

АНАЛІЗ СТАТИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПНЕВМАТИЧНОГО РЕДУКЦІЙНОГО КЛАПАНА

В статті на основі використання сучасних методів теорії автоматичного управління (метод теорії графів, теорія інваріантних систем) пропонується новий метод значительного підвищення статичної точності системи «редукційний клапан – пілот управління».

Коли збурююча дія на редукційний клапан (РК) має плавний характер він здійснює тільки вимушену регулюючу дію. Особисті рухи клапана відсутні, адже в процесі руху РК не запасає кінетичної та потенційної енергії, обумовленої інерційністю клапанно-мембранного вузла та стискаємистію повітря в порожнинах РК. Це дозволяє виключити координату часу з рівнянь математичної моделі клапана (1), що перетворює їх в систему алгебраїчних рівнянь. Аргументом при цьому стає абсолютна величина збурюючої дії, а не час. Форма збурення в часі ролі не відіграє.

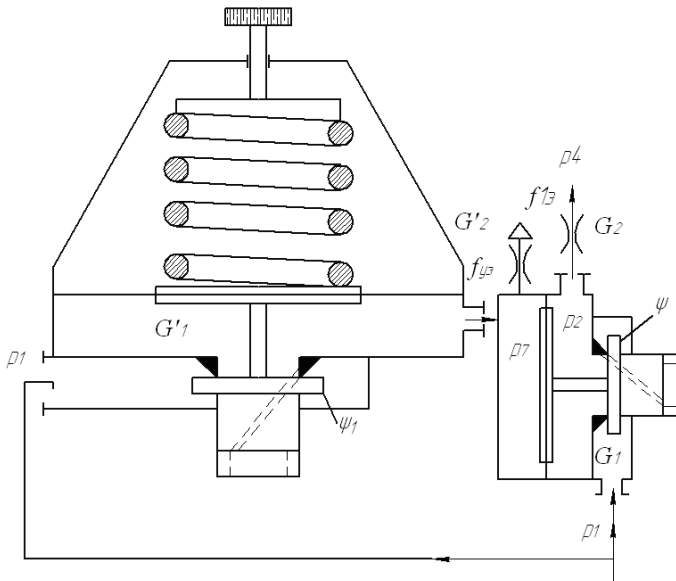


Рис. 1. – Розрахункова схема РК з пілотом керування

При дослідженні роботи РК з пневмокеруванням (рис. 1) необхідно враховувати помилку не тільки основного РК, а й пілота керування. Нелінійна математична модель системи на мал. 1 має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dp_2}{dt} &= \frac{kRT_{20}}{W} \left[\mu_1 \pi d_k (z_m - z) \sqrt{\frac{2g}{RT_{20}}} \sqrt{p_2 (p_1 - p_2)} - \alpha_1 (p_2 - p_3) - \right. \\
 &\left. - f_{31} \sqrt{\frac{2g}{RT_{20}}} \sqrt{p_4 (p_2 - p_4)} \right]; \\
 \frac{dp_3}{dt} &= \frac{kRT_{20}}{W_k} \alpha_1 (p_2 - p_3) - \frac{kp_3 F_M}{W_k} \frac{dz}{dt}; \\
 \frac{dp_3}{dt} &= \frac{kp_6}{(H_k + z_m - z)} \frac{dz}{dt} - \frac{kRT_{20} \alpha_2}{(H_k + z_m - z) F_M} (p_6 - p_7); \\
 \frac{d\gamma_1}{dt} &= V_1; \\
 \frac{dV_1}{dt} &= \frac{1}{m} (\psi (p_1 - p_2) + p_3 F_M + N_0 - p_6 F_M) - \frac{h}{m} V_1 + (z_m - z) \frac{c}{m}.
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Вираз для визначення тиску на виході основного регулятора отримаємо з рівнянь (1) при $\frac{dp_2}{dt} = \frac{dV_1}{dt} = V_1 = 0$, $p_2 = p_3$:

$$p_2 = \frac{p_7 F_M - N_0 - \psi (p_1 - p_2)}{F_M + \frac{Cf_{13}}{\mu_1 \pi d_k p_1} \frac{\varphi(p_2, p_4)}{\varphi(p_1, p_2)}}; \quad (2)$$

