ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: MECHANIKA z. 68 Nr kol. 664

Edward TOMASIAK

# WSPÓŁCZYNNIK STRAT W ZAWORACH HYDRAULICZNYCH

Streszczenie. Współczynnik strat w zaworach hydraulicznych zależy od zmian wektora prędkości i wraz ze zmieniającą się wartością przepływu przez zawór jest zmienny. Zmieniające się podczas pracy zaworów natężenie przepływu jest typowe dla regulatorów ciśnienia i przyjmowanie stałej wartości współczynnika strat jest teoretycznie nieuzasadnione. Spotykane w literaturze ujęcia zmienności współczynnika strat nie dają się wprost zastosować w badaniach teoretycznych, gdyż zmienność omawianego współczynnika w funkcji liczby Reynoldsa jest trudna do wykorzystania w podstawowej zależności na natężenie przepływu przez zawór. Autor podaje powiązanie zmienności współczynnika strat z otwarciem zaworu, dając tym samym możliwość powiązania przepływu w funkcji szczeliny, współczynnika strat oraz spadku ciśnienia.

## WPROWADZENIE

Współczynnik strat w zaworach hydraulicznych jest podstawową wielkością łączącą parametry przepływu, własności fizyko-chemiczne medium roboczego oraz wartość szczeliny przepływowej. Straty ciśnienia przy przepływie oleju przez zawór są bezpośrednio związane ze zmianą wektora prędkości. Podczas pracy zaworów hydraulicznych, będących regulatorami ciśnienia, przepływa zmienne natężenie strumienia, a zatem straty w zaworze są zmienne wraz ze zmianą wartości przepływu. Z teoretycznego punktu widzenia współczynnik strat jest funkcją liczby Reynoldsa, jednak brak jednoznacznego i prostego powiązania go z inną wielkością w zależności (1) utrudnia jego zastosowanie. W praktyce można spotkać pewne uproszczenia i przyjmowanie stałości współczynnika strat [2], [3], [4], [5].

Przyjęcie stałej wartości współczynnika strat może uwidocznić się w niestabilności modelu matematycznego i nieporównywalnością ilościową i jakościową przebiegu otwarcia zaworu [1]. Powyższe spostrzeżenie jest spowodowane niespełnianiem się zależności (1) przy wybranych warunkach początkowych rozwiązania teoretycznego [1].

Matematycznie omawiana zależność jest opisana równaniem:

$$Q = k_v\, k\, x \sqrt{\frac{2}{\varrho}} \sqrt{\Delta p}, \qquad (1)$$

gdzie:

$Q$ - objętościowe natężenie przepływu $[m^3/s]$

$\varrho$ - gęstość medium $[kg/m^3]$

$k_v$ - zastępczy współczynnik strat
$k$ - długość szczeliny przepływowej [m]
$x$ - wielkość otwarcia elementu ruchomego [m]
$\Delta p$ - spadek ciśnienia na zaworze [MPa].

Poprawne ujęcie teoretyczne przepływu przez zawór wymaga zatem wprowadzenia zmienności współczynnika strat w funkcji otwarcia $k_{v(x)}$. Ponieważ zależność (1) jest mało wygodna do stosowania ze względu na nieliniowość $k_v$, można zaproponować następujące ujęcie:

$$Q = k\, k_{v(x)} x \sqrt{\frac{2}{\varrho}} \sqrt{\Delta p} \tag{1a}$$

a dla prostoty zapisu $k_{v(x)} = k_v$.

W ujęciu analogowym wyrażenie $k_v x$ jest wzmacniaczem, w którym każdej wartości $x$ odpowiada ściśle określony sygnał wyjściowy realizowany generatorem funkcji nieliniowej.

## UJĘCIE LITERATUROWE WSPÓŁCZYNNIKA STRAT

W rozważaniach nad omawianym współczynnikiem strat można spotkać różne ujęcia, które czasami wymagają przeprowadzenia pomocniczych badań laboratoryjnych.
Według St.Acela [6] współczynnik strat został opisany zależnością:

