

3. Схиртладзе А.Г. Интегрированные системы проектирования и управления : учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.Г. Схиртладзе, Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – М.: Академия, 2010. – 347 с.
4. Федоров А.Л. Применение систем автоматизированного проектирования для формирования пространственного мышления у старших дошкольников / А.Л. Федоров, О.А. Еник // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2017. – Т.6, №2 (19). – С. 172-175.
5. Губанов А.Н. Автоматизированная система обучения основам геометрического моделирования в САПР: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.12. – Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, 2003. – 135 с.

Сведения об авторе:

Федоров Андрей Львович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» ТГУ, г.Тольятти.

УДК 621.865

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УПРУГОМ
ДЕМПФИРОВАНИИ И ТОРМОЖЕНИИ ВНЕШНИМ ПРУЖИННЫМ
АМОРТИЗАТОРОМ**

*Королев В.А., Стажков С.М., Цветков В.А., Воротынцев Б.Н.
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург*

Ключевые слова: пневмодвигатель, цилиндр, динамика, упругий элемент, торможение, быстродействие.

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы динамики торможения пневмодвигателя с учётом выбора жесткости материала при упругом демпфировании и конструктивных параметров пружинного амортизатора. На основании предложенного анализа определяются параметры, обеспечивающие требуемое при проектировании быстродействие и допустимое для выполнения технологической операции тормозное ускорение.

В пневмосистемах при остановках пневмодвигателя в конце хода, чтобы снизить ударное воздействие поршня на крышку пневмоцилиндра, как одно из решений, используют материал со свойствами, обеспечивающими упругое демпфирование поршня при его остановке.

Такие пневмодвигатели имеют наименьшие габаритные размеры и высокое быстродействие в сравнении с пневмодвигателями, где торможение осуществляется за счет увеличения сопротивления выхлопного потока воздуха или с помощью различного типа внешних амортизаторов.

Главным недостатком упругого демпфирования является значительное тормозное ускорение при остановке поршня.

Использование при проектировании пневмосистем силовых цилиндров с упругим демпфированием вызывает у разработчиков проблему, связанную с анализом динамических параметров пневмодвигателя в момент торможения в первую очередь тормозного ускорения. Для ее решения рассмотрим принципиальную схему пневмодвигателя с упругим демпфированием (рис. 1).

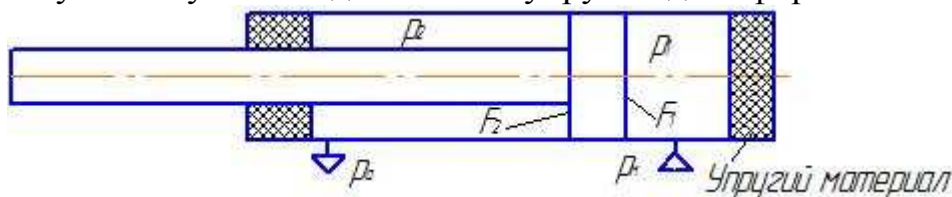


Рис. 1. Схема пневмодвигателя

На схеме обозначено: F_1, F_2 – площадь поршневой и штоковой полостей пневмодвигателя; P_1, P_2, P_m, P_a – соответственно давление в поршневой и штоковой полостях, магистральное и атмосферное давление.

C – жесткость упругого материала.

Величина демпфирующего усилия при наезде поршня на упругий элемент крышки пневмоцилиндра в размерном виде равна $Gq=CX$, а в относительном $Xq=(CS)/PmF \xi = Cp \xi$, где Cp – жесткость упругого материала в относительном виде.

Для приведения системы уравнений, описывающих торможение пневмодвигателя к виду, позволяющему получить аналитическое решение считаем, что начальные условия торможения пневмодвигателя определяются параметрами установившегося движения. В случае если расстояние между точками начала движения и позиционирования меньше, чем путь при разгоне, то система уравнений описывающих движение поршня, представленная в относительном виде [1] записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\xi}{d\tau^2} = \frac{1}{N} (\sigma_1 - \pi_{2,1}^F \sigma_2 - X) \\ \frac{d\sigma_1}{d\delta^2} = \frac{k}{\xi_{0,1} + \xi} \left[\varphi(\sigma_1) - \sigma_1 \frac{d\xi}{d\tau^2} \right] \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} = \frac{k}{1 + \xi_{0,2} - \xi} \left[-\frac{\omega}{\pi_{2,1}^F} \sigma_2^{\frac{3k-1}{2k}} \varphi\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) + \sigma_2 \frac{d\xi}{d\tau} \right] \end{cases} \quad (1)$$

