

Г.А. Крутіков, канд. техн. наук, М.Г. Стрижак, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАТРОННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕТОДОМ КОРЕНЕВОГО ГОДОГРАФА

Стаття присвячена дослідженню мехатронних перетворювачів – редуційних клапанів з пропорційним електрокеруванням. За допомогою методу кореневого годографа виявляються шляхи одночасного досягнення стійкості та гарної пропускної спроможності редуційних клапанів за рахунок оптимально підібраних конструктивних параметрів.

Статья посвящена исследованию мехатронных преобразователей – редуционных клапанов с пропорциональным электроуправлением. С помощью метода корневого годографа выявляются пути одновременного достижения устойчивости и хорошей пропускной способности редуционных клапанов за счет оптимально подобранных конструктивных параметров.

G.A. KRUTIKOV, M.G. STRIZHAK

RESEARCH OF A MECHATRONIC CONVERTERS BY ROOT HODOGRAPH METHOD

The article deals with mechatronic transducers – pressure reducing valves with proportional electric management. Using the method of the root locus to identify ways the simultaneous achievement of sustainability and good bandwidth the pressure reducing valves at the expense of optimally selected design parameters.

Одним з найперспективніших напрямків у створенні сучасних мехатронних систем є розробка гібридних електропневматичних систем, в яких поєднуються необмежені функціональні можливості мікропроцесорного керування і екологічно чистого й дешевого пневмопривода в якості силової частини.

При створенні таких пристроїв доводиться вирішувати завдання одночасного досягнення високої швидкодії, стійкості і точності, що, як відомо з теорії автоматичного керування, є взаємовиключними вимогами. Для вирішення зазначених завдань необхідно проведення досліджень на ЕОМ з метою вибору найбільш раціональних конструктивних параметрів.

Розрахункова схема мехатронного перетворювача – електропневматичного редуційного клапана (РК) з пропорційним електрокеруванням наведена на рис. 1.

Редуційні клапани з електропневматичним керуванням мають значну пропускну спроможність, але вони схильні до автоколивальних режимів низької частоти і великої амплітуди (через невисоку жорсткість), що дуже негативно впливає на довговічність мембранно-клапанного вузла. Тому необхідний всебічний аналіз впливу конструктивних параметрів на перехідні характеристики клапана, який був проведений на основі лінеаризованих і перетворених за Лапласом рівнянь системи [2].

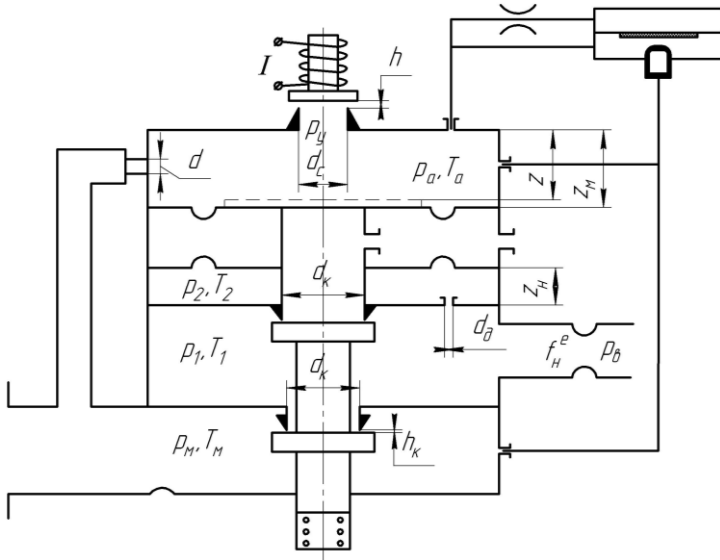


Рисунок 1 – Розрахункова схема РК з електрокеруванням

Лінеаризація проводиться методом малого параметра, тому будемо нехтувати (через малість) зміною температури в усіх полостях і прийнемо її рівною температурі оточуючого середовища. Крім того, вирази для вагової витрати спростимо у відповідності з рекомендаціями [1].

