

Г.А. КРУТИКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків;
М.Г. СТРИЖАК, асп., НТУ «ХПІ», Харків.

ЛІНЕАРИЗАЦІЯ ЗВЕНА "ДРОСЕЛЬ – ГЛУХА КАМЕРА" ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ПРОПОРЦІЙНИМ ЕЛЕКТРОКЕРУВАННЯМ МЕТОДОМ ДОТИЧНИХ

Була здійснена заміна нелінійної ланки "квадратичний дросель – глуха камера" лінійним аналогом, при виконанні заміни реальної витратної характеристики цієї ланки не дотичною, а січною. Тоді залежність вагової витрати від перепаду тиску через дроселі підмембранної і надмембранної камер електропневматичного перетворювача стає лінійною.

Ключові слова: лінеаризація, дросель–глуха камера, витратна характеристика, хорда

Replacement of a nonlinear link "quadratic throttle – a deaf chamber" has been carried out by linear analog, at performance of replacement of a real throttling characteristic of this link not a tangent, and a secant. Then the dependence of the weight loss from a pressure drop through the throttles of a under-membrane and a over-membrane cameras electropneumatic converter is linear.

The key words: linearization, throttle – a deaf chamber, throttling characteristic, chord

Была осуществлена замена нелинейного звена "квадратичный дросель - глухая камера" линейным аналогом, при выполнении замены реальной расходной характеристики этого звена не касательной, а секущей. Тогда зависимость весового расхода от перепада давления через дросели подмембранной и надмембранной камер электропневматического преобразователя становится линейной.

Ключевые слова: линеаризация, дросель–глухая камера, расходная характеристика, хорда

На рис. 1 наведена розрахункова схема електропневматичного перетворювача (ЕП). Складність її дослідження полягає у тому, що на дроселі з діаметром d_0 може виникнути знакозмінна витрата, отже ланка "дросель – глуха камера" ЕП (рис. 2 а) має суттєво нелінійний характер, що унеможливорює лінеаризацію її шляхом заміни нелінійної характеристики першими членами розкладання в ряд Тейлора в околі рівноважної точки ($\Delta p = 0$).

Використання для розрахунків величини провідності (α), розрахованої за відомою формулою для ламінарного дроселя, дає велику похибку у випадку турбулентного режиму течії повітря у дроселях [1].

Проведені досліді свідчать про те, що відхилення витратної характеристики від лінійної має місце навіть при мінімальному діаметрі дроселя, що дорівнює 0,5 мм.

Метод гармонічної лінеаризації [2, 3] придатний лише для визначення частоти та амплітуди можливих автоколивань. Однак для практичного лінійного аналізу цього буває недостатньо і доводиться застосовувати метод заміни реальних витратних характеристик дроселя не дотичними, а січними (рис. 3, а). Однак кут нахилу такої січної доводиться підбирати, що вносить деяку помилку, особливо, якщо значення, обране для цього кута, буде неточним.

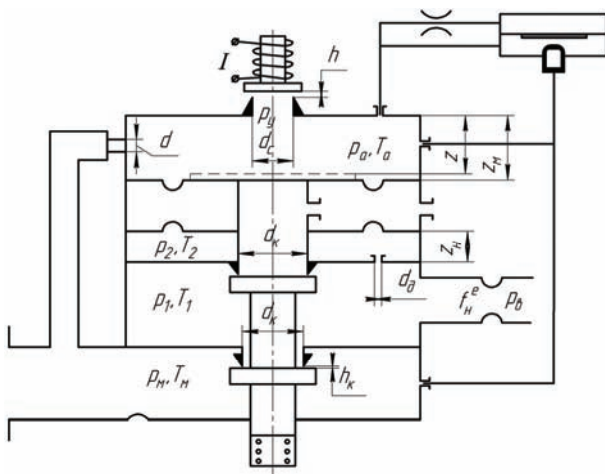


Рис. 1 Розрахункова схема ЕП з електрокеруванням

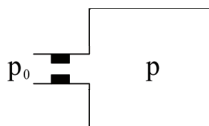


Рис. 2 Розрахункова схема ланки "дросель – глуха камера"

Будемо оцінювати точність апроксимації за допомогою кривих зміни тиску в камері при її заповненні через реальний дросель і його лінійний аналог. В якості критерія точності апроксимації береться лінійна інтегральна оцінка цих функцій, яка є функціоналом, що потребує мінімізації.

