

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕЛЕЙНОГО ПНЕВМОПРИВОДА С ФРИКЦИОННЫМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ

Королёв В.А., Воротынцева Б.Н., Цветков В.А., Попов В.В.

Ключевые слова: пневмопривод, позиционирование, быстродействие, ускорение, фрикционное торможение, динамика.

Аннотация. В работе представлена методика аналитического расчёта релейного пневмопривода с фрикционным позиционированием. Рассмотрены вопросы определения конструктивных параметров пневмопривода и величины фрикционного воздействия при позиционировании, а также при необходимости выполнение их коррекции с учётом требований по быстродействию, точности позиционирования и тормозному ускорению.

ANALYTICAL CALCULATIONS OF THE RELAY PNEUMATIC DRIVE WITH FRICTION POSITIONING

Korolev V.A., Vorotyntsev B.N., Tsvetkov V.A., Popov V.V.

Keywords: pneumatic drive, positioning, speed, acceleration, friction braking, dynamics.

Abstract. In this work a method of analytical calculations of the relay pneumatic drive with friction positioning is presented. Problems of defining of pneumatic drive constructive parameters and a magnitude of friction influence at braking are examined, as well as its correction if necessary, considering speed, positioning accuracy and braking acceleration requirements.

Создание на базе релейного пневмопривода, привода, работающего в режиме позиционного, является постоянной актуальной проблемой при проектировании пневматических систем комплексной автоматизации производства. Одно из известных направлений решения такой задачи – это использование фрикционного торможения и фиксации рабочего органа в заданной программой точке позиционирования (рис.1.)

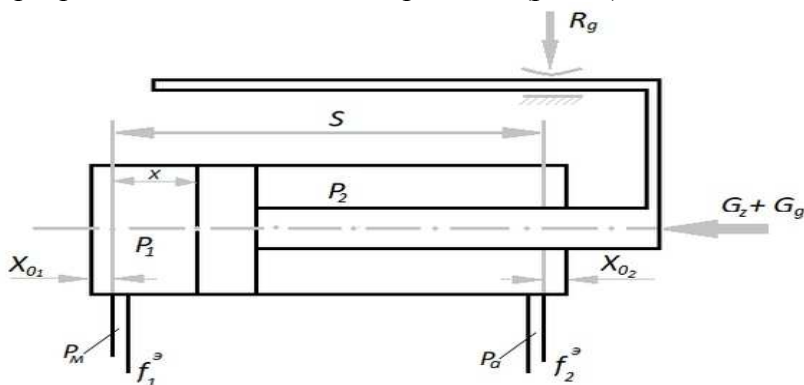


Рис. 1. Схема пневмопривода

При этом конструктивные параметры фрикционного механизма рассчитываются на основе заданных силовых воздействиях со стороны пневмопривода без учета газодинамических процессов, происходящих в пневмодвигателе (при торможении и остановки) существенно влияющих на динамику торможения, в первую очередь на время процесса торможения и

тормозное ускорение. Для решения такой задачи, в соответствии с принципиальной схемой пневмопривода с фрикционным позиционированием составим, используя методику, приведенную в [1], систему уравнений, которая имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{P}_1 &= \frac{kK\sqrt{RT_M} \int_1^3 P_M \varphi(\delta_1)}{F_1(x_{01} + x)} - \frac{kP_1\dot{x}}{x_{01} + x}, \\ \dot{P}_2 &= \frac{kK\sqrt{RT_M} \int_2^3 P_2^{\frac{3k-1}{2k}} \varphi\left(\frac{\delta_a}{\delta_2}\right)}{F_1(x_{02} + s - x)P_M^{\frac{k-1}{k}}} + \frac{kP_2\dot{x}}{s + x_{02} - x}, \\ \ddot{x} &= \frac{1}{m_{np}}(P_1F_1 - P_2F_2 - G_\epsilon - G_{g|x=x_T}),\end{aligned}\quad (1)$$

где $G_{g|x=x_T} = f_{mp}R_g$ – тормозная сила, соответственно f_{mp} – коэффициент трения; R_g – усилие поджатия фрикционных колодок; P_1, P_2, P_M, P_α – давление воздуха соответственно в поршневой и штоковой полостях пневмодвигателя; k – коэффициент адиабаты ($k=1,4$); $\delta_i = P_i / P_M$ – относительное давление; $\varphi(\delta_i)$ – функция расхода воздуха, зависящая от режима течения воздуха; $f^\circ = Mf$ – эффективная площадь проходного отверстия, где μ – коэффициент расхода; F_1, F_2 – площади поршневой и штоковой полости гидроцилиндра значения газодинамические параметры R, T, K приведены в [1].

Для получения обобщенного результата представим систему (1) в относительном виде, воспользовавшись относительными параметрами, представленными в [1], тогда получим:

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_1 &= \frac{k}{\xi_{01} + \xi_1} [f(\delta_1) - \delta_1 \dot{\xi}], \\ \dot{\delta}_2 &= \frac{k}{\xi_{02} + 1 - \xi} [-\delta_2^{\frac{3k-1}{2k}} \frac{\Omega}{\Pi_{2,1}^F} - \varphi\left(\frac{\delta_a}{\delta_2}\right) + \delta_2 \dot{\xi}], \\ \ddot{\xi} &= \frac{1}{N^2} (\delta_1 - \Pi_{2,1}^F \delta_2 - x - x_{q|\xi=\xi_T}),\end{aligned}\quad (2)$$

здесь: $\xi = \frac{x}{s}$; $\Omega = \frac{\mu_2 f_2}{\mu_1 f_1}$; $\Pi_{2,1}^F = \frac{F_2}{F_1}$; $x_y = \frac{f_{mp}R_g}{P_M F_1}$; $x = \frac{G}{P_1 F_1}$; $N = \frac{1}{t_m} \sqrt{\frac{ms}{P_M F_1}}$;

$$\tau = \frac{t}{t_m}; t_m = \frac{F_1 S}{\int_1^3 K \sqrt{RT_M}}.$$

Для приведения системы уравнений, описывающих фрикционное позиционирование к виду, позволяющему получить аналитические решения,

считаем режим течения воздуха в рабочую полость пневмодвигателям подкритическим, а при выхлопе надкритическим.

Заметим, что на этапе торможения при подкритическом режиме истечения воздуха из выхлопной полости пневмодвигателя, как показали исследования [2] силой сопротивления от давления воздуха по сравнению с силой торможения можно пренебречь. С учетом принятых режимов течения воздуха значение $\varphi(\delta_a / \delta_2) = 0,2588$, а функцию $\varphi(\delta_1)$ можно заменить линейным приближением:

$$\varphi(\delta_1) = K_{\delta_1} (1 - \delta_1), \quad (3)$$

$$\text{где } K_{\delta_1} = \frac{\varphi(\delta_{1y})}{1 - \varphi(\delta_{1y})}.$$

Погрешность $\varphi(\delta_1)$ согласно [1] в рабочем диапазоне изменения $\delta_1 = 0,7 \dots 1$ не превышает $\pm 3\%$.

В уравнениях, описывающих изменения давления в полостях пневмодвигателя, приращением координат при торможении пренебрегаем, а значение скорости торможения принимаем равным средним значению $\dot{\xi}_T = 0,5\dot{\xi}_{T0}$, где: $\dot{\xi}_{T0}$ - скорость пневмодвигателя в начальный момент торможения, которая в общем случае соответствует установившейся скорости $\dot{\xi}_y$. С учетом принятых допущений система уравнений (2) в относительном виде, описывающая процесс фрикционного торможения пневмодвигателя имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_{1T} &= \frac{k}{\xi_{01} + \xi_{T0}} [K_{\delta_1} (1 - \delta_{1T}) - \delta_{1T} \frac{\dot{\xi}_{T0}}{2}], \\ \dot{\delta}_{2T} &= \frac{k}{\xi_{01} + 1 - \xi} [-\frac{\Omega}{\Pi_{2,1}^F} \varphi^* + \delta_{2T} \frac{\dot{\xi}_{T0}}{2}], \\ \ddot{\xi}_T &= \frac{1}{N^2} (\delta_{1T} - \Pi_{2,1}^F \delta_{2T} - x - x_q), \end{aligned} \quad (4)$$

где ξ_{T0} – начальная координата торможения, в общем случае равная конечной координате устанавливаемых движениях $\xi_{yк}$.

Первое и второе уравнение системы (4) имеют решение и после преобразований этих решений с использованием ряда Тейлора, учитывая начальные условия торможения, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \delta_{1T} &= \delta_{1y} + \alpha_{1T} \tau, \\ \delta_{2T} &= \delta_{2y} + \alpha_{2T} \tau, \end{aligned}$$

где коэффициенты α_{1T} и α_{2T} соответственно равны:

$$\alpha_{1T} = \frac{kK}{\xi_{01} + \xi_{yк}} - \delta_{1y} \left(\frac{kK}{\xi_{01} + \xi_{yк}} - \frac{\dot{\xi}_y}{2} \right);$$

$$\alpha_{2_T} = -\frac{k\Omega\varphi^*}{(\xi_{02} + 1 - \xi_{yк})\Pi_{2,1}^F} + \delta_{2_y} \frac{k\dot{\xi}_y}{2(\xi_{02} + 1 - \xi_{yк})}.$$

Учитывая приведенные выше значения силы фрикционного торможения x_q , уравнение движения в системе (4) переписывается так:

$$\ddot{\xi}_T = \frac{1}{N^2}(\delta_{1_T} - \Pi_{2,1}^F \delta_{2_T} - x - x_T), \quad (5)$$

где $x = \text{const}$ - полезная нагрузка и сила внутреннего тела трения в пневмоцилиндре.

