

УДК 621.532.1

**Г.А. Крутиков**, канд. техн. наук, доц.,  
**М.Г. Пономаренко**, аспирант,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»

## **ПУТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПНЕВМОПРИВОДАХ**

*В работе рассмотрена возможность использования в быстродействующих пневмоприводах редукционных клапанов с пропорциональным электроуправлением. Сформулирован принцип оптимального выбора параметров надмембранной камеры клапана, исходя из условия достижения его максимальной устойчивости и пропускной способности.*

**стабилизация давления, быстродействующий пневмопривод, мембранно-клапанный блок, пропускная способность, устойчивость**

### ***Проблема и её связь с научными и практическими задачами.***

Для стабилизации давления питания в быстродействующих пневмоприводах используются редукционные клапаны (РК), обладающие одновременно заданным запасом устойчивости и пропускной способностью. Рассмотрим последний показатель, поскольку в быстродействующих пневмоприводах падение давления после РК соизмеримо с падением давления на сопротивлении всей остальной питающей магистрали привода [1]. Улучшить этот показатель для РК с электрическим управлением можно или за счет установки после РК ресивера с объемом, намного превышающим рабочий объем исполнительного механизма, что ведёт к значительному увеличению веса и габаритов машины, либо за счет изменения параметров РК, которое, как правило, ведёт к потере устойчивости последнего.

***Анализ исследований и публикаций.*** В работах [2, 3] подробно описана конструкция и принцип действия РК с электроуправлением, расчётная схема и упруго-вязкостная модель которого представлены на рис. 1.

***Постановка задачи.*** Более рациональным представляется одновременное достижение максимальной пропускной способности РК и большого запаса его устойчивости за счет создания системы стабилизации давления с переменной жесткостью мембранно-клапанного узла, величина которой возрастает с увеличением скорости движения клапана. Достижение эффективных показателей устойчивости и про-

пускнуи способности РК основано на том, что скорость собственных движений клапана на порядок выше скорости его вынужденного движения во время срабатывания пневмопривода.

**Изложение материала и результаты.** РК, обладающий указанными свойствами, можно получить, включив в схему дополнительные звенья демпфирования и жесткости путем создания надмембранной демпфирующей камеры (рис. 1, а).

Рассмотрим линейную модель надмембранной камеры, используя ее механический аналог (рис. 1, б). Воздействие воздуха на мембрану в такой камере представим как действие пружины  $c_1$ , верхний конец которой закреплен через демпфер (т.е. подвержен действию вязкого трения), а нижний жестко соединен с мембраной. Суммарная жесткость определяется жесткостью подклапанной пружины, аэродинамической жесткостью и силой вязкого трения хвостовика клапана о направляющие.

Таким образом, упруго-вязкостная модель мембранно-клапанного узла такого РК представляет собой совокупность модели Максвелла (надмембранная камера) и модели Войта (клапанно-мембранный узел с пружиной) [2].

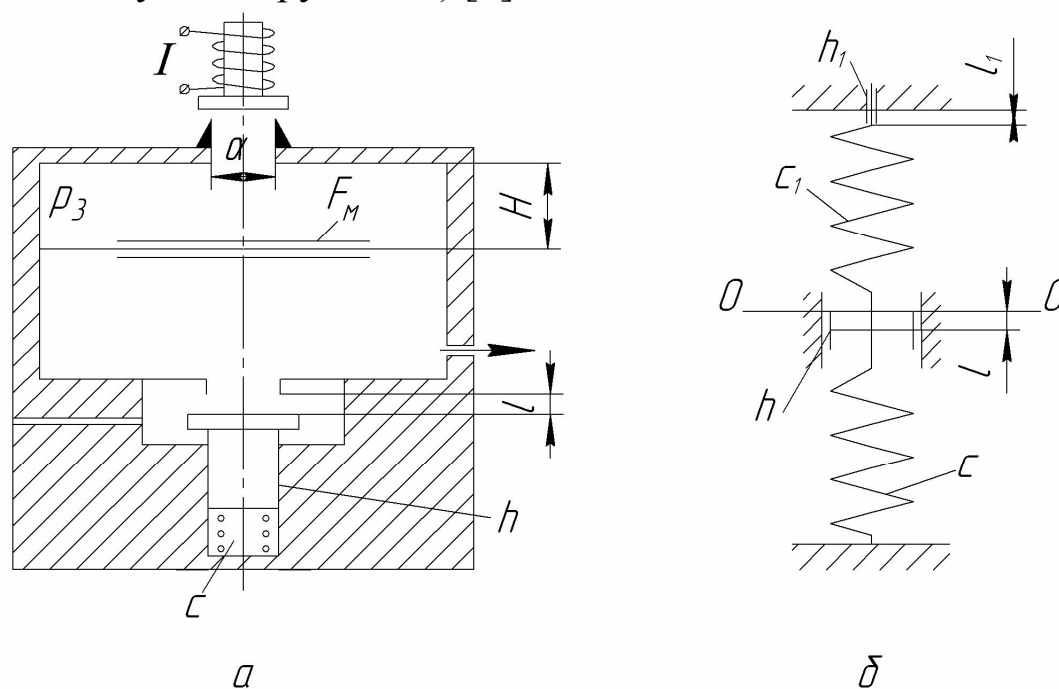


Рисунок 1 - Расчетная схема РК с электроуправлением (а) и упруго-вязкостная модель клапанно-мембранного блока РК (б)

Присоединенную жесткость пневмопружины и коэффициент вязкого трения присоединенного звена демпфирования определим из уравнения энергетического баланса газа в надмембранной камере:

$$\begin{cases} p_3 = -\frac{1}{\tau_1} p_3 - \frac{k \cdot p_{30}}{H} \dot{l}_1; \\ c_1 = (l_1 - l) = p_3 \cdot F_M, \end{cases} \quad (1)$$

Откуда

$$\left( \frac{k \cdot p_3 \cdot \tau_1}{H} - \frac{\tau_1 \cdot c_1}{F_M} \right) \dot{l}_1 + \frac{\tau_1 \cdot c_1}{F_M} \dot{l}_1 + \frac{c_1}{F_M} (l_1 - l) = 0, \quad (2)$$

где  $p_3$  - давление в надмембранной камере;  $\tau_1 = \frac{F_M \cdot H}{k \cdot R \cdot T \cdot \alpha}$  - постоянная времени надмембранной камеры;  $F_M$  - эффективная площадь мембраны;  $H$  - высота надмембранной камеры;  $k$  - показатель адиабаты;  $R$  - газовая постоянная;  $T$  - абсолютная температура воздуха;  $\alpha$  - проводимость дросселя надмембранной камеры;  $l$  - перемещение мембранного блока;  $c_1$  - жесткость пневмопружины;  $l_1$  - скрытая координата в модели Максвелла.

Поскольку нижний конец пружины, имеющий координату  $l$  не испытывает воздействия вязкого трения, первый член в уравнении (2) равен нулю, т.е.:

$$c_1 = \frac{k \cdot p_{30}}{H} F_M. \quad (3)$$

Преобразуем уравнение (3) к виду:

$$h_1 \cdot \dot{l}_1 + c_1 (l_1 - l) = 0, \quad (4)$$

где  $h_1 = \tau \cdot c_1$  - коэффициент вязкого трения присоединенного звена демпфирования.

Рассмотрим подробнее способность надмембранной камеры рассеивать и накапливать энергию колебания мембранно-клапанного блока.

Сила пневмопружины:

$$N_{\text{п}} = c_1 (l - l_1). \quad (5)$$

Сила демпфера:

$$N_{\text{д}} = h_1 \cdot \dot{l}_1. \quad (6)$$

Продифференцировав выражение (5), получим:

$$\dot{N}_{\text{п}} = c_1 \cdot \dot{l} - c_1 \cdot \dot{l}_1. \quad (7)$$

Подставляя  $\dot{l}_1$  из формулы (6) в последнее выражение и решая полученное уравнение относительно силы  $N$  противодействия вязкостно-упругого звена, образованного надмембранной камерой, найдем:

$$N = N_{\text{д}} = \mathbb{A}_{\text{n}} \quad h_1 \cdot \dot{l} - \tau_1 \cdot \dot{N}. \quad (8)$$

С учетом вязкостно-упругого влияния клапана с подклапанной пружиной выражение (8) будет выглядеть следующим образом:

$$N^* = N + c \cdot l + h \cdot \dot{l}, \quad (9)$$

где  $h$  - коэффициент вязкого трения клапана.

Подставляя значение  $N$  в уравнение (8), получим:

$$\tau_1 \cdot \dot{N}^* + N^* = h \cdot \tau_1 \cdot \ddot{l} + (\tau_1 \cdot c + h + h_1) \dot{l} + c \cdot l. \quad (10)$$

Перейдя к преобразованиям Лапласа, найдем связь между  $l(s)$  и  $N^*(s)$ :

$$N^*(s) = c^*(s) \cdot l(s), \quad (11)$$

где  $c^*(s) = \frac{h \cdot \tau_1 \cdot s^2 + (\tau_1 \cdot c + h + h_1)s + c}{\tau_1 \cdot s + 1}$ .

Предположив, что входной координатой является синусоидальное перемещение мембранного блока  $l = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ , перейдем к преобразованию Фурье:

$$N^*(\omega) = c^*(\omega) \cdot l(\omega), \quad (12)$$

где  $c^*(\omega) = \text{Re} c^* + i \text{Im} c^* = \text{Re} e^{i\varphi}$  - комплексная жесткость мембранно-клапанного блока при гармоническом воздействии на него;

$$R = \sqrt{\frac{(c + h \cdot \tau_1 \cdot \omega^2)^2 + (\tau_1 \cdot c + h + h_1)^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{(h_1 + h)\omega + \tau_1^2 \cdot h \cdot \omega^3}{\omega^2 (h_1 + \tau_1 \cdot c) \tau_1 + c};$$

$$\text{Im} c^* = \frac{(h_1 + h)\omega + \tau_1^2 \cdot h \cdot \omega^3}{1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2}; \quad \text{Re} c^* = \frac{\omega^2 (h_1 + \tau_1 \cdot c) \tau_1 + c}{1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2}; \quad (13)$$

$\varphi$  - фазовый угол между силой противодействия и перемещением;  
 $R$  - отношение амплитуды колебаний силы противодействия диссипативно-упругой системы к амплитуде колебаний клапанно-мембранного блока.

Установим физический смысл действительной и мнимой частей комплексной жесткости. Изображение скорости перемещения по Ла-

пласу имеет вид:  $\dot{l} = s \cdot l$ . Если перемещение мембранного блока носит гармонический характер ( $s = i \cdot \omega$ ), то  $\dot{l} = i \cdot \omega \cdot l$ . С учетом этого условие равновесия мембранного блока (12) можно представить в виде:

$$l(\operatorname{Re} c^*) + i \cdot l(\operatorname{Im} c^*) = N^*(\omega), \quad (14)$$

или

$$(\operatorname{Re} c^*)l + \frac{\operatorname{Im} c^*}{\omega} \dot{l} = N^*(\omega),$$

т.е.  $\operatorname{Re} c^*$  характеризует собой жесткость газомеханической системы; мнимая часть комплексной жесткости, отнесенная к круговой частоте – демпфирующие свойства газомеханической системы  $h^* = \frac{\operatorname{Im} c^*}{\omega}$ .

Определим энергию, рассеянную клапанно-мембранным блоком за один период колебаний,

$$E = \int_0^{2\pi/\omega} N^* \cdot \dot{l} dt, \quad (15)$$

где  $l = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ;  $N^* = R \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ ;

$$E = R \cdot A^2 \cdot \omega \int_0^{2\pi/\omega} \sin(\omega \cdot t + \varphi) \cdot \cos(\omega \cdot t) dt = R \cdot A^2 \cdot \pi \cdot \sin \varphi,$$

т.е. 
$$E = \pi \cdot A^2 \cdot \operatorname{Im} c^*. \quad (16)$$

Найдем экстремум функции  $E(\omega)$ , используя равенство:

$$\frac{d \operatorname{Im} c^*}{d\omega} = 0. \quad (17)$$

Решив это уравнение относительно  $\omega$ , получим значение частоты, при которой возможное максимальное (или минимальное) рассеивание энергии колебания мембранного блока:

$$\omega^* = \frac{1}{\tau_1} \sqrt{\frac{1 - 2\bar{h} \pm \sqrt{1 - 8\bar{h}}}{2\bar{h}}}, \quad (18)$$

где  $\bar{h} = \frac{h}{h_1}$ .

Применив правило Лопиталю, найдем, что при  $h \rightarrow 0$  в выражении (18)  $\omega^* \rightarrow \frac{1}{\tau_1}$ . Это возможно при знаке минус в подкоренном выражении, что свидетельствует о наличии только одного экстремума

(максимума). Максимальное рассеивание энергии колебаний при этом равно  $\pi \cdot A^2 \frac{c_1}{2}$ . При  $\bar{h} > 0$  появляются два экстремума (максимум и минимум). Причем, с увеличением  $\bar{h}$  абсцисса максимума смещается вправо по шкале частот, сближаясь с абсциссой минимума. При  $\bar{h} = 0,125$  абсциссы максимума и минимума сливаются, и при  $\bar{h} = 0,125$  функция  $E(\omega)$  становится монотонной.

Наличие пика рассеивания энергии колебаний мембранно-клапанного узла связано с особенностями функционирования упруго-вязкостной модели Максвелла. При малых значениях  $\omega$  сила пропорциональна скорости перемещения блока, т.е. сдвинута в фазовой плоскости относительно перемещения на  $90^\circ$ . При малых значениях  $\omega$   $h^* = h + h_1$ . Работа рассеивания при этом мала, так как мала сила противодействия в надмембранной камере.

При увеличении частоты колебаний фазовый угол  $\varphi$  уменьшается, но вместе с тем возрастает и модуль комплексной жесткости  $R$ , которая приводит к увеличению  $\text{Im} c^*$ .

При больших частотах воздух не успевает проходить через дроссель, т.е. дроссель замыкается. Сила противодействия при этом пропорциональна перемещению и находится с ним в одной фазе. Энергия колебаний при этом не рассеивается, а лишь аккумулируется и вновь возвращается блоку. При этом  $\text{Re} c^* = c_1 + c$ ;  $h^* = h$ .

На рис. 2 представлены графики зависимостей  $E(\omega)$ ,  $h^*(\omega)$ ,  $\text{Re} c^*(\omega)$  для трех надмембранных камер, отличающихся друг от друга значением  $F_m$  или  $\alpha$ . При неизменной высоте надмембранной камеры и эффективной площади мембраны, которые выбираются из условия достижения максимального значения  $c_1$ , на величину  $\omega^*$  можно достаточно эффективно влиять, изменяя значение  $\alpha$ . Увеличение значения  $\alpha$  в два раза почти в два раза увеличивает и значение частоты, при которой происходит максимальное рассеивание энергии колебания  $\omega^*$ .

Учитывая то обстоятельство, что для достижения большой пропускной способности РК приходится принимать его собственную частоту намного выше частоты вынужденного движения, выбор минимального значения оказывается нецелесообразным. Например, на



умовий функціонування РК, уčitываючі вище соображення.

В дальнєйшєм плануєтьсє експериментальнє дослідуваннє опытного образца РК с електроуправлєннєм.

#### Список літератури

1. Крутиков Г. А. Электросварка / Г. А.Крутиков, А. И.Кудрявцев, В.Б. Кисельников. – 1977. - Вип. 44. –С. 53-58.
2. Крутиков Г. А., Пономаренко М. Г. Аналіз статичної точності пневматичного редукційного клапана / Г. А.Крутиков, М. Г. Пономаренко // Вісник Національного Технічного Університету "Харківський Політехнічний Інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2008. - №22. - С. 76-84.
3. Крутиков Г. А., Пономаренко М. Г. До питання стабілізації тиску у швидкодіючих пневмоприводах / Г. А.Крутиков, М. Г.Пономаренко // Вісник Національного Технічного Університету "Харківський Політехнічний Інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2010. - №16 (здана в друк).
4. Крутиков Г.А. Расчёт пневмоприводов дискретного действия: учеб. пособие / Г.А. Крутиков. – Х.: ХПИ, 1986. 100 с.
5. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я. Г. Пановко. – М.: Физматгиз, 1960.

**Г.А.Крутиков, М.Г.Пономаренко. Шляхи стабілізації тиску у швидкодіючих пневмоприводах.** У роботі розглянута можливість використання у швидкодіючих пневмоприводах редукційних клапанів з пропорційним електрокеруванням. Сформульовано принцип оптимального вибору параметрів надмембранної камери клапана, виходячи з умови досягнення його максимальної стійкості та пропускнує спроможності.

**стабілізація тиску, швидкодіючий пневмопривод, мембранно-клапанний блок, пропускнує спроможність, стійкість**

**G.Krutikov, M.Ponomarenko. The Ways of Pressure Leveling in a High-Speed Pneumatic Actuator.** In this paper the possibility of using the reducing valves with a proportional electric control in the high-speed pneumatic actuator was considered. The principle of optimal choice of overmembrane chamber parameters is formulated.

**pressure leveling, high-speed pneumatic actuator, membrane-valvate unit, bandwidth, stability**

Стаття надійшла до редколегії 26.09.2010

Рецензент: зав. каф. ПТМ та О НТУ «ХПІ», д-р техн. наук, проф., О.В.Григоров

© Крутиков Г.А., Пономаренко М.Г., 2010