Лінійна модель ланки RC будується на двох припущеннях:

- 1) між перепадом тиску і ваговою витратою існує лінійний зв'язок;
- 2) процес заповнення камери вважаємо ізотермічним:

$$\alpha(p_0 - p) = \frac{W}{R \cdot T} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (1)$$

де α - провідність дроселя; W - об'єм камери; p_0, p - тиск перед дроселем і в камері; T - температура оточуючого середовища; R - газова постійна.

Рішення рівняння:

$$p = p_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \quad \tau = \frac{W}{R \cdot T \cdot \alpha}; \quad (2)$$

Нелінійна модель будується на основі рівняння теплового балансу глухої камери [4]:

$$k \cdot R \cdot T dA = W dP; \quad (3)$$

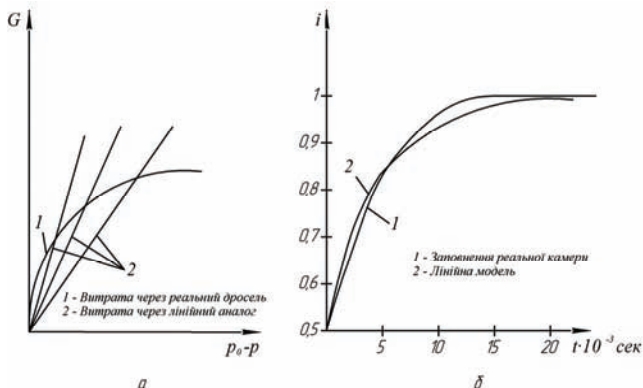


Рис. 3 Заміна реальних витратних характеристик дроселя січними (а) та лінерізація за допомогою кривих зміни тиску в камері при її заповненні (б)
де A - вагова кількість газу в камері; k - показник адіабати.

$$\mu \cdot f \cdot p_0 \cdot \sqrt{k \cdot g \cdot R \cdot T} \cdot i^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{k}{k-1} \left(1 - i^{\frac{k-1}{k}}\right)} = W \frac{dp}{dt}, \quad (4)$$

де $\mu \cdot f$ - ефективна площа дроселя.

Для докритичного режиму час заповнення камери з об'ємом W через дросель з перерізом $\mu \cdot f$ від $i_n = \left(\frac{p}{p_0}\right)_n$ до деякого значення i дорівнює:

$$t = \frac{2 \cdot W}{(k-1) \cdot \mu \cdot f \cdot R \cdot B \cdot \sqrt{T}} \left(D - \sqrt{1 - i^{\frac{k-1}{k}}} \right), \quad (5)$$

$$\text{де } B = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot k}{R \cdot (k-1)}}; \quad D = \sqrt{1 - i_n^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Це рівняння можна вирішити відносно i :

$$i = \left[1 - \left(D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (6)$$

де

$$\tau = \frac{2 \cdot W}{(k-1) \cdot \mu \cdot f \cdot R \cdot B \cdot \sqrt{T}};$$

або

$$p_0 - p = p_0 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\}. \quad (7)$$

Перетворимо рівняння (7), змінивши початок відрахунку з тим, щоб заповнення почалось з $i_n = \left(\frac{p}{p_0}\right)_n$:

$$p_0 - p = (1 - i_n) \cdot p_0 \cdot e^{-\frac{R \cdot T}{W} \alpha \cdot t} . \quad (8)$$

В якості лінійної інтегральної оцінки візьмемо вираз:

$$I = p_0 \int_0^{t_k} \left\{ 1 - \left[1 - \left(D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} dt - (1 - i_n) \cdot p_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{R \cdot T}{W} \alpha \cdot t} dt , \quad (9)$$

де t_k - час заповнення камери через реальний дросель.

$$t_k = \frac{2 \cdot W \cdot D}{(k-1) \cdot \mu \cdot f \cdot R \cdot B \cdot \sqrt{T}} ; \int_0^{\infty} e^{-\frac{R \cdot T}{W} \alpha \cdot t} dt = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{\frac{R \cdot T}{W} \alpha + s} = \frac{W}{R \cdot T \cdot \alpha} , \quad (10)$$

де s - оператор Лапласа.