В рівнянні (2) аргументом є p_7 та p_1 . Для визначення p_7 запишемо рівняння статичного балансу вагових витрат та сил на клапанно-мембранному вузлі пілота керування (рис. 1). При цьому врахуємо особливості функціонування керуючого РК, пов'язані з тим, що він працює на глуху камеру:

1) витратне навантаження пілота визначається витоками, тобто можна розглядати течію повітря через кільцеву щілину клапана як плоско-паралельний ламінарний потік. Тоді вираз для визначення об'ємної витрати:

$$Q = \frac{\pi d_k l_1^3 \Delta p}{12 \mu_b b}; \quad (3)$$

Запишемо рівняння для вагової витрати через кільцевий зазор каналу, прийнявши питому вагу повітря рівною його питомій вазі при середньоарифметичному тискові до та після клапана:

$$G = \frac{\pi d_k l_1^3 (p_1^2 - p_7^2)}{24 \mu_b RT_0 b}; \quad (4)$$

2) дроселювання потоку повітря відбувається, коли сідло клапана знаходиться в контакті з ущільнюючим гумовим кільцем (рис. 2). При регулюванні потоку повітря виконується робота по подоланню сил

жорсткості пружин та по подоланню сил деформації гумового кільця (сили жорсткості в цьому випадку більші сил жорсткості пружин).

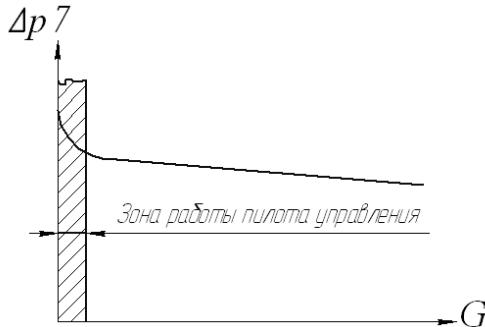


Рис. 2. Типова витратна характеристика РК

Модуль пружності гумового кільця дорівнює:

$$E = - \frac{W}{\Delta W} \Delta p = \frac{\pi d_k b e \Delta N}{\pi d_k b h \pi d_k b}, \quad (5)$$

де $\Delta N = \frac{\pi d_k b}{e} E h$ - зусилля деформації ущільнюючого кільця;

$c_{\Sigma} = c_1 + c_2 + \frac{\pi d_k b E}{e}$ - сумарна жорсткість пружних елементів редукційного клапана; h - величина зтиснення гумового кільця.

Враховуючи викладене, запишемо систему рівнянь, що дозволяє знайти значення функції p_2 при кожному значенні аргумента p_1 , що описує функціонування РК з пневмокеруванням при зміні тиску живлення, тобто статичну модель:

$$\left\{ \begin{aligned} p_2 &= \frac{p_7 F_m - N_0 - \Psi(p_1 - p_2)}{F_m + c f_{31} \Phi(p_2, p_4) / [\mu \pi d_k \Phi(p_1, p_2)]}; \\ p_7 &= \frac{N_{01}}{F_{m1}} - \frac{(p_1 - p_7)}{F_{m1}} \Psi_1 - \sqrt{\frac{f_{y3} 24 \mu_b b p_7 \sqrt{2kgRT_{20}}}{\pi d_{k1} \sqrt{k-1} (p_1^2 - p_7^2)} c_{\Sigma}}; \\ N_{01} &= (p_{10} - p_{70}) \Psi_1 + c_{\Sigma} \sqrt{\frac{f_{y3} 24 \mu_b b p_7 \sqrt{2kgRT_{20}}}{\pi d_{k1} \sqrt{k-1} (p_{10}^2 - p_{70}^2)}} + F_{m1} p_{70}; \\ p_{70} &= \left[\Psi(p_{10} - p_{20}) + N_0 + \frac{c f_{31} i_0 \Phi(p_{20}, p_{40})}{\mu \pi d_k \Phi(p_{10}, p_{20})} \right] / F_m + p_{20}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де $i_0 = \frac{P_{20}}{P_{10}}$; N_0 - зусилля попереднього підтискання підклапанної