Математична модель РК наведеного на рис. 1:

$$\begin{cases}
 \frac{dp_1}{dt} = \frac{kRT_{10}}{W_0} \left[\mu_k \pi d_k h_k \sqrt{\frac{2}{RT_{10}}} \sqrt{p_1 p_m - p_1} - \alpha_1 p_1 - p_2 - f_n^e \sqrt{\frac{2}{RT_{10}}} \sqrt{p_b p_1 - p_b} \right]; \\
 \frac{dp_2}{dt} = \frac{kRT_{20}}{F_m \cdot z_h} \alpha_1 p_1 - p_2 - \frac{kp_2}{z_h} v; \\
 \frac{dp_a}{dt} = \frac{kRT_{a0}}{W_1 + h_{k0} F_m} \left[\mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{RT_{10}}} \sqrt{p_a p_m - p_a} - \right. \\
 \left. - \mu_c \pi d_c h \sqrt{\frac{2}{RT_{10}}} \sqrt{p_b p_a - p_b} \right] - \frac{kp_a}{z_m + h_{k0}} v; \\
 \frac{dh_k}{dt} = v; \\
 \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_s} [\psi p_m - p_1 + p_2 F_m + N_0 - p_a F_m - ch_k - fv].
 \end{cases} \quad (1)$$

Під час роботи в системі пневмопривода РК здійснює власні рухи тільки під дією збурення від перемикання розподільника Δp_b . Інші збурення (коливання тиску у мережі заводу, зміна тиску в робочій порожнині виконавчого механізму) він відпрацьовує як квазістатичні, здійснюючи при цьому лише вимушені коливання.

На рис. 2 наведений граф лінеаризованої системи рівнянь (1), який дає детальне зображення усіх зв'язків у системі.

Вирішимо цю систему відносно вершини Δp_1 при східчастому збуренні з боку вершини Δp_b . Отриману передавальну функцію приведемо до стандартної дробно-раціональної форми:

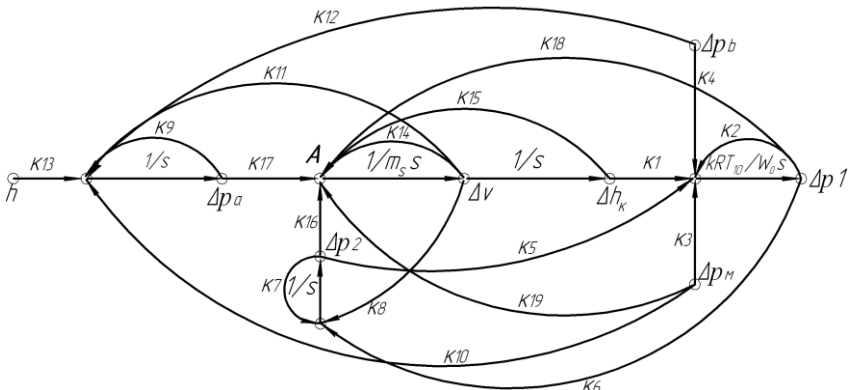


Рисунок 2 – Граф зв'язку лінійної моделі РК

$$\Phi_1 s = \frac{a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}{b_5 \cdot s^5 + b_4 \cdot s^4 + b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів $k_1 \div k_{17}$, $a_0 \div a_4$ і $b_0 \div b_5$ визначаються наступними виразами:

$$k_1 = \mu_\kappa \cdot \pi \cdot d_\kappa \cdot \sqrt{2/R \cdot T_{10}} P_{m0} \sqrt{i \cdot 1-i}; \quad k_5 = \alpha_1; \quad k_6 = \frac{kRT_{20}}{F_m \cdot z_h} \alpha_1; \quad k_8 = \frac{k \cdot p_{20}}{z_h};$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_\kappa \cdot \pi \cdot d_\kappa \cdot h_{k0} \cdot 1-2 \cdot i \cdot \sqrt{2/R \cdot T_{10}}}{\sqrt{i \cdot 1-i}} - \frac{1}{2} \frac{f_n^e \cdot i_n \sqrt{2/R \cdot T_{10}}}{\sqrt{i_n \cdot 1-i_n}} - \alpha_1;$$

$$k_3 = \frac{1}{2} \frac{\mu_\kappa \cdot \pi \cdot d_\kappa \cdot h_{k0} \cdot i \sqrt{2/R \cdot T_{10}}}{\sqrt{i \cdot 1-i}}; \quad k_4 = -\frac{1}{2} \frac{f_n^e \cdot 1-2 \cdot i_n \cdot \sqrt{2/R \cdot T_{10}}}{\sqrt{i_n \cdot 1-i_n}};$$

$$k_7 = \frac{kRT_{20}}{F_M \cdot z_h} \alpha_1 + \frac{k \cdot v_0}{z_h}; \quad k_9 = \frac{1}{8} \frac{k \cdot R \cdot T_{a0} \cdot \mu \cdot \pi \cdot d^2 \cdot 1 - 2 \cdot i_1 \sqrt{2/R \cdot T_{a0}}}{W_1 + h_{k0} \cdot F_M \sqrt{i_1} \sqrt{1 - i_1}} -$$

$$- \frac{1}{2} \frac{k \cdot R \cdot T_{a0} \cdot \mu_c \cdot \pi \cdot d_c \cdot h_0 \cdot i_2 \sqrt{2/R \cdot T_{a0}}}{W_1 + h_{k0} \cdot F_M \sqrt{i_2} \sqrt{1 - i_2}} - \frac{k \cdot v_0}{z_m + h_{k0}}; \quad k_{11} = -\frac{k \cdot p_{a0}}{z_m + h_{k0}};$$

$$k_{10} = \frac{1}{8} \frac{k \cdot R \cdot T_{a0} \cdot \mu \cdot \pi \cdot d^2 \cdot i_1 \sqrt{2/R \cdot T_{a0}}}{W_1 + h_{k0} \cdot F_M \sqrt{i_1} \sqrt{1 - i_1}}; \quad k_{14} = -f; \quad k_{15} = -c; \quad k_{16} = F_M;$$

$$k_{12} = -\frac{1}{2} \frac{k \cdot R \cdot T_{a0} \cdot \mu_c \cdot \pi \cdot d_c \cdot h_0 \cdot 1 - 2 \cdot i_2 \sqrt{2/R \cdot T_{a0}}}{W_1 + h_{k0} \cdot F_M \sqrt{i_2} \sqrt{1 - i_2}}; \quad k_{17} = -F_M; \quad k_{18} = -\psi;$$

$$k_{13} = -\frac{k \cdot R \cdot T_{a0} \cdot \mu_c \cdot \pi \cdot d_c \cdot \sqrt{2/R \cdot T_{a0}} \cdot p_{a0} \sqrt{i_2} \sqrt{1 - i_2}}{W_1 + h_{k0} \cdot F_M}; \quad k_{19} = \psi.$$

$$a_0 = k \cdot R \cdot T_{10} - k_4 \cdot k_7 \cdot k_9 \cdot k_{15} - k_1 \cdot k_7 \cdot k_{12} \cdot k_{17};$$

$$a_1 = k \cdot R \cdot T_{10} \cdot k_4 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot k_{16} + k_4 \cdot k_9 \cdot k_{15} + k_4 \cdot k_7 \cdot k_{15} + k_4 \cdot k_7 \cdot k_{11} \cdot k_{17} - k_4 \cdot k_7 \cdot k_9 \cdot k_{14} +$$

$$+ k_1 \cdot k_{12} \cdot k_{17}; \quad a_2 = k \cdot R \cdot T_{10} - k_4 \cdot k_8 \cdot k_{16} - k_4 \cdot k_{15} - k_4 \cdot k_{11} \cdot k_{17} + k_4 \cdot k_9 \cdot k_{14} +$$

$$+ m_s \cdot k_4 \cdot k_7 \cdot k_9 + k_4 \cdot k_7 \cdot k_{14}; \quad a_3 = k \cdot R \cdot T_{10} - m_s \cdot k_4 \cdot k_9 - k_4 \cdot k_{14} - m_s \cdot k_4 \cdot k_7;$$

$$a_4 = k \cdot R \cdot T_{10} \cdot m_s \cdot k_4; \quad b_0 = k \cdot R \cdot T_{10} \cdot k_2 \cdot k_7 \cdot k_9 \cdot k_{15} + k_1 \cdot k_6 \cdot k_9 \cdot k_{16};$$

$$b_1 = k \cdot R \cdot T_{10} \cdot k_2 \cdot k_7 \cdot k_9 \cdot k_{14} - k_2 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot k_{16} - k_2 \cdot k_9 \cdot k_{15} - \frac{W_0}{k \cdot R \cdot T_{10}} \cdot k_7 \cdot k_9 \cdot k_{15} -$$

$$- k_2 \cdot k_7 \cdot k_{15} - k_2 \cdot k_7 \cdot k_{11} \cdot k_{17} - k_1 \cdot k_6 \cdot k_{16}; \quad b_2 = W_0 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot k_{16} + k_9 \cdot k_{15} + k_7 \cdot k_{15} +$$

$$+ k_7 \cdot k_{11} \cdot k_{17} - k_7 \cdot k_9 \cdot k_{14} + k \cdot R \cdot T_{10} \cdot k_2 \cdot k_8 \cdot k_{16} + k_2 \cdot k_{15} + k_2 \cdot k_{11} \cdot k_{17} - k_2 \cdot k_9 \cdot k_{14} -$$

$$- m_s \cdot k_2 \cdot k_7 \cdot k_9 - k_2 \cdot k_7 \cdot k_{14}; \quad b_3 = W_0 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot k_{16} + k_9 \cdot k_{15} + k_7 \cdot k_{15} + k_7 \cdot k_{11} \cdot k_{17} -$$

$$- k_7 \cdot k_9 \cdot k_{14} + k \cdot R \cdot T_{10} \cdot k_2 \cdot k_8 \cdot k_{16} + k_2 \cdot k_{15} + k_2 \cdot k_{11} \cdot k_{17} - k_2 \cdot k_9 \cdot k_{14} - m_s \cdot k_2 \cdot k_7 \cdot k_9 -$$

$$- k_2 \cdot k_7 \cdot k_{14}; \quad b_4 = W_0 \cdot -m_s \cdot k_9 - k_{14} - m_s \cdot k_7 - k \cdot R \cdot T_{10} \cdot m_s \cdot k_2; \quad W_0 \cdot m_s = b_5;$$

де $i = \left(\frac{p_1}{p_m} \right)_0$; $i_n = \left(\frac{p_b}{p_1} \right)_0$; $i_1 = \left(\frac{p_a}{p_m} \right)_0$; $i_2 = \left(\frac{p_b}{p_a} \right)_0$; індекс "0" означає координати лінеаризації.

При надкритичному режимі течії на клапані ($i \leq 0,5$) або на навантажувальному дроселі ($i_n \leq 0,5$) приймаємо $i = 0,5$ або $i_n = 0,5$.

Задача дослідження впливу конструктивних параметрів клапана на його перехідні характеристики дуже раціонально і ефективно вирішується у пло-

щині комплексної частоти (s -площині) методом кореневого годографа [10, 71, 86]. Цей метод у цьому випадку кращий за частотні методи, адже останні не дозволяють у явній формі встановити зв'язок між частотною областю і областю часу [3].

Попередній аналіз графа системи дозволяє встановити ті конструктивні елементи, які визначають демпфуючі властивості клапана. Вузол А (рис. 2) – точка, де сумуються сили, прикладені до мембранно-клапанного блока. Складає в балансі сил, пропорційна швидкості переміщення клапана, залежить від впливів по трьом контурам:

$$\Delta SH_d = \left(k_{14} + \frac{k_{11} \cdot k_{17}}{k_9 + s} + \frac{k_8 \cdot k_{16}}{k_7 + s} \right) \Delta S. \quad (3)$$

Таким чином, сумарний коефіцієнт демпфування H_d залежить не тільки від коефіцієнта в'язкого тертя клапана, але також і від значень z_m , z_n , провідності дроселя підмембранної камери $\mu_0 f_0$, ефективної площі мембрани F .

Крім того, останні два члена у виразі (2) залежать від швидкості протікання процесів, адже знаходяться у функціональній залежності від оператора Лапласа s .

На рис. 3-5 наведені траєкторії домінуючих полюсів передавальної функції (2) при зміні деяких конструктивних розмірів клапана, а також перехідні процеси, побудовані для деяких характерних точок годографа. При побудові останніх використовувалася геометрична інтерпретація на s -площині формули розкладання Хевісайда [3]. Розрахунок траєкторій провадився на ЕОМ із застосуванням пакета прикладних програм "Matlab" [4].

Основні параметри розрахованого варіанта клапана наступні:

$$d_k = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad m = 0,079 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}, \quad f = 50 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \text{сек}, \quad c = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad \mu_0 = \mu = 0,8, \\ \mu_k = 0,9, \quad f_n^e = 0,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad p_m = 0,6 \text{ МПа}.$$

Траєкторії домінуючих полюсів при зміні діаметра дроселя у підмембранну камеру d_0 наведені на рис. 3. При цьому $z_m = 0,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $z_n = 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $F = 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $d_c = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Гілка I відповідає тиску налаштування $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$; гілка II – $0,35 \text{ МПа}$; гілка III – $0,5 \text{ МПа}$. $\rho = \frac{W_0}{W_k}$,

де $W_k = F \cdot z_n = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$.

При малих навантажувальних об'ємах ($\rho = 2$) дійсний полюс малорухомих, а комплексний має значну чутливість до варіації d_0 . При малих тисках налаштування і малих навантажувальних об'ємах дроселювання повітря, яке

надходить у підмембранну камеру, стає фактором, який стабілізує роботу клапана.

Ефект, який утворює дросель при малих значеннях W_0 , можна порівняти з ефектом від збільшення навантажувальної ємності. Наприклад, при $\rho = 2$ і $p_{10} = 0,2$ МПа клапан з $d_o = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м за частотою коливань і запасом

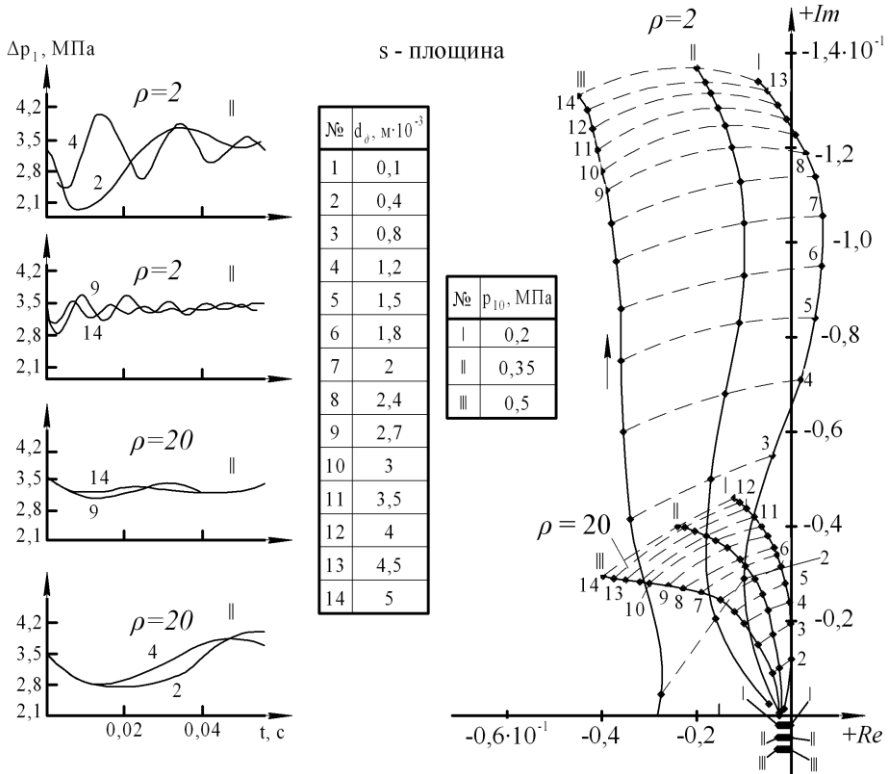


Рисунок 3 – Траекторії домінуючих полюсів при зміні діаметра дроселя у підмембранну камеру d_o

стійкості аналогічний клапану з $d_o = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м, але з $\rho = 20$. При великих навантажувальних об'ємах ($\rho = 20$) дроселювання повітря, яке надходить у підмембранну камеру не доцільно.

Траекторії домінуючих полюсів при варіації діаметра сопла d_c при $p_{10} = 0,35$ МПа наведені на рис. 4. Траекторії I-III відповідають $\rho = 2$, а IV-

VI - $\rho = 20$. Гілки I і IV отримані для $d_o = 1 \cdot 10^{-3}$ м, II і V - для $d_o = 2,7 \cdot 10^{-3}$ м, III і VI - для $d_o = 4,2 \cdot 10^{-3}$ м.

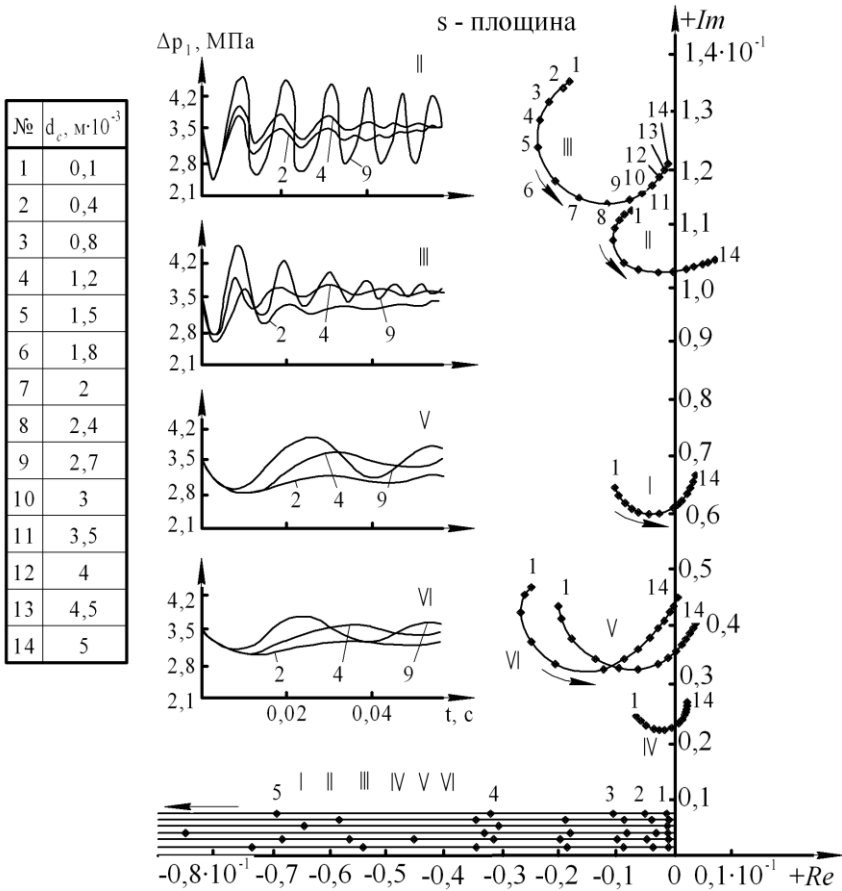


Рисунок 4 – Траєкторії домінуючих полюсів при зміні діаметра сопла d_c при різних значеннях W_0 і d_o

Рухливість комплексно-спряженого полюса невелика, але дійсний домінуючий полюс стає дуже чутливим до варіації цього параметра.

Коливальні складові обох перехідних процесів мало відрізняються одна від одної, однак показник затухання домінуючої експоненційної складової у другому випадку набагато вищий, ніж у першому. Ця складова впливає на пропускну здатність клапана. Якщо у другому випадку показник затухання коливальної і експоненційної складової однаковий, то у першому випадку в

момент затухання коливальної складової система має значний статизм, який погіршує пропускну спроможність клапана. Це особливо помітно на кривих перехідного процесу (рис. 4).

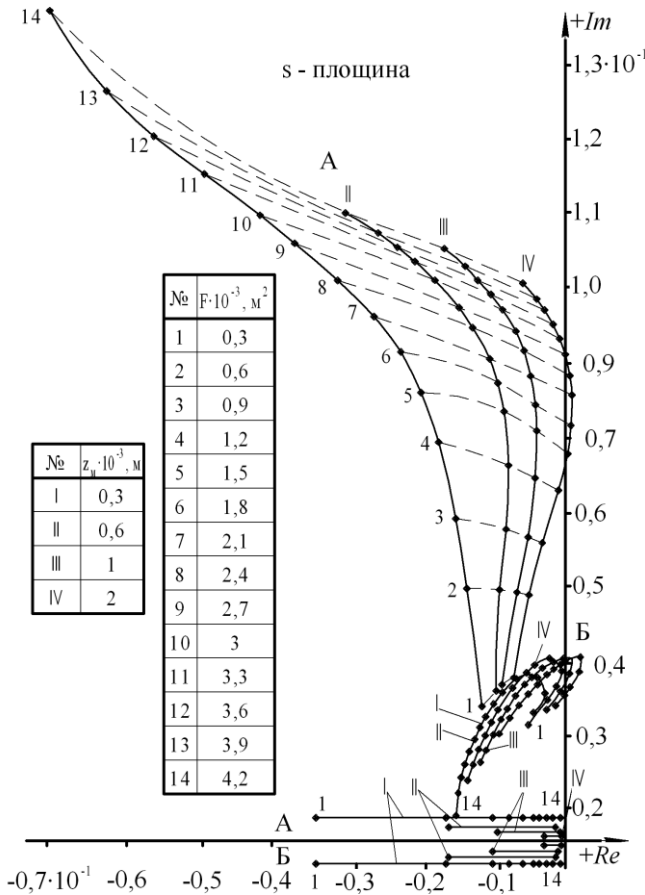


Рисунок 5 – Траекторії домінуючих полюсів при зміні ефективної площі мембрани та висоти надмембранної камери

Траекторії домінуючих полюсів при варіації ефективної площі і висоти надмембранної камери наведені на рис. 5. При цьому $d_c = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 2$, $z_n = 0,4 \cdot 10^{-2}$ м, $p_1 = 0,35$ Мпа.

Чутливість комплексно-спряженого полюса набагато вище при великому діаметрі дроселя зворотного зв'язку (А), ніж при меншому його значенні (Б).

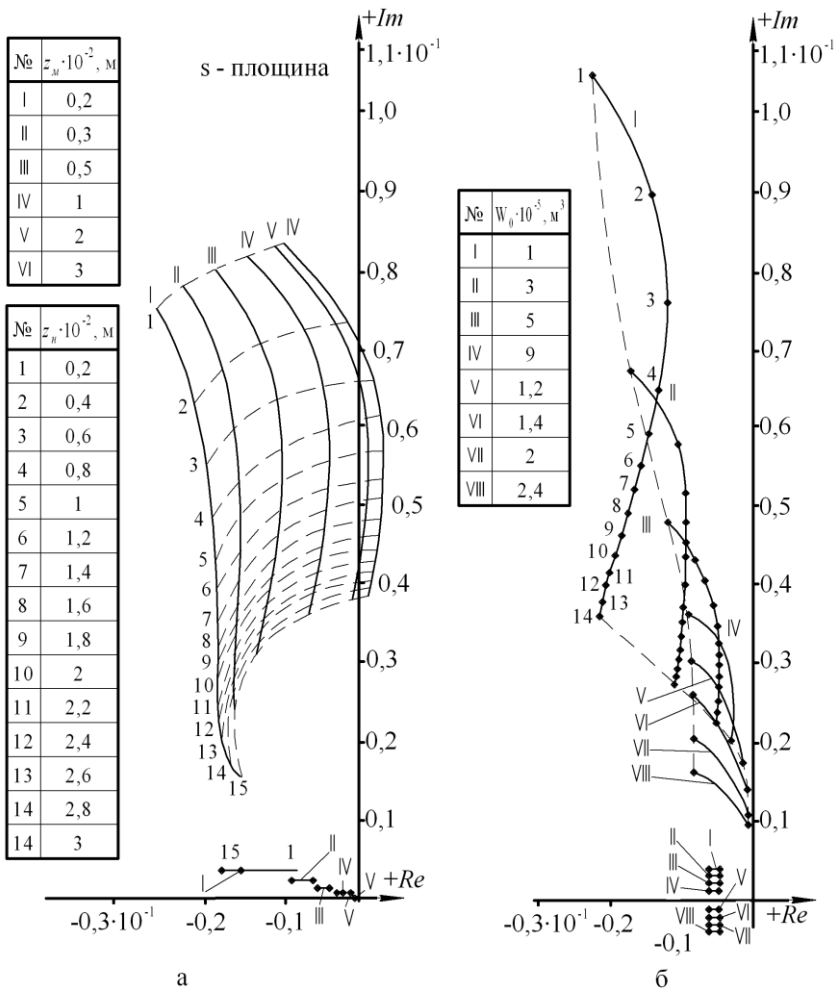


Рисунок 6 – Траекторії домінуючих полюсів при зміні висоти підмембранної камери при різній висоті надмембранної камери z_m та різних об'ємах навантаження W_0

При збільшенні ефективної площі з'являються дві протилежні тенденції у поведженні клапана: з одного боку, зростає коефіцієнт підсилення розімкненого контура регулювання, що призводить до погіршення стійкості; з іншого – збільшуються коефіцієнти k_{i6} і k_{i7} у приєднаних ланках демпфування (останні два члена у виразі (3)). Причому обидві тенденції можуть бути

підсилені або ослаблені в залежності від значень інших коефіцієнтів передач (тобто від значень d_c , d_o , z_m , z_n , W_0 та інших).

Суперечливий характер впливу ефективної площі мембрани особливо чітко видно при $d_o = 1 \cdot 10^{-3}$ м (Б) на рис. 5.

На рис. 6 а та б наведені траєкторії домінуючих полюсів при зміні висоти підмембранної камери z_n при різних значеннях висоти надмембранної камери а та різних значеннях навантажувального об'єму б.

При цьому $F = 0,15 \cdot 10^{-2}$ м², $d_c = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_o = 2,7 \cdot 10^{-3}$ м, $W_0 = 0,2 \cdot 10^{-4}$ м³ для а.

Вплив цього конструктивного розміра на стійкість також вельми суперечливий. Наприклад, при малих висотах надмембранної камери (гілки I-II) зі збільшенням z_n декремент затухання на радіан власної частоти збільшується.

При більших висотах надмембранної камери (гілки V-VI) збільшення z_n призводить до появи низькочастотних автоколивань. Аналогічно при малих навантажувальних об'ємах (рис. 6, б) збільшення z_n стабілізує роботу клапана, тоді як при великих об'ємах це призводить до погіршення стійкості.

Ці особливості функціонування пов'язані з тим, що фізичною основою досягнення стійкості для вказаних типів клапанів слугує перетворення енергії коливання мембранно-клапанного вузла в роботу стиснення, проваджувану над газом у підмембранній і надмембранній камерах, а також у внутрішню енергію газу, дросельованого через отвори у цих камерах.

Оптимальний вибір перерахованих вище параметрів із врахуванням умов експлуатації клапана дозволяє конструювати клапан, що має задовільну стійкість і гарну пропускну спроможність.

Список використаних джерел: 1. Герц Е.В., Каплунов С.М. Выбор регулятора давления для пневматического привода. – Механика машин, 1974. №46. С. 95–102. 2. Глушко А.В., Глушко В.П. Преобразование Лапласа. Свойства и применения: Пособие по спецкурсу. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2004. 3. Удерман Э.Г. Метод корневого годографа в теории автоматических систем. М.: Наука, 1972. 4. Чен К., Джиблин П., Ирвинг А. MATLAB в математических исследованиях: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001.

Надійшла до редколегії 06.04.2011

Bibliography (transliterated): 1. Gerc E.V., Kaplunov S.M. Vybora reguljatora davlenija dlja pnevmaticheskogo privoda. – Mehanika mashin, 1974. №46. S. 95–102. 2. Glushko A.V., Glushko V.P. Preobrazovanie Laplasya. Svoystva i primeneniya: Posobie po speckursu. - Voronezh: Izd-vo VGU, 2004. 3. Uderman Je.G. Metod kornevogo godografa v teorii avtomaticheskikh sistem. M.: Nauka, 1972. 4. Chen K., Dzhiblin P., Irving A. MATLAB v matematicheskikh issledovanijah: Per. s angl. – M.: Mir, 2001.