Прийнявши $I = 0$, отримаємо значення α , яке мінімізує інтегральну оцінку:

$$\alpha = \frac{(1 - i_n) \cdot W}{R \cdot T \cdot \int_0^{t_k} \left\{ 1 - \left[1 - \left(D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} dt} . \quad (11)$$

Зробивши деякі перетворення виразу (11) і перейшовши до нової змінної, отримаємо:

$$\alpha = \frac{(1 - i) \cdot \frac{k-1}{2\sqrt{T}} \cdot B \cdot \mu \cdot f}{\int_0^{\varphi_n} \left\{ 1 - \left[1 - \varphi^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} d\varphi} , \quad (12)$$

$$\text{де } \varphi = \sqrt{1 - i^{\frac{k-1}{k}}} ; \varphi_n = \sqrt{1 - i_n^{\frac{k-1}{k}}} .$$

Отриманий вираз не залежить від величини ємності і лінійно пов'язаний зі значенням $\mu \cdot f$. На величину оптимального значення впливає значення i_n .

$$\alpha = \beta(i_n) \cdot \mu \cdot f ; \quad \beta = \frac{\frac{k-1}{2\sqrt{T}} \cdot B \cdot (1 - i_n)}{\int_0^{\varphi_n} \left\{ 1 - \left[1 - \varphi^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} d\varphi} ; \quad (13)$$

Значення $\beta(i_n)$ розраховувалося в пакеті прикладних програм "Matkad". Величина i_n варіювалася в межах від 0,53 до 0,99 з кроком 0,01. Отриманий результат наведений на рис. 4.

За отриманим з графіка значенням β був розрахований перехідний процес заповнення камери об'ємом $W = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ через дросель діаметром $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Той же процес був розрахований за нелінійними рівняннями. Обидві ці криві сполучені на рис. 3.б.

При наближенні i_n до одиниці α наближається до нескінченності й у цьому випадку, як вказано в роботі [3], дросель глухої камери не створює опору. Цей крайній, вироджений випадок, який повністю відповідає формальному підходу при використанні принципу малого параметра ($\Delta p = p_0 - p \rightarrow 0$), можливий лише у дуже вузькій області зникаюче малих збурень. Графік (рис. 4) допомагає розширити область застосування лінеаризованої моделі на скінченні збурення.

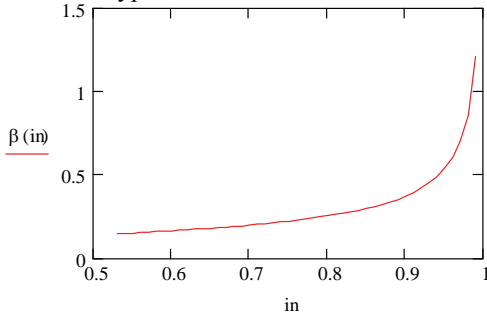


Рис. 4 Графік залежності β від відношення тисків $i_n = (p / p_0)_n$

Отримане рішення не може, звичайно, дати вичерпну відповідь на питання: як вибрати провідність дроселя лінійного аналога звена "квадратичний дросель – ємність" ЕП, який забезпечить найкраще співпадіння процесів у всьому діапазоні перепадів тисків на дроселі. Такого рішення, очевидно, й не може бути, оскільки перепад тисків на дроселі змінюється у широкому діапазоні при роботі ЕП у перехідному режимі. При лінійному аналізі, коли використовується принцип малого параметра, можна вважати, що навіть для найменших діаметрів дроселя i_n буде не менше 0,9.

Список літератури: 1. Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: АН СССР, 1961. 2. Попов Е. П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М.: Наука, 1973. 3. Залманзон Л. А. Об учёте влияния нелинейности характеристик глухих камер пневморегуляторов на процесс регулирования/ Автоматика и телемеханика, №5 1955. 4. Герц Е. В., Крейнин Г. В. Динамика пневматических приводов машин-автоматов. М.: Машиностроение, 1964.

Поступила в редколлегию 27.05.2011