} \lambda_1^2 + n^2\lambda_2 + n\lambda_1 + A_2 &= 0, \quad \lambda_1^2n^2 + n\lambda_1^2 + n^3\lambda_1^2 - A_1 = 0, \\ n^3\lambda_1^3 + A_0 &= 0, \quad l_1 + l_2 + l_3 = l. \end{aligned} \quad (9)$$

Параметры A_1, A_2, A_3 выражаются через удельные перемещения и сосредоточенные массы. В качестве неизвестных приняты: l_1, l_2, l_3, λ_1 . Предложенный алгоритм может использоваться для достаточно сложных объектов с конечным числом степеней свободы.

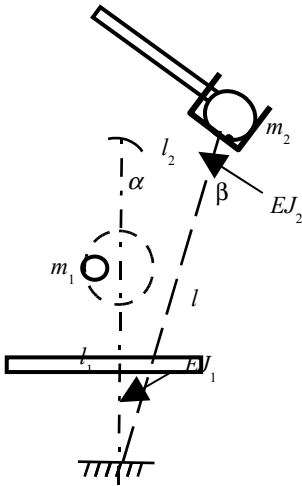


Рисунок 4 – Схема антропоморфной руки манипулятора

Пример. Исходные данные: $l=1$ м; $n=1000$. Результат расчета: $l_1=0,03$ м; $l_2=0,038$ м; $l_3=0,959$ м; $\lambda_1=0,15 \cdot 10^{-12}$ с². При найденных в результате решения системы (9) размерах звеньев достигается заданная кратность частот собственных колебаний руки.

4. Даже для достаточно простых конструкций ИО выполнение рабочих операций сопряжено с непрерывным изменением во времени динамических свойств руки. Рассмотрим (на примере антропоморфной руки) зависимость частот собственных колебаний от геометрической конфигурации, определяемой взаимным углом поворота звеньев (рисунок 4). Частотный определитель системы с двумя степенями свободы имеет вид

$$\begin{vmatrix} \delta_{11}m_1 - \lambda & \delta_{12}m_2 \\ \delta_{21}m_1 & \delta_{22}m_2 - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (10)$$

где удельные перемещения вычисляются таким образом:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= l^3/3EJ_2; \quad \delta_{12} = l_1^2(l_2 \cos \beta + 2(l - l_2 \cos \beta)/3)/2EJ_1; \quad \sin \beta = l_1 \sin \alpha / l; \\ \delta_{22} &= l_2^3 \cos^2 \beta / 3EJ_2 + l_1(l_2^2 \cos^2 \beta + l^2 + l l_2 \cos \beta) / 3EJ_1; \\ l &= \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \alpha}. \end{aligned} \quad (11)$$

Пример. Исходные данные: $l_1 = l_2 = 1,0$ м; $m_1 = m_2 = 100,0$ кг; $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $d=0,01$ м; $J=\pi d^4/64$ М⁴; $J_1 = J$; $J_2 = J/2$.

На рисунке 5 изображены график зависимостей частот первого тона от взаимного угла поворота α звеньев.

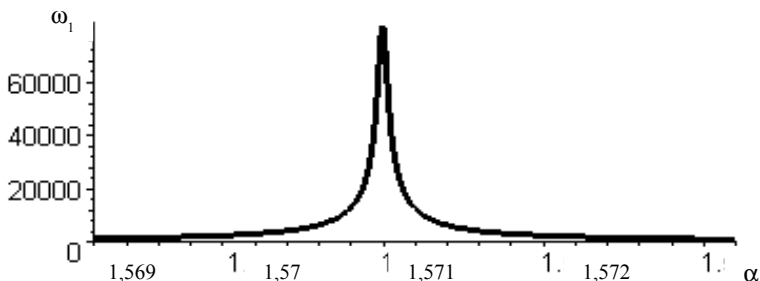


Рисунок 5 – График $\omega_1 = f(\alpha)$

Экстремум для частоты первого тона достигается при $\alpha = \pi/2$, что соответствует физическому смыслу. Отметим, что изменение в широких пределах собственных частот затрудняет использование известных алгоритмов гашения колебаний. Интересно, что изменение конфигурации руки порождает ее параметрические колебания.

5. Для практической реализации оптимального переносного движения (вида $W(t) = a \sin^{2n+1}(k_1 t)$, где $a = 3\pi b/t_1^2$, $t_1 = 2\pi/k_1$; $k_1 = k/(n+1)$; $n=1,2,3$; b – общее перемещение; t_1 – время движения) получен закон изменения площадей дроссельных отверстий пневмопривода. При наполнении камеры пневмопривода из магистрали на первом участке движения площадь дроссельного отверстия необходимо изменять (рисунок 6)

$$f_1(t) = \frac{\pi S(\dot{P}_*(W_0 + W) + \dot{W}P_*)}{0,006d^2 P_M \sqrt{1 - P_*/P_M} RT}, \quad (12)$$

где S – площадь поршня; $P_* = P_A + P(t)$, P_A – атмосферное давление; $P_* = U(t)/S$ – давление (помимо атмосферного) на единицу массы перемещаемого груза; $\dot{P}_*$ – производная; d – диаметр поршня; P_M – давление в магистрали; W_0 – начальное значение координаты, определяющей положение

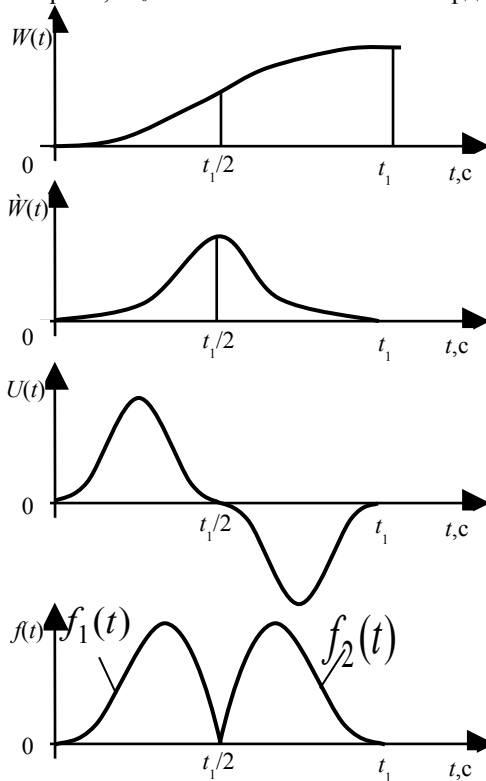


Рисунок 6 – Графики функций $W(t)$, $U(t)$, $f_1(t)$, $f_2(t)$

поршня; $W(t)$ – координата для положения поршня в любой момент времени; $\dot{W}$ – скорость.

На участке торможения закон изменения площади дроссельного отверстия $f_2(t)$ изображен на графике.

Рассмотренный подход к проектированию манипуляторов минимальной массы может быть распространен на более сложные конструкции. В ка-

честве дальнейших перспектив исследований предполагается создание комплекса программ, реализующих рассмотренные этапы расчета для антропоморфных, телескопических и других типов ИО манипуляторов. Следует отметить, что манипуляторы минимальной массы необходимы при выполнении сборочных операций в космическом пространстве.

Библиографический список

1. Бохонский А.И. Расчет и проектирование телескопических исполнительных органов манипуляторов / Бохонский А.И., Макухина Г.Г., Хашин Ю.А. — УМК ВО — Киев, 1989. — 132 с.
2. Горобец И.А. Промышленная робототехника. Механические системы манипуляторов: Учеб. пособие / И.А. Горобец. — ДонНТУ. — Донецк, 2001. — 130 с.
3. Бохонский А.И. Управляемое деформирование твердых тел / А.И. Бохонский // Динамические системы; Межведомст. науч. сб. — Симферополь, 1999. — Вып. 15. — С. 30–36.
4. Бохонский А.И. Колебания телескопической руки при оптимальном вращательном движении / А.И. Бохонский, Д.В. Волнухин // Вестн. СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2000. — Вып. 23. — С. 54–58.
5. Бохонский А.И.. Оптимальное переносное движение упругих систем / А.И. Бохонский // Вестн. СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 38. — С. 33–38.

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.