При известных параметрах δ_{1_T} и δ_{2_T} уравнение (5) можно решить аналитически. Для этого введем обозначение:

$$\Theta(\tau) = \frac{1}{N^2}(\delta_{1_T} - \Pi_{2,1}^F \delta_{2_T} - x) = b_{1_\tau} + b_{2_\tau},$$

где координаты b_{1_τ} и b_{2_τ} , принимая во внимание δ_{1_T} и δ_{2_T} , будут равны:

$$b_{1_\tau} = \frac{1}{N^2}(\delta_{1_y} - \Pi_{2,1}^F \delta_{2_y} - x); \quad b_{2_\tau} = \frac{1}{N^2}(\alpha_{1_T} + \Pi_{2,1}^F \alpha_{2_T}).$$

В результате решений уравнения (5) получим аналитические зависимости для определения скорости торможения и тормозного пути:

$$\dot{\xi}_T = \dot{\xi}_y + b_{1_\tau} \tau - \frac{b_{2_\tau} \tau^2}{2}; \quad \xi_T = \xi_y \tau + \frac{b_{1_\tau} \tau^2}{2} - \frac{b_{2_\tau} \tau^2}{2}.$$

Время торможения можно найти, задаваясь $\dot{\xi}_{|\tau=\tau_k} = 0$. Скорость пневмодвигателя при фрикционном торможении снимается по параболическому закону (рис. 2), то есть ускорение в процессе торможения постоянно возрастает, а максимальное значение достигается в момент остановки рабочего органа. Конечная величина ускорения в момент остановки может быть определена из уравнения (5) путём подстановки конечных значений $\delta_{1ТК}$ и $\delta_{2ТК}$.

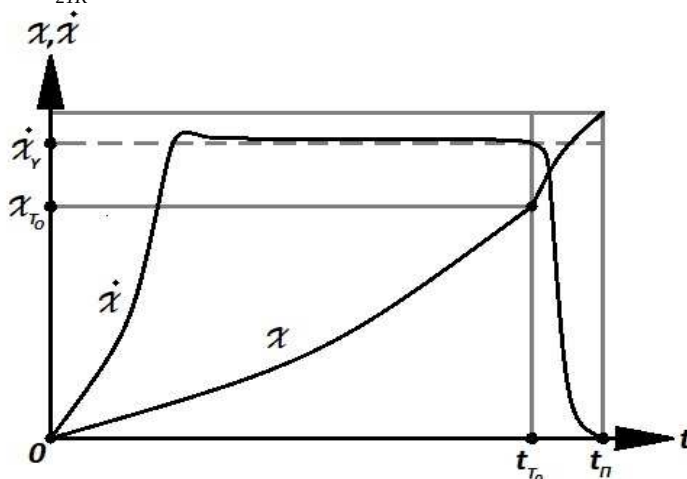


Рис. 2. Вид зависимостей $x(t)$, $\dot{x}(t)$ при фрикционном позиционировании

Таким образом, представленная методика аналитического расчета релейного пневмопривода с фрикционным позиционированием позволяет следующее.

- Определить конструктивные параметры пневмопривода и величину фрикционного воздействия при позиционировании и при необходимости провести их коррекцию в соответствии с требованиями заказчика по быстродействию, точности позиционирования и тормозному ускорению.

- При заданных конструктивных параметров и фрикционном усилии определить время и погрешность позиционирования, а также, если есть необходимость, тормозное ускорения и сделать заключения о целесообразности использования релейных пневматических привода с фрикционным позиционированием в рассматриваемом проекте.

Список литературы

1. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машины. М.: Машиностроение, 1985.
2. Филимонов Е.А. Исследование тормозных устройств пневмопривода манипулятора // Проектирование механизмов и машин-автоматов. Новочеркасск, 1979. С. 106-116.

References

1. Herz E.B. Dynamics of machine pneumatic systems. M.: Mechanical engineering, 1985.
2. Filimonov E.A. Research of manipulator pneumatic drive braking systems // Design of mechanisms and automatic machines. Novocherkassk, 1979. P. 106-116.

Королёв Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор	Korolev Vladimir Aleksandrovich – doctor of science, professor
Воротынцев Борис Николаевич – старший преподаватель	Vorotyntsev Boris Nikolaevich – senior lecturer
Цветков Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент	Tsvetkov Vladimir Aleksandrovich – candidate of sciences, associate professor
Попов Валерий Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Popov Valeriy Vladimirovich – candidate of sciences, associate professor
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия	Baltic state technical university “VOENMEH”, Saint- Petersburg, Russia

Received 01.04.2019