пружини основного РК (звичайно $50 \div 80$ Н); N_{01} - зусилля зтискання пружних елементів пілота керування при налаштуванні.

Застосуємо до системи (6) принцип малого параметра та скористуємося принципом суперпозиції: до малих величин другого порядку помилка пристрою, що виникає від сукупної дії декількох первинних помилок, є лінійна функція помилок, обумовлених дією кожної первинної помилки окремо. Основою цього методу є заміна реальної нелінійної залежності помилки на виході пристрою від первинних помилок першими членами розкладення її в ряд Тейлора.

Первинними помилками для основного РК є коливання тиску p_1 та p_7 . Система рівнянь прийме вигляд:

$$\begin{cases} \Delta p_2 = k_3(k_2 \cdot \Delta l + k_4 \cdot \Delta p_1); \\ \Delta x = k_1(k_5 \cdot \Delta p_2 + k_6 \cdot \Delta p_1 + k_7 \cdot \Delta p_7); \\ \Delta p_7 = N_3(N_2 \cdot \Delta l_1 + N_4 \cdot \Delta p_1); \\ \Delta l = N_1(N_5 \cdot \Delta p_7 + N_6 \cdot \Delta p_1), \end{cases} \quad (7)$$

де $k_3 = \left(\frac{\partial G_2}{\partial p_2} - \frac{\partial G_1}{\partial p_2} \right)$ - коефіцієнт передачі об'єкту регулювання

(величина, зворотно-пропорційна фактору стійкості міждросельної камери); k_4, k_6, k_7 - коефіцієнти передач первинних помилок (коливань тиску в нагнітаючому тракті й коливання тиску в ланцюгу керування основного редукційного клапана); $k_1 \cdot k_2 \cdot k_5$ - коефіцієнт посилення регулятора.

Аналогічно можна трактувати й коефіцієнти пілота керування.

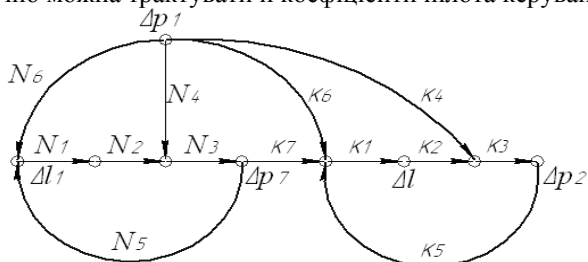


Рис. 3.- Граф статичної чутливості РК з пілотом керування

Застосувавши правило Мейсона, знайдемо зв'язок між вершинами Δp_2 та Δp_1 графа зв'язку статичної моделі РК з пілотом керування (рис. 3):

$$\int_{\Delta p_1}^{\Delta p_2} = \frac{(k_4 k_3 + k_1 k_2 k_3 k_6)(1 - N_1 N_2 N_3 N_6) + (N_3 N_4 - N_1 N_2 N_3 N_6) k_1 k_2 k_3 k_7}{1 - N_1 N_2 N_3 N_5 - k_1 k_2 k_3 k_5 + N_1 N_2 N_3 N_5 \cdot k_1 k_2 k_3 k_5}; \quad (8)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{F_m}{c}; \quad k_2 = \left(\frac{\partial G_1}{\partial l} \right)_0 = \mu \cdot \pi \cdot d_k \cdot p_1 \sqrt{i(i-1)}; \quad k_5 = -1; \quad k_7 = 1;$$