где значения относительных параметров [1]

$$\xi = \frac{x}{s}; X = \frac{G}{PmF_1}; \tau = \frac{t}{t_\sigma}; \dot{\xi} = \frac{t_\sigma}{s} \dot{x}; \ddot{\xi} = \frac{t_\sigma^2}{s} \ddot{x}; \pi_{2,1}^F = \frac{F_1}{F_2}; \omega = \frac{f_2^2}{f_1^2};$$

$$N = \frac{1}{t_\sigma} \sqrt{\frac{mS}{PmF}}, \text{ где базовое время } t_\sigma = \frac{F_1 S}{f_1^3 k \sqrt{RT_m}}$$

В соответствии с опытом эксплуатации пневмопривода (1,2,3) режим течения воздуха в рабочую полость пневмодвигателя можно принимать подкритическим, а при выхлопе – надкритическим. Заметим, что при подкритическом режиме истечения воздуха из выхлопной полости пневмоцилиндра, как показали исследования [1], силой сопротивления от давления воздуха в сравнении с силой торможения демпфера (для роботов малой грузоподъемности) можно пренебречь.

Принимаем во внимание принятые режимы течения воздуха, выражение функции расхода $\varphi(\sigma_1)$ можно заменить приближением $\varphi(\sigma_1) = K_{\sigma_1}(1 - \sigma_1)$, где коэффициент $K_{\sigma_1} = \frac{\varphi(\sigma, a)}{1 - \varphi(\sigma, a)}$, а значение $\varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right) = \sigma^{-1} = 0,2588$.

Погрешность приближения $\varphi(\sigma_1)$, в рабочем диапазоне $\sigma_1 = 0,7 \dots 1$ не превышает $\pm 3\%$.

В уравнениях, описывающих применение давления в полостях пневмодвигателей, приращением координаты при торможении пренебрегаем, а значение скорости при торможении принимаем равным среднему значению скорости, т.е. $\dot{\xi}_T = 0,5\dot{\xi}_{T0}$, где $\dot{\xi}_{T0}$ – скорость пневмодвигателя в начальный момент торможения и в наиболее общем случае соответствует $\dot{\xi}_y$. Величину $\sigma^{\frac{k-1}{2k}}$ с точностью до $\pm 3\%$ можно считать равной 1.

С учетом указанных допущений система уравнений (1) описывающая процесс торможения пневмодвигателя переписывается так:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{1T} = \frac{K}{\xi_{01} + \xi_{T0}} [K_{\sigma T}(1 - \sigma_{1T}) - \sigma_{2T} \frac{\dot{\xi}_{T0}}{2}] \\ \sigma_{2T} = \frac{K}{\xi_{01} + 1 - \xi_{T0}} \left[-\frac{\omega}{\pi_{2,1}^F} \varphi + \sigma_{2T} \frac{\dot{\xi}_{T0}}{2} \right] \\ \dot{\xi}_{T0} = \frac{1}{N^2} (\sigma_{1T} - \pi_{2,1}^F \sigma_{2T} - X - X_g) \end{cases} \quad (2)$$

где ξ_{T0} – координата начального момента торможения (в наиболее общем случае равная конечному значению при установившемся движении ξ_{TK}).

Первое и второе уравнения системы (2) имеют решения. После преобразований с учетом начальных условий торможения получим:

$$\begin{cases} \sigma_{1T} = \sigma_{1y} + \left[\frac{KK_T}{\xi_{01} + \xi_{yk}} - \sigma_{1y} \left(\frac{KK_T}{\xi_{01} + \xi_{yk}} + \frac{\dot{\xi}_y}{2} \right) \right] \tau = \sigma_{1y} + a_{1T} \tau \\ \sigma_{2T} = \sigma_{2y} - \left[\frac{K\omega\varphi}{(\xi_{01} + \xi_{yk})\pi_{2,1}^F} - \sigma_{2y} \frac{K\dot{\xi}_y}{2(\xi_{02} + \xi_{yk})} \right] \tau = \sigma_{2y} + a_{2T} \tau \end{cases} \quad (3)$$

Подставив в уравнение движения в системе (2) значение X_1 имеем:

$$\ddot{\xi}_T = \frac{1}{N^2} (\sigma_{1T} - \pi_{2,1}^F \sigma_{2T} - X - C_3 \dot{\xi} = B_{1T} + B_{2T} \tau) \quad (4)$$

