УДК 621.541

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПОЗИЦИОННЫЙ ПРИВОД И ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Г.В.Крейнин, С.Ю.Мисюрин

Обсуждается проблема использования информационной технологии (модели-наблюдателя) в целях сведения к минимуму количества датчиков в динамической управляемой системе. Предполагается, что на двигателе установлен единственный датчик перемещения исполнительного органа.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования [1–3], пневматический позиционный привод устойчиво работает только при наличии развитой системы обратных связей по фазовым переменным (переменным состояния) всех его основных элементов. Кроме основной обратной связи по перемещению, в систему должны быть включены обратные связи по скорости и ускорению (перепаду давлений в полостях или движущей силе) двигателя, а также по переменным, характеризующим состояние (динамику) рабочего органа распределительного устройства (золотника), если его быстродействие недостаточно велико по сравнению с быстродействием двигателя. Что касается третьего основного блока привода – системы управления, то в случае аналоговой (непрерывной) реализации ее динамикой можно пренебречь вследствии высокого быстродействия; для цифровых (дискретных) систем необходимо учитывать влияние квантования управляющего сигнала (как по уровню, так и по времени) на динамику привода в целом.

Для измерения переменных состояния промышленностью предлагается широкий спектр аналоговых и дискретных устройств (датчиков), контактного и бесконтактного действия, рассчитанных на сигналы различного уровня, имеющих различную разрешающую способность и стоимость. Однако прямое измерение всего множества переменных состояния привода весьма сложная и дорогостоящая техническая задача. Поэтому все чаще отдают предпочтение информационным технологиям, которые позволяют получить оценку части переменных состояния непрямым способом без установки датчиков. Например, можно ограничиться установкой в позиционной системе с пневматическим двигателем только относительно простого датчика перемещения поршня, а скорость и ускорение поршня оценивать с помощью информационной технологии.

Из всех видов такой технологии наиболее мощной и универсальной считается т.н. **модель-наблюдатель (observer)** – математическая модель объекта управления, связанная обратными связями с физическим объектом на входе и выходе, функционирующая с ним совместно. Основным требованием к системе объект - модель-наблюдатель (далее «наблюдатель») считается близость их параметров, динамических свойств, а также начальных условий.

<u>Динамическая модель объекта</u>. Физическим объектом является пневматический позиционный привод с бесштоковым поршневым двигателем. В отличие от модели, представленной в работах [1,2], здесь в целях общности используется ее безразмерный аналог $\Psi(\tau)$, полученный переходом к безразмерным переменным, соответственно времени, перемещения поршня и давления.

В используемую безразмерную модель привода $\Psi(\tau)$ входит система уравнений (1) - движения поршня, (2) и (3) -изменения давлений в рабочих полостях пневмоцилиндра. Дополнительными являются уравнения (4), характеризующие: структуру и параметры входного сигнала управления γ_C, запаздывание в отработке этого сигнала распределительным устройством в виде изменения положения γ органа распределения (золотника), а также законы открытия β_i рабочих каналов в функции γ

$$\ddot{\xi} = \delta_1 - \delta_2 - \nu_v \dot{\xi} - \nu_{fr} sign(\dot{\xi}) + \delta_r \tag{1}$$

$$\dot{\delta}_1 = (1/(\xi_{01} + \xi))(W(\beta_1^+ \varphi_1^+(\delta_1) - \Omega\beta_1^- \varphi_1^-(\delta_a/\delta_1)\cdot\delta_1) - \delta_1\dot{\xi}) \tag{2}$$

$$\dot{\delta}_2 = (1/(\xi_{02} - \xi))(W(\beta_2^+ \varphi_2^+(\delta_2) - \Omega\beta_2^- \varphi_2^-(\delta_a/\delta_2)\delta_2) + \delta_2\dot{\xi}) \tag{3}$$

$$\gamma_C = \gamma_C(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi});\ \dot{\gamma} = (1/\tau_e)\cdot(\gamma_C - \gamma);\ \beta_i = \beta_i(\gamma) \tag{4}$$

Линеаризованная модель объекта управления. Линеаризованная динамическая модель привода подробно рассматривалась многими авторами. Модель $\widehat{\Psi}(\tau)$, полученная линеаризацией $\Psi(\tau)$ и используемая далее, является безразмерной, что позволяет получить более полные выводы о допустимых пределах ее использования в системе управления нелинейным объектом.

В первом приближении линеаризованная безразмерная динамическая модель поршневого двигателя может быть представлена уравнением 3-го порядка

$$\dddot{\widehat{\xi}} + \widehat{a}_1 \ddot{\widehat{\xi}} + \widehat{a}_2 \dot{\widehat{\xi}} = \widehat{a}_2 \widehat{a}_3 \widehat{a}_4 \cdot \widehat{\gamma}\,, \tag{5}$$

где $\widehat{x}$ - размерное, $\widehat{\xi} = \widehat{x}/s$ - безразмерное перемещение поршня на выходе из наблюдателя (s — ход поршня); $\widehat{a}_1$- параметр жидкостного трения; $\widehat{a}_2$- параметр жесткости столбов воздуха в рабочих полостях пневмоцилиндра; $\widehat{a}_3$- параметр пропускной способности рабочих каналов; $\widehat{a}_4$ - тангенс угла наклона статической характеристики распределителя; $\widehat{\beta} = \widehat{a}_4 \widehat{\gamma}$ - параметр открытия рабочих каналов распределителя ($0 \le |\widehat{\beta}| \le 1$ при $0 \le |\widehat{\gamma}| \le 1$); $\widehat{\gamma} = \widehat{z}/z_{\max}$; $\widehat{z}$ - смещение органа распределения от нейтрального положения; $z_{\max}$- максимальное значение $\widehat{z}$, соответствующее полному открытию рабочего канала, когда $|\widehat{\beta}| = 1$. Все переменные и параметры, относящиеся к модели $\widehat{\Psi}(\tau)$ наблюдателя, отмечены сверху знаком $\wedge$.

Уравнение (5) получено в результате линеаризации $\Psi(\tau)$ относительно состояния, установившегося при отработке средней позиции $\widehat{\xi} = \widehat{\xi}_{end} = \widehat{x}_{end}/s$=0,5. В этом состоянии:

- рабочие полости пневмоцилиндра геометрически симметричны;

- золотник (с отрицательным перекрытием) находится в нейтральном положении, причем открытия каналов характеризуются $\beta_i = \beta_0$; давления в рабочих полостях пневмоцилиндра, определяемые балансом прихода и оттока сжатого газа, вследствие отсутствия силовой нагрузки на штоке, одинаковы $p_{01} = p_{02} = p_0$;
- режим течения воздуха во входных и в выходных рабочих каналах надкритический;
- темп изменения давлений в полостях мало зависит от уровня давления и определяется в основном приходом и расходом воздуха, а также скоростью поршня.

Несмотря на ограничения, накладываемые этими условиями, относительно простая линеаризованная модель (5) оказалась в целом весьма гибкой и эффективной. Более того, была установлена возможность существенного улучшения динамики системы «объект-наблюдатель» за счет независимой вариации параметров наблюдателя в значительных пределах, для чего в структуру наблюдателя введены дополнительные множители α_1 и α_2.

Уравнение (5) в векторной форме имеет следующий вид:

$$\dot{\widehat{\Psi}} = \widehat{A} \cdot \widehat{\Psi} + \widehat{B} \cdot \widehat{U}, \tag{6}$$

где $\widehat{\Psi}\left\{\widehat{\Psi}_1, \widehat{\Psi}_2, \widehat{\Psi}_3\right\}$ - вектор переменных состояния наблюдателя ($\widehat{\Psi}_1 = \widehat{\xi}, \widehat{\Psi}_2 = \dot{\widehat{\xi}}, \widehat{\Psi}_3 = \ddot{\widehat{\xi}}$). Матрица $\widehat{A}$ поршневого двигателя и матрица $\widehat{B}$ управления определяются выражениями

$$\widehat{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\widehat{a}_2 & -\widehat{a}_1 \end{vmatrix}; \quad \widehat{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \widehat{a}_2 \widehat{a}_3 \end{vmatrix}. \tag{7}$$

$\widehat{U} = \widehat{a}_4 \cdot \widehat{\gamma} = \widehat{\beta}$ - вектор входных переменных.

<u>Структура системы объект-наблюдатель.</u> Структура системы «управляемый объект (пневматический позиционный привод) – наблюдатель» показана на рис.1. Модель $\Psi(\tau)$ объекта представлена здесь блоком **I**; ей соответствует система уравнений (2) – (4). Основой модели $\widehat{\Psi}(\tau)$ наблюдателя (блок **II**) является уравнение (6). В структуру наблюдателя входит также уравнение, описывающее процесс запаздывания в преобразовании сигнала управления γ_C в сигнал $\widehat{\gamma}$

$$\dot{\widehat{\gamma}} = (1/\widehat{\tau}_e) \cdot (\gamma_C - \widehat{\gamma}). \tag{8}$$

Законы открытия $\widehat{\beta}_i$ рабочих каналов в функции $\widehat{\gamma}$ в структуре наблюдателя определяются обобщенной зависимостью $\widehat{a}_4 \widehat{\gamma} = \widehat{\beta}$. Ограничения $0 \le \left|\widehat{\beta}\right| \le 1$ и $0 \le \left|\widehat{\gamma}\right| \le 1$ необходимы для моделирования режимов насыщения по максимуму смещения органа распределения и по максимуму открытия проходного сечения рабочих каналов.

Динамическая модель собственно наблюдателя строится на основе уравнения (9). Согласно [1,2], ее векторная форма имеет вид

$$\dot{\widehat{\Psi}}(\tau) = \left|\widehat{A} - G \cdot C\right| \cdot \widehat{\Psi}(\tau) + G \cdot C \cdot \Psi(\tau) + \widehat{B} \cdot \widehat{U}(\tau). \qquad (9)$$

Здесь: $G = \left[g_1 g_2 g_3\right]^T$ - матрица усиления сигнала рассогласования $\widehat{\xi}$ и ξ; $C = \left|100\right|$ - матрица наблюдения, показывающая, какие из переменных состояния являются наблюдаемыми с помощью датчиков.

Как видно на рис.1, сигнал, задающий позицию с координатой ξ_{end}, поступает на вход системы управления (СУ) вместе с сигналами обратной связи $\rho[\xi]$ от объекта и $\widehat{\rho}[\dot{\widehat{\xi}}, \ddot{\widehat{\xi}}]$ - от наблюдателя. Предполагается, что на объекте установлен только датчик перемещения поршня ξ, а в качестве сигналов обратной связи по скорости и ускорению поршня используются сигналы $\dot{\widehat{\xi}}$ и $\ddot{\widehat{\xi}}$, генерируемые наблюдателем. На выходе системы управления формируется общий для блоков **I** и **II** сигнал управления γ_C, который поступает на распределитель **P** объекта и его аналог $\widehat{P}$ наблюдателя. На выходах этих элементов получаются соответственно сигналы γ и $\widehat{\gamma}$, моделирующие смещение органа распределения в объекте и в структуре наблюдателя. Сигналы γ и $\widehat{\gamma}$ отрабатываются согласно зависимостям (4) и (8) с постоянными времени запаздывания τ_e и $\widehat{\tau}_e$. Первая из них характеризует свойство реального объекта, а вторая является варьируемым параметром наблюдателя. Было установлено, что желательно иметь $\widehat{\tau}_e < \tau_e$, например, $\widehat{\tau}_{e\min} = 0{,}5\tau_e$.

Общие выводы. Есть все основания полагать, что модель-наблюдатель является весьма эффективным средством для использования в системе управления пневматическим позиционным приводом, поскольку позволяет свести к минимуму количество датчиков переменных состояния. В рассмотренном выше случае при использовании единственного датчика перемещения исполнительного органа наблюдатель достаточно устойчиво генерировал сигналы обратной связи по скорости и ускорению.

Наблюдатель и вся система управления могут быть реализованы в цифровом виде, поскольку к быстродействию цифровых блоков не предъявляется особо жестких требований. Наблюдатель может быть выполнен как универсальный цифровой модуль. Обобщенные (безразмерные) параметры универсального модуля выбираются по результатам исследования безразмерной модели «объект-наблюдатель» вместе с безразмерными параметрами собственно привода. Переход к размерным параметрам и переменным привода рассматривался выше, а также, более подробно, в работе [3]. Для перехода к размерным параметрам наблюдателя достаточно вместо множителей $g_1, g_2, g_3, \widehat{a}_1, \widehat{a}_2, \widehat{a}_3$ (рис.1) ввести множители $G_1, G_2, G_3, \widehat{A}_1, \widehat{A}_2, \widehat{A}_3$, используя связывающие их зависимости:

$$G_1 = g_1 \cdot (1/t^\bullet); G_2 = g_2 \cdot (1/t^\bullet)^2; G_3 = g_3 \cdot (1/t^\bullet)^3;$$
$$\widehat{A}_1 = \widehat{a}_1 \cdot (1/t^\bullet); \widehat{A}_2 = \widehat{a}_2 \cdot (1/t^\bullet)^2; \widehat{A}_3 = \widehat{a}_3 \cdot (s/t^\bullet).$$

Соответственно безразмерные переменные $\widehat{\xi},\dot{\widehat{\xi}},\ddot{\widehat{\xi}}$, а также безразмерное время τ, заменяются размерными переменными $\widehat{x},\dot{\widehat{x}},\ddot{\widehat{x}},t$. Таким путем универсальный цифровой блок наблюдателя настраивается на конкретные условия работы позиционного привода в соответствии с выбранными реальными параметрами. Однако методика решения задачи синтеза позиционного пневмопривода требует определенной доработки, что может быть сделано только по мере накопления практического опыта.

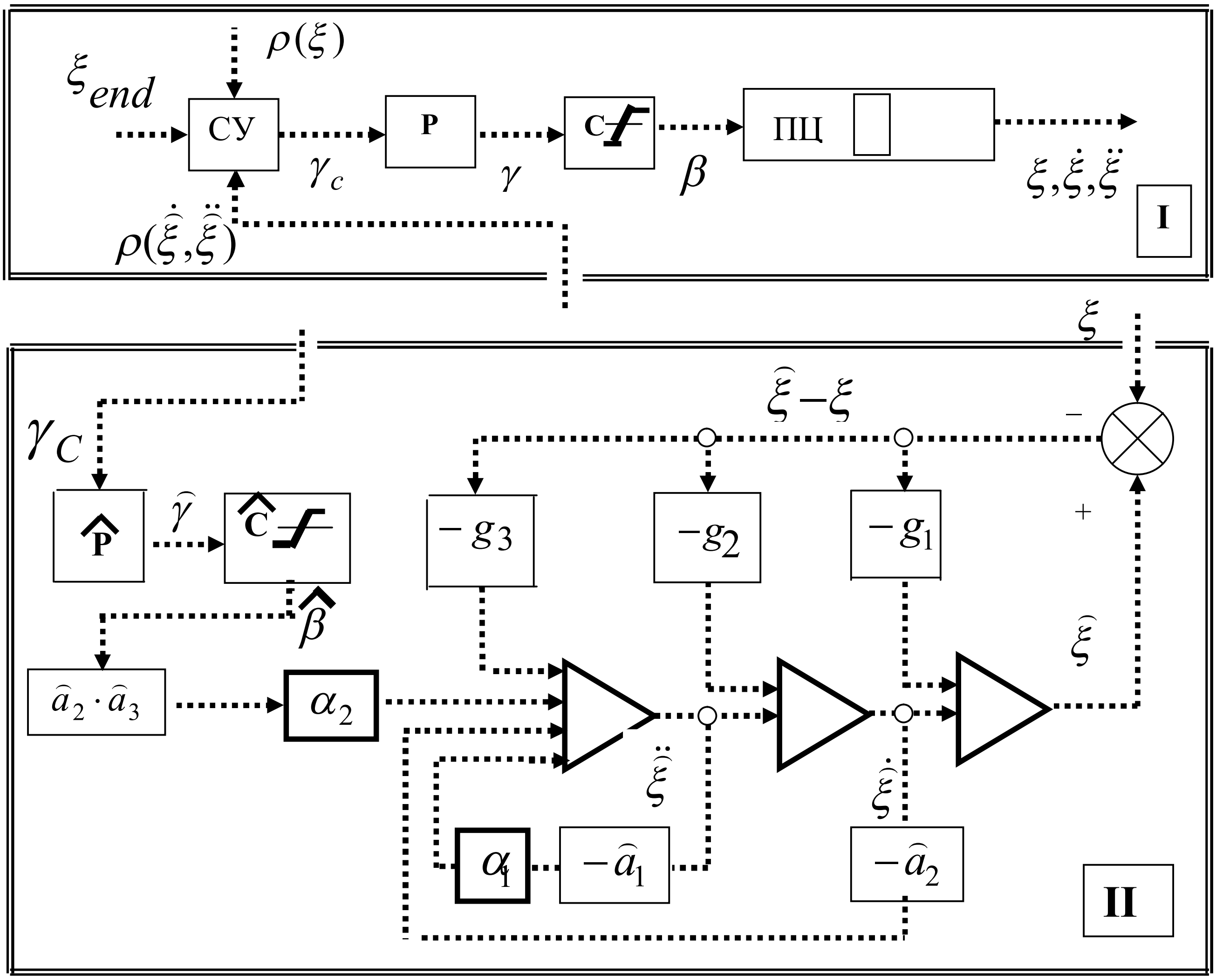

Рис. 1

Литература

1. Krivts I.L., Krejnin G.V. Pneumatic actuating systems for automatic equipment. Structure and design. CRC Press, 2006, 345 p.

2. Крейнин Г.В., Кривц И.Л. и др. Гидравлические и пневматические приводы промышленных роботов и автоматических манипуляторов. М.: Машиностроение, 1993, 299 с.

3. Крейнин Г.В., Кривц И.Л., Мисюрин С.Ю., Яшина М.А. Пневматический позиционный привод: оценка возможностей и перспектив применения. // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2007, № 1, с.27-35.

Институт машиноведения РАН, Россия, Москва