

УДК 621.658.012.531

А.И. Бохонский,**Г.Г. Макухина***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sevastopol.ua***ДИНАМИКА БЕСШТОКОВОГО ПНЕВМОПРИВОДА С КАРЕТКОЙ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ***Исследована устойчивость и оптимальное движение каретки на воздушной подушке одного типа бесштокового пневмопривода.*

Бесштоковый пневмопривод с магнитной связью на практике может обладать рабочим ходом около четырех метров и при этом имеет меньшие габаритные размеры по сравнению с существующими стандартными пневмоприводами.

Использование воздушной подушки с повышенным по сравнению с атмосферным давлением в поддерживающем пространстве позволяет существенно снизить сопротивление движению, энергетические затраты и повысить динамическую устойчивость движущегося объекта.

Цель исследований – оценка динамической устойчивости при движении каретки на воздушной подушке.

Задача оценки динамической устойчивости около положения равновесия (например, по отношению к оси симметрии неподвижного цилиндра) актуальна для каретки бесштокового пневмоцилиндра, схема которого изображена на рисунке 1.

По аналогии с аппаратами на воздушной подушке [1] в каретке не исключается использование такой воздушной цилиндрической подушки (зазора) с общим объемом

$$V = \pi[2(d_* + \delta) + h]hL,$$

где d_* – нормальный диаметр цилиндра; L – длина каретки.

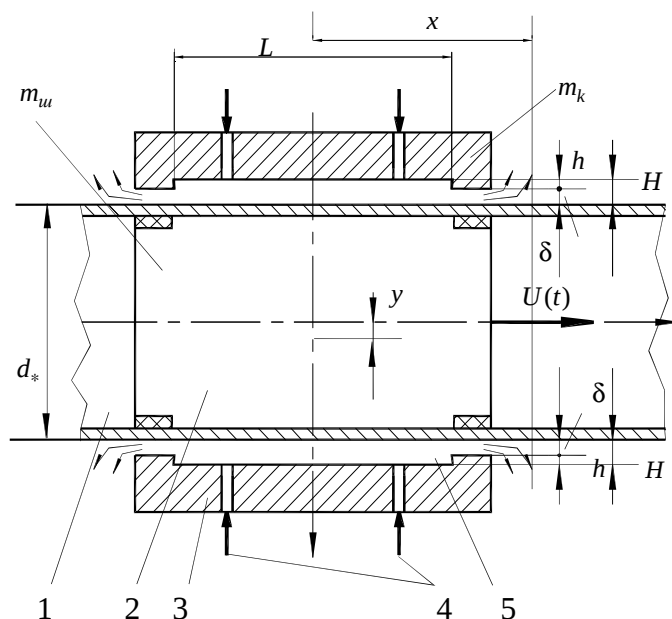


Рисунок 1 – Схема перемещения каретки (синхронно со штоком) в неподвижной системе координат Oxy , связанной с цилиндром бесштокового пневмопривода:

- 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – каретка; 4 – отверстия для нагнетания воздуха;
5 – воздушная подушка

При построении динамической модели в расчетах используется аналитическая зависимость между давлением в воздушной подушке и плотностью воздуха [2] для политропического процесса $P = P_0(\rho/\rho_0)^n$, где P, P_0 – давления в воздушной подушке и атмосферное давление; ρ, ρ_0 – плотность воздуха в воздушной подушке и при атмосферном давлении; n – показатель политропы.

С учетом уравнения массообмена воздуха, подаваемого в камеру и вытекаемого из нее, после ряда преобразований следует дифференциальное уравнение третьего порядка [1], описывающее динамику

возможного вертикального отклонения центра масс каретки (рисунок 1) от устойчивого симметричного положения равновесия (по отношению к неподвижной системе координат oxy , связанной с цилиндром)

$$\frac{d^3 y}{dt^3} + \frac{1}{a} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{b}{am_k} \frac{dy}{dt} + \frac{c}{am_k} y = 0, \quad (1)$$

где константы имеют вид:

$$a = \frac{2\theta p_n}{3np_0}; \quad b = \frac{2m_k g \theta}{3H}; \quad c = \frac{2mg}{3y_0}; \quad \theta = \rho_0 V_0 / G_0.$$

Здесь V_0 – объем воздушной подушки (в равновесном состоянии); G_0 – объем подаваемого (либо вытекающего) воздуха в равновесном устойчивом состоянии каретки; $p_n = p - p_0$ – избыточное давление воздуха в подушке; $n = 1, 4$ – экспериментальное значение показателя политропы; m_k – масса каретки; g – ускорение силы тяжести. После подстановки частного решения $y = Ae^{\lambda t}$ в уравнение (1) получено характеристическое уравнение

$$\lambda^3 + \frac{1}{a} \lambda^2 + \frac{b}{am_k} \lambda + \frac{c}{am_k} = 0,$$

которое позволяет с использованием условия Гурвица оценить динамическую устойчивость каретки. В данном случае устойчивость обеспечена, если выполняется условие

$$\frac{1}{a} \frac{b}{am} - \frac{c}{am} > 0, \text{ т.е. } b > ac \text{ или } \frac{3\delta n p_0}{2H p_n} > 1.$$

Если, например, принять $p_n / p_0 = 0,05$, то, обращая неравенство в равенство, из уравнения $\delta = 0,024(h + \delta)$ при $\delta = 0,0005$ м высота $h \approx 0,002$ м. Для этих исходных данных характеристический полином принимает следующий вид:

$$\lambda^3 + 42000\lambda^2 + 6,86 \cdot 10^5 \lambda + 5,5 \cdot 10^8 = 0.$$

Его корни, найденные с использованием процедуры SOLVE в системе Maple равны:

$$\lambda_1 = -41983,9721I; \quad \lambda_2 = -8,014 - 114,050I; \quad \lambda_3 = -8,014 + 114,050I. \quad (2)$$

Для найденных корней (2) общее решение дифференциального уравнения (1), описывающее отклонение от невозмущенного состояния, в данном случае записываются следующим образом:

$$y(t) = c_1 e^{-41983,9721t} + e^{-8,014t} (c_2 \sin(114,05t) + c_3 \cos(114,05t)). \quad (3)$$

Если в качестве начального условия принять некоторое отклонение от симметричного положения равновесия (т.е. начальные условия: при $t = 0$, $y(0) = 0,0003$ м, $\dot{y}(0) = 0$ и $\ddot{y}(0) = 0$), то, после найденных в Maple производных от выражения (3), из системы трансцендентных уравнений с использованием процедуры SOLVE найдены постоянные:

$$c_1 = 2,226 \cdot 10^{-9}; \quad c_2 = 0,000022; \quad c_3 = 0,0003.$$

График функции $y(t)$ изображен на рисунке 2, из которого видно интенсивное затухание колебаний около симметричного равновесного положения.

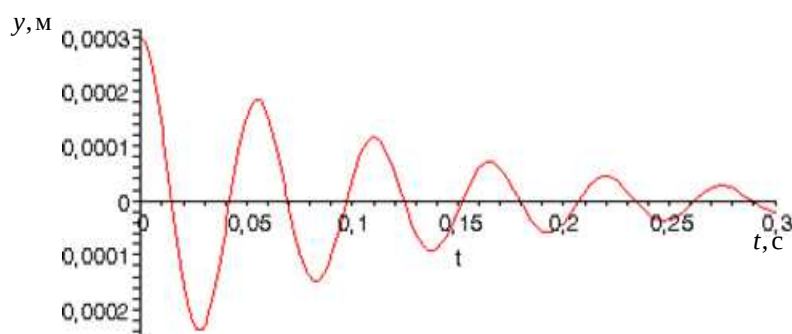


Рисунок 2 – Затухающие колебания каретки около равновесного положения

Устойчивость движения каретки обеспечивает точность позиционирования в радиальном направлении; при этом снижается износ наружной образующей гильзы в связи с существенным уменьшением или полным устранением трения скольжения поверхностей.

Бесштоковый пневмоцилиндр в общем случае должен реализовывать оптимальные законы перемещения каретки вдоль цилиндра. Далее рассматривается возможность реализации оптимального управления движением каретки, найденного из условия минимума энергетических затрат на управление.

Если известное оптимальное движение (без сопротивления) [3] принять за эталонное, то, на основании алгоритма решения обратной задачи динамики можно найти действительное управление (ускорение), которое реализует перемещение вдоль оси x с учетом сопротивления [2] движению каретки и поршня.

Нелинейное дифференциальное уравнение управляемого движения каретки и поршня вдоль оси x с учетом сопротивления воздуха, пропорционального квадрату скорости, записывается в виде

$$(m_k + m_n) \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{c_q \omega_p}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + (m_k + m_n) U(t)$$

или при решении обратной задачи динамики можно записать

$$U(t) = \ddot{x} + k_1 \dot{x}^2, \quad (4)$$

где $k_1 = c_q \omega_p / 2(m_k + m_n)$; m_n – масса поршня; c_q – коэффициент сопротивления; ω_p – площадь миделевого сечения (проекция тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения); ρ – плотность воздуха. В качестве эталонного принято [3] оптимальное движение без учета сопротивления, для которого перемещение, скорость и ускорение соответственно равны:

$$x = \frac{6S}{T^2} \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3T} \right), \quad \dot{x} = \frac{6S}{T^2} \left(t - \frac{t^2}{T} \right), \quad \ddot{x} = \frac{6S}{T^2} \left(1 - \frac{2t}{T} \right). \quad (5)$$

здесь S – общее перемещение каретки по оси x ; T – время движения. После подстановки (5) в (4) при $S=1$ м, $k_1 = 3 \text{ м}^{-1}$, $T=1$ с построены графики управлений: с учетом сопротивления график $U(t)$ и без учета – график $U_*(t)$; графики изображены на рисунке 3.

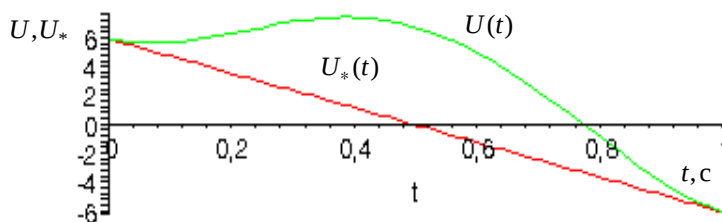


Рисунок 3 – Управление (ускорение на единицу массы) движением каретки с учетом и без учета сопротивления

Как следует из графиков, с увеличением сопротивления движению затраченная энергия на разгон объекта существенно возрастает и может значительно превосходить энергию, затраченную на движение без сопротивления.

В результате исследований показано, что динамическая устойчивость каретки обеспечивается выбором геометрических параметров воздушной подушки, а также параметров давления и характеристик расхода воздуха.

В объем дальнейших исследований входит моделирование динамики бесштокового пневмопривода при реализации новых оптимальных переносных движений упругих объектов с конечным и бесконечным числом степеней свободы, предложенных в [4], а также расчет и проектирование системы оптимального управления движением каретки.

Библиографический список

1. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. — Л.: Машиностроение, 1976. — 320 с.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. — М.: Стройиздат, 1975. — 323 с.
3. Теория автоматического управления. Ч.2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления; Под ред. А.А. Воронова: учеб. пособие. — М.: Высш. школа, 1977.—288 с.
4. Бохонский А.И. Оптимальное переносное движение упругих объектов/А.И. Бохонский, Н.И. Варминская //Динамические системы: межвед. науч. сборник — Симферополь, 2005. — Вып. 19. — С. 3–10.

Поступила в редакцию 01.12.2006 г.