Решая уравнение (4) с учетом значений σ_{1T} и σ_{2T} из (3) получим аналитические зависимости при определении скорости и пути торможения поршня в зависимости от упругих свойств материала при наезде поршня на крышку пневмоцилиндра:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_T &= -\dot{\xi} \sqrt{\frac{C}{N^2}} \sin \sqrt{\frac{C}{N^2}} \tau + \left(\dot{\xi}_y - \frac{N^2}{C_n} B_{2T} \right) \cos \sqrt{\frac{C_n}{N^2}} \tau + \frac{N^2}{C_n} B_{2T} \\ \xi_T &= -\xi_{yk} \cos \sqrt{\frac{C_n}{N^2}} \tau + \left(\dot{\xi}_y - \frac{N^2}{C_n} B_{2T} \right) \sqrt{\frac{N^2}{C_n}} + \sin \sqrt{\frac{C}{N^2}} \tau + \frac{N^2}{C_n} (B_{1T} + B_{2T}) \frac{N^2}{C_n} \tau B_{2T} \end{aligned}$$

Время торможения можно найти, задаваясь условием $\frac{\dot{\xi}_T}{\tau} = \tau_k = 0$. Максимальное ускорение остановки пневмодвигателя при упругом демпфировании достигается в момент времени

$$\tau_M = \sqrt{\frac{N^2}{C_{\Pi}} \arctg \frac{\ddot{\xi}_y - \frac{N}{C_{\Pi}} B_{2T}}{\xi_{yк}}} \sqrt{\frac{N^2}{C_{\Pi}}}$$

и равно $\ddot{\xi}_{Tmax} = \phi(\tau_M) - \frac{C_{\Pi}}{N^2} \xi_T(\tau_M)$

Результаты полученных решений позволяют также определить динамические параметры пневмодвигателя при торможении внешним пружинным амортизатором (рис. 2).

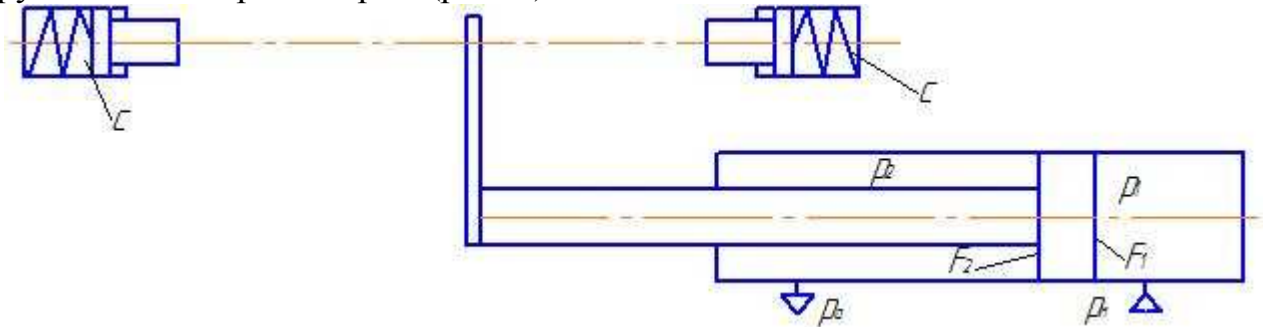


Рис. 2. Пневмодвигатель при торможении внешним пружинным амортизатором

В этом случае в значениях $\xi_T, \dot{\xi}_T, \ddot{Y}_T, \tau_M$ полученных выше С и Сп соответствуют размерной и относительной жесткости пружины внешнего амортизатора.

Таким образом, на основании предложенного анализа динамики торможения пневмодвигателя определяются параметры, связанные с выбором жесткости материала при упругом демпфировании и конструктивные параметры внешнего пружинного амортизатора, обеспечивающие требуемое при проектировании быстродействие, при необходимости учитывающее допустимые для выполнения технологической операции тормозное ускорение.

Список литература

1. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин – М. Машиностроение 1985. – 256 с.
2. Королев В.А., Юревич Е.И. и др. Устройство промышленных роботов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 334 с.
3. Пневматика для всех «От теоретических основ к практическим навыкам». Методическое пособие ООО «Камоци Пневматика». Издание 2017г., 254 с.

Сведения об авторах:

Королёв Владимир Александрович – д.т.н., профессор, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург;

Стажков Сергей Михайлович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург;

Воротынец Борис Николаевич – старший преподаватель, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург;

Цветков Владимир Александрович – к.т.н., доцент, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург.