

**Г.А. КРУТИКОВ**, канд. техн. наук, доцент, НТУ „ХПІ”;  
**М.Г. ПОНОМАРЕНКО**, аспірант, НТУ „ХПІ”

## **ДО ПИТАННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТИСКУ У ШВИДКОДІЮЧИХ ПНЕВМОПРИВОДАХ**

Розглянута можливість використання у швидкодіючих пневмоприводах редукційних клапанів з пропорційним електрокеруванням. На основі дослідження механічного аналога редукційного клапана з електрокеруванням розглянуті пружні та демпфуючі властивості клапанів з електрокеруванням як систем стабілізації тиску зі змінною жорсткістю мембранно-клапанного блока. Сформульований принцип оптимального вибору параметрів надмембранної камери такого клапана, виходячи з умови досягнення його максимальної стійкості та пропускної здатності.

Рассмотрена возможность использования в быстродействующих пневмоприводах редукционных клапанов с пропорциональным электроуправлением. На основе исследования механического аналога редукционного клапана с электроуправлением рассмотрены упругие и демпфирующие свойства клапанов с электроуправлением как систем стабилизации давления со сменной жесткостью мембранно-клапанного блока. Сформулирован принцип оптимального выбора параметров надмембранной камеры такого клапана, исходя из условия достижения его максимальной стойкости и пропускной способности.

The possibility of use in high-speed pneumatic pressure-reducing valves with proportional electric control. Based on the study of the mechanical analog pressure reducing valve with electric control considered elastic and damping properties of valve with proportional electric control like systems for stabilization of pressure, variable-stiffness diaphragm valve block. The principle of optimal choice of the overdiaphragm chamber parameters such a overdiaphragm valve based on the conditions to achieve its maximum stability and bandwidth.

Для стабілізації тиску живлення у швидкодіючих пневмоприводах застосовуються редукційні клапани (РК), що мають одночасно заданий запас стійкості і пропускну здатність. Розглянемо останній показник, оскільки у швидкодіючих приводах падіння тиску після РК порівнянне з падінням тиску на опорі усієї іншої магістралі живлення привода [1]. Покращити цей показник для РК з електричним керуванням можна або за рахунок встановлення після РК ресивера з об'ємом, що набагато перевищує робочий об'єм виконавчого механізму, що призводить до значного підвищення ваги та габаритів машини, або за рахунок зміни параметрів РК, що, як правило, призводить до втрати стійкості останнього.

Більш раціональним видається одночасне досягнення максимальної пропускної здатності РК і великого запасу його стійкості за рахунок створення системи стабілізації тиску зі змінною жорсткістю мембранно-клапанного вузла, величина якої зростає зі збільшенням швидкості руху клапана. Досягнення ефективних показників стійкості та пропускної здатності РК засновано на тому, що швидкість власних рухів клапана на

порядок вище швидкості його вимушеного руху під час спрацювання пневмопривода.

РК, що має зазначені властивості, можна отримати включивши в схему додаткові ланки демпфування та жорсткості шляхом створення надмембранної демпфуючої камери (рис. 1, а).

Розглянемо лінійну модель надмембранної камери, використовуючи її механічний аналог (рис. 1, б). Вплив повітря на мембрану в такій камері зобразимо як дію пружини  $c_1$ , верхній кінець якої закріплений через демпфер (тобто підвладний дії в'язкого тертя), а нижній жорстко поєднаний з мембраною. Сумарна жорсткість визначається жорсткістю підклапанної пружини, аеродинамічною жорсткістю і силою в'язкого тертя хвостовика клапана об напрямні.

Таким чином, в'язкісно-пружна модель мембранно-клапанного вузла такого РК являє собою сукупність моделі Максвелла (над мембранна камера) та моделі в'їта (клапанно-мембранний вузол з пружиною) [2].

Приєднану жорсткість пневмопружини та коефіцієнт в'язкого тертя приєднаної ланки демпфування визначимо з рівняння енергетичного балансу газу в надмембранній камері:

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

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

де  $p_3$  - тиск у надмембранній камері;  $\tau_1 = \frac{F_m \cdot H}{k \cdot R \cdot T \cdot \alpha}$  - постійна часу надмембранної камери;  $F_m$  - ефективна площа мембрани;  $H$  - висота надмембранної камери;  $k$  - показник адиабати;  $R$  - газова постійна;  $T$  - абсолютна температура повітря;  $\alpha$  - провідність дроселя надмембранної камери;  $l$  - переміщення мембранного блока;  $c_1$  - жорсткість пневмопружини;  $l_1$  - прихована координата в моделі Максвелла.

Оскільки нижній кінець пружини, що має координату  $l$  не зазнає впливу в'язкого тертя, перший член у рівнянні (2) дорівнює нулю, тобто:

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

Перебудуємо рівняння (3) до вигляду:

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

де  $h_1 = \tau \cdot c_1$  - коефіцієнт в'язкого тертя приєднаної ланки демпфування.

Розглянемо докладніше здатність надмембранної камери розсіювати та накопичувати енергію коливання мембранно-клапанного блоку.

Сила пневмопружины:

$$N_n = c_1 \cdot l - l_1 \cdot \dot{l} \quad (5)$$

Сила демпфера:

$$N_d = h_1 \cdot \dot{l}_1 \quad (6)$$

Продиференціювавши вираз (5), отримаємо:

$$\dot{N}_n = c_1 \cdot \dot{l} - c_1 \cdot \dot{l}_1 \quad (7)$$

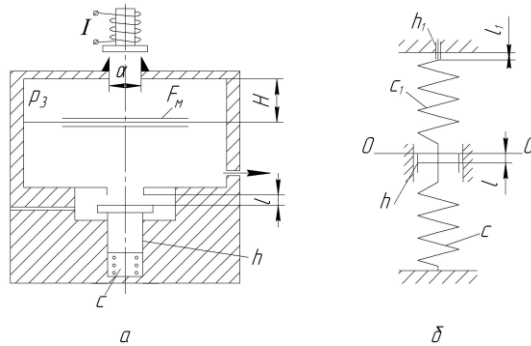


Рисунок 1 – Розрахункова схема РК з електрокеруванням (а) та пружно-в'язкісна модель клапанно-мембранного блоку

Підставляючи  $\dot{l}_1$  з формули (6) в останній вираз і вирішуючи отримане рівняння відносно сили  $N$  протидії в'язкісно-пружної ланки, утвореної надмембранною камерою, знайдемо:

$$N = N_d = N_n = h_1 \cdot \dot{l} - \tau_1 \cdot \dot{N} \quad (8)$$

З урахуванням в'язкісно-пружного впливу клапана з підклапанною пружиною вираз (8) буде виглядати наступним чином:

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

де  $h$  - коефіцієнт в'язкого тертя клапана.

Підставляючи значення  $N$  у рівняння (8), отримаємо:

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

Перейшовши до перетворень Лапласа, знайдемо зв'язок між  $l$  і

$$N^* \text{ і } s : \quad N^* \text{ і } s = c^* \text{ і } s \cdot l \text{ і } s \quad (11)$$

$$\text{де } c^* \text{ і } s = \frac{h \cdot \tau_1 \cdot s^2 + \tau_1 \cdot c + h + h_1 \text{ і } s + c}{\tau_1 \cdot s + 1}$$

Припустивши, що вхідною координатою є синусоїдальне переміщення мембранного блока  $l = A \cdot \sin \omega \cdot t$ , перейдемо до перетворення Фур'є:

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

де  $c^* \omega = \text{Re} c^* + i \text{Im} c^* = \text{Re}^{i\varphi}$  - комплексна жорсткість мембранно-клапанного блока при гармонійному впливі на нього;

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

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

де  $\varphi$  - фазовий кут між силою протидії і переміщенням;  $R$  - відношення амплітуди коливань сили протидії дисипативно-пружної системи до амплітуди коливань клапанно-мембранного блока.

Встановимо фізичний сенс дійсної та уявної частин комплексної жорсткості. Зображення швидкості переміщення за Лапасом має вигляд:  $\dot{l} = s \cdot l$ . Якщо переміщення мембранного блока має гармонійний характер  $s = i \cdot \omega$ , то  $\dot{l} = i \cdot \omega \cdot l$ . З урахуванням цього умову рівноваги мембранного блока (12) можна подати у вигляді:

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

або 
$$\text{Re} c^* l + \frac{\text{Im} c^*}{\omega} \dot{l} = N^* \omega,$$

тобто  $\text{Re} c^*$  характеризує собою жорсткість газомеханічної системи; уявна частина комплексної жорсткості, співвіднесена до кругової частоти - демпфуючі властивості газомеханічної системи  $h^* = \frac{\text{Im} c^*}{\omega}$ .

Визначимо енергію, розсіяну клапанно-мембранним блоком за один період коливань,

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

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

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

тобто 
$$E = \pi \cdot A^2 \cdot \text{Im} c^*. \quad (16)$$

Знайдемо екстремум функції  $E \omega$ , використовуючи рівність:

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

Вирішивши це рівняння відносно  $\omega$ , отримаємо значення частоти, при якій можливе максимальне (чи мінімальне) розсіювання енергії коливання мембранного блока:

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

де  $\bar{h} = \frac{h}{h_1}$ .

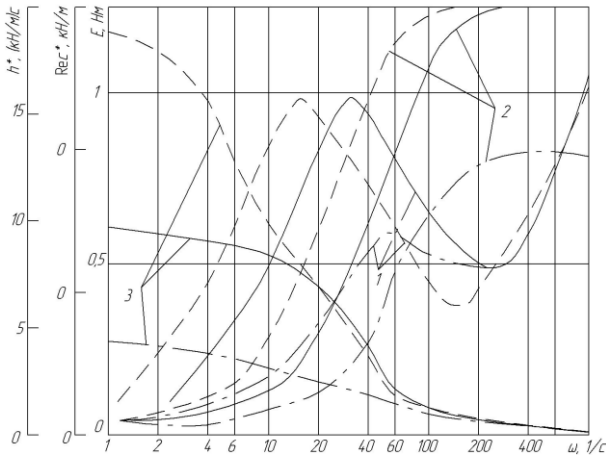


Рисунок 2 – Залежність  $E$  (1),  $\operatorname{Re} c^*$  (2) та  $h^*$  (3) від  $\omega$  при  $A = 0,15$  см;  $p_{30} = 0,35$  МПа;  $H = 0,5$  см;  $h = 0,16$  кН·с/м;  $c = 5$  кН./м;  $T = 300$  К, а

також  $\alpha$  см<sup>2</sup>/с, та  $F$ , см<sup>2</sup>, відповідно:

———— - 0,004; 30; - - - - - 0,002; 30; — · — · — · — · — - 0,002; 20.

Застосувавши правило Лопітала, знайдемо, що при  $h \rightarrow 0$  у виразі (18)

$\omega^* \rightarrow \frac{1}{\tau_1}$ . Це можливо якщо у підкореному виразі знак мінус, що свідчить про наявність лише одного екстремуму (максимуму). Максимальне розсіювання енергії коливань при цьому дорівнює  $\pi \cdot A^2 \frac{c_1}{2}$ . При  $\bar{h} > 0$  з'являються два екстремуми (максимум і мінімум). Причому, зі збільшенням  $\bar{h}$  абсциса максимуму зміщується вправо по шкалі частот, зближуючись з абсцисою мінімуму. При  $\bar{h} = 0,125$  абсциси максимуму та мінімуму зливаються, і при  $\bar{h} = 0,125$  функція  $E \omega$  стає монотонною.

Наявність піку розсіювання енергії коливань мембранно-клапанного вузла пов'язана з особливостями функціонування пружно-в'язкісної моделі Максвелла. При малих значеннях  $\omega$  сила пропорційна швидкості переміщення блока, тобто зсунута в фазовій площині відносно переміщення на  $90^\circ$ . При малих значеннях  $\omega$   $h^* = h + h_1$ . Робота розсіювання при цьому мала, адже мала сила протитиску в надмембранній камері.

При збільшенні частоти коливань фазовий кут  $\varphi$  зменшується, але водночас зростає і модуль комплексної жорсткості  $R$ , що призводить до збільшення  $\text{Im } c^*$ .

При більших частотах повітря не встигає проходити через дросель, тобто дросель замикається. Сила протитиску при цьому пропорційна переміщенню і знаходиться з ним у одній фазі. Енергія коливань при цьому не розсіюється, а лише акумулюється і знову повертається блоку. При цьому  $\text{Re } c^* = c_1 + c$ ;  $h^* = h$ .

На рис. 2 наведені графіки залежностей  $E \omega$ ,  $h^* \omega$ ,  $\text{Re } c^* \omega$  для трьох надмембранних камер, які відрізняються одна від одної значенням  $F_m$  або  $\alpha$ . При незмінній висоті надмембранної камери та ефективної площі мембрани, які обираються з умови досягнення максимального значення  $c_1$ , на величину  $\omega^*$  можна достатньо ефективно впливати, змінюючи значення  $\alpha$ . Збільшення значення  $\alpha$  у два рази майже у два рази збільшує і значення частоти, при якій відбувається максимальне розсіювання енергії коливання  $\omega^*$ .

Враховуючи ту обставину, що для досягнення великої пропускної спроможності РК доводиться приймати його власну частоту набагато вищою за частоту змушеного руху, вибір мінімального значення виявляється недоцільним. Наприклад, на рис. 2 в області частот від 22 до 230 1/с пропускна спроможність дроселя з  $\alpha = 0,004$  с/см<sup>2</sup> краще дроселя з  $\alpha = 0,002$  с/см<sup>2</sup>.

Характерно, що для камери з провідністю дроселя  $\alpha = 0,002$  с/см<sup>2</sup> зменшення значення  $F_m$  до величини 20 см<sup>2</sup> хоча й приводить до зменшення жорсткості  $c_1$  пневмопружини, однак, у діапазоні частот 50-230 1/с це сприяє збільшенню стійкості РК.

Власна частота коливань мембранного блока РК значною мірою визначається значеннями ємнісної і активної складових опору навантажувальної лінії РК. Тому дросель у надмембранній камері потрібно обирати, виходячи з аналізу передбачуваних умов функціонування РК, враховуючи наведені вище міркування.

**Список літератури:** 1. Крутиков Г. А., Кудрявцев А.І., Кисельников В.Б. Электросварка, 1977, вип. 44. 2. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М., Физматгиз, 1960.

Надійшла до редколегії 30.08.2010