$$k_3 = \left(\frac{\partial G_2}{\partial p_2} - \frac{\partial G_1}{\partial p_2} \right)_0^{-1} = \frac{2\sqrt{i_n(1-i_n)} \cdot (1-i)}{f_{y3} \cdot i_n [(1-i) + (2i-1)(1-i_n)]};$$

$$k_6 = \pm \frac{\Psi}{F_m};$$

$$k_2 = \left(\frac{\partial G_1}{\partial p_1} \right)_0 = \frac{f_{y3} \cdot i}{2(i-1)} \sqrt{i_n(1-i_n)}; \quad N_5 = -1; \quad N_1 = \frac{F_{m1}}{c_2};$$

$$N_6 = \pm \frac{\Psi_1}{F_{m1}};$$

$$N_2 = \frac{\partial G'_1}{\partial l_1} = 3p_{10} \sqrt{\frac{\pi d_{k1} g f_{y3}^2 i^2 (1-i_1^2) i_{n1} (1-i_{n1}) p_{10}}{12\mu_b b (RT_{20})^2}}; \quad i_n = \frac{p_4}{p_2};$$

$$k_7 = 1;$$

$$N_3 = \frac{(1-i_{n1}^2) \sqrt{i_{n1}}}{f_{y3} \cdot \sqrt{\frac{g}{2RT_{20}}} (1-i_{n1}^2) \sqrt{1-i_{n1}} + i_1^2 \cdot i_{n1} \sqrt{1-i_{n1}}}; \quad i = \frac{p_2}{p_1}; \quad i_{n1} = \frac{p_a}{p_7};$$

$$N_4 = \frac{f_{y3} \cdot \sqrt{\frac{g}{2RT_{20}}} \cdot i \cdot \sqrt{i_{n1}(1-i_{n1})}}{(1-i_{n1}^2)}; \quad i_1 = \frac{p_7}{p_1}; \quad \int_{\Delta p_1}^{\Delta p_2} = \frac{dp_2}{dp_1} - \text{статична}$$

чутливість стабілізуемого параметра p_2 відносно p_1 .

При $i \leq 0.5$ або $i_n \leq 0.5$ в формулах замість i та i_n потрібно підставляти постійне число 0.5. Це розповсюджується й на i_{n1} .

Контури графа статичної чутливості (рис. 3) можна розділити на контури регулювання по відхиленню та контури регулювання по збуренню.

Якщо клапани редукційного клапана повністю розвантажені від дії тиску живлення (з графу чутливості видалено ребра k_6 та N_6), то отримаємо систему регулювання по відхиленню. Якщо дія тиску живлення спрямована в бік зачинення клапана, то за рахунок цього вводяться додаткові контури регулювання по збуренню. Тоді контур регулювання по збуренню може компенсувати статизм ланцюга керування частково або повністю.

Проаналізуємо структуру виразу (8). Граф статичної чутливості (рис. 3) має чотири прямі шляхи, що пов'язують вершини Δp_1 та Δp_2 , тобто є чотири канали, по яким первинна помилка впливає на вторинну. Обидва члени виразу (8) визначаються сумою помилок контурів регулювання по

відхиленню та по збуренню.

Отже, можна встановити три способи зниження статичної чутливості системи "РК – пілот керування":

1) одночасна взаємокомпенсація помилок контурів регулювання по збуренню для кожного РК. Мінімальна чутливість досягається при $k_3 \cdot k_4 \approx k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_6$ и $N_3 \cdot N_4 \approx N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot N_6$;

2) вибір таких параметрів РК та пілоту, щоб помилки основного РК та пілоту мали однакову величину й протилежний знак, тобто при $N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot N_6 + N_3 \cdot N_4 = k_3 \cdot k_4 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_6$;

3) виключивши контур регулювання по збуренню (повністю розвантаживши клапани) зменшити помилку контуру регулювання по відхиленню збільшивши знаменники $(1 - N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot N_5)$ та $(1 - k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5)$.

Розглянемо взаємний вплив помилок контуру регулювання по відхиленню (A) та контура регулювання по збуренню (B) на РК без врахування помилки пілоту керування. Статична чутливість такого РК:

$$\Delta p_2 = (A - B)\Delta p_1, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{k_3 k_4}{1 - k_1 k_2 k_3 k_5} = \frac{1}{\frac{(i - 1) + (2i - 1)(1 - i_n)}{i(1 - i_n)} + \frac{2F_m \mu_1 \pi d_k p_1 \sqrt{i(1 - i)}}{c f_{31} i \sqrt{i_n (1 - i_n)}}};$$

$$B = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_6}{1 - k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5} = \frac{1}{\frac{c \cdot f_{31} \cdot i_n [(1 - i) + (2i - 1)(1 - i_n)]}{2 \cdot \mu_1 \cdot \pi \cdot d_k \cdot p_1 \cdot \psi \sqrt{i(1 - i) \cdot i_n (1 - i_n)}} + \frac{F_m}{\psi}}.$$

Якщо для цієї точки характеристики $B > A$, то крива $p_2 = f(p_1)$ з падінням тиску живлення буде зростати, тобто $\Delta p_2 > 0$ при $\Delta p_1 < 0$. Зі зменшенням тиску живлення A збільшується, а B зменшується. Екстремум (максимум) функції $p_2 = f(p_1)$ досягається при $A + B = 0$.

Аналіз коефіцієнтів передач по кожному з контурів дозволяє зробити наступні висновки:

- коли помилка визначається контуром регулювання по збуренню, крутизна кривої $p_2 = f(p_1)$ збільшується зі зменшенням c , f_{31} та збільшенням d_k , p_1 та ψ ;

- коли помилка визначається контуром регулювання по відхиленню, тобто $A > B$, крутизна кривої збільшується зі збільшенням c , f_{31} та зменшенням p_1 та d_k .

Таким чином, вплив параметрів p_1 , d_k , c , f_{31} на статичну чутливість

РК може бути протиречним навіть у межах однієї й тієї ж кривої $p_2 = f(p_1)$. Для досягнення максимальної точності необхідна суворота відповідності величини ψ та величин c , $f_{\text{з1}}$, d_k та p_{10} .

На рис. 4 подані характеристики $p_2 = f(p_1)$, що ілюструють вплив величини дисбалансу на клапані ψ при різних тисках налаштування та витратах через клапан, отримані експериментальним та розрахунковим шляхами для пружинного РК БВ57-34 (пілота керування).

Вихідні дані для розрахунку: $F_m = 0.00182 \text{ м}^2$, $d_k = 0.016 \text{ м}$, $p_{10} = 0.7 \text{ МПа}$, $c = 2.18 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$. При експериментальному визначенні характеристик значення нерозвантаженої площі змінювались за рахунок змінних втулок-сідел. При малих витратних навантаженнях кращім є варіант Б, при великих - варіант В.

Таким чином, чим менше жорсткість пружин, витрата та тиск налаштування, чим більше діаметр клапану, тем менше повинен бути дисбаланс ψ на клапані. Тобто на клапані основного РК повинен бути мінімальний дисбаланс або він повинен бути розвантажений. Дисбаланс клапана пілота керування повинен бути збільшений через більшу жорсткість його клапанної системи й меншого діаметру клапану.

Другий спосіб зменшення статичної помилки розглянемо зважаючи на розрахункові результати. Основні параметри РК з пневмокеруванням: $d_k = d_{k1} = 0.016 \text{ м}$, $c = c_1 = 4.8 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$, $c_2 = 1.8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$, $F_m = F_{m1} = 0.002 \text{ м}^2$, $f_{\text{з1}} = 0.18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $f_{\text{з2}} = 0.18 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $E = 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, $B = 0.15 \cdot 10^{-2}$, $p_{10} = 0.6 \text{ МПа}$.

Серія характеристик на рисунках 5 – 10 ілюструє вплив співвідношень.

Вплив співвідношень параметрів ψ та ψ_1 на регулювальні характеристики РК з пневмокеруванням при різних конструктивних розмірах основного РК та пілота керування параметрів ψ та ψ_1 при різних конструктивних розмірах основного РК та пілота керування. Варіант 1 відповідає приведеним вище розмірам основного РК та пілота керування; у варіанту 2 $F_{m1} = 0.001 \text{ м}^2$; у варіанту 3 $b = 0.003 \text{ м}$, у варіантів 4 та 5 $F_m = 0.004 \text{ м}^2$, та у варіанту 5 $d_k = 0.008 \text{ м}$. Аналізуючи характер цих кривих, можна встановити, що при рівних значеннях F_m та F_{m1} система практично однаково чутлива до змін ψ та ψ_1 (крива 1 на рисунках 7 та 10, 6 та 8).

При зменшенні ефективної площі мембрани пілота керування збільшується чутливість системи до зміни нерозвантаженої площі клапана пілота ψ_1 (крива 2 на рисунках 7 та 10, 6 та 8), й зростає статизм контура регулювання по відхиленню пілота керування (порівняйте криві 1 та 2 на рис. 5, 9).

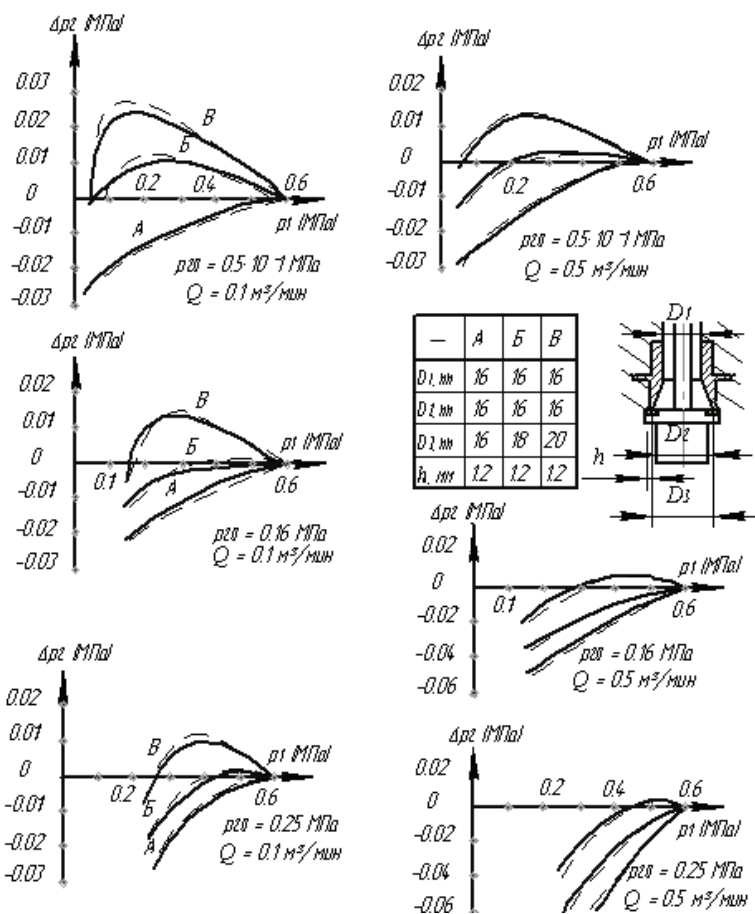


Рис. 4. Вплив величини нерозвантаженої площі клапана БВ57-34 на величину статичної помилки

При збільшенні виразу $F_m - F_{m1}$ за рахунок збільшення F_m ще більше збільшується чутливість системи до варіації ψ_1 й зменшується чутливість до варіації ψ (порівняйте криві 2 та 4 на рис. 7, 10 та 6, 8). При збільшенні жорсткості клапанно-мембранної системи пілота керування відбувається збільшення статизму контуру регулювання по відхиленню (крива 3 завжди йде нижче кривої 2) й зміщення екстремуму (там, де він є) вправо (рис. 5, 8). Крім того, у всіх випадках при цьому відбувається зменшення ділянки кривої, де її вигляд близький до лінійного, отже зменшується зона, где можлива повна взаємокомпенсація помилок. Порівняйте рис. 7 (крива 3) з рис. 9 (крива 4). Зменшення діаметру клапана пілота керування призводить до збільшення статизму контуру регулювання по відхиленню пілота керування (у всіх випадках крива 5 йде нижче кривої 4).

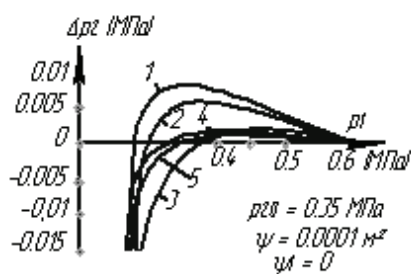


Рис. 5

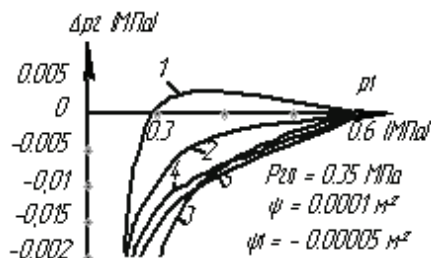


Рис. 6

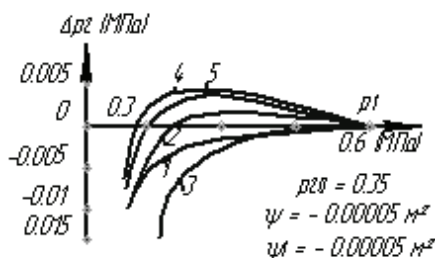


Рис. 7

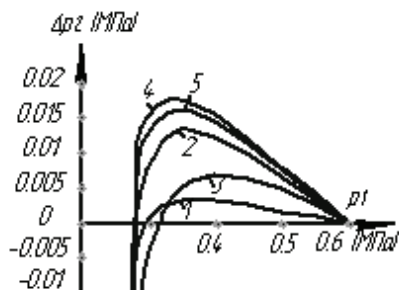


Рис. 8

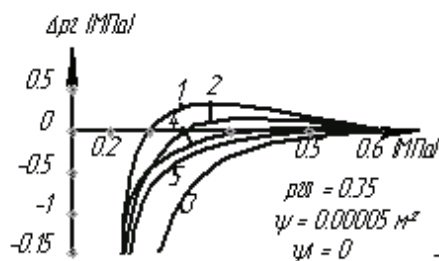


Рис. 9

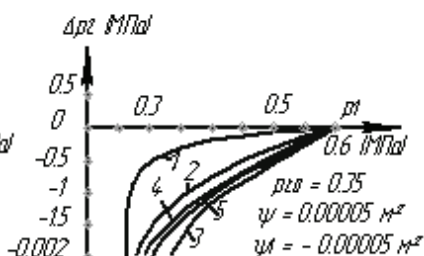


Рис. 10

Третій спосіб зменшення статичної чутливості РК, який згадувався вище, є найбільш розповсюдженим. Однак перші два способи зменшення статичної чутливості кращі, адже вони пов'язані з варіацією параметрів ψ та ψ_1 , які практично не впливають на динамічні характеристики РК.

Список літератури: 1. Дмитриев В. Н., Градецкий В. Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973, 368. 2. Добрынин Е. М., Пан Чжун-Чжен Вопросы динамической точности приборов автоматического контроля размеров. М.: Машгиз, 1963, 248. 3. Траксел Д. Д. Синтез систем автоматического регулирования. М.: Машгиз, 1955, 463.

Поступила в редколлегию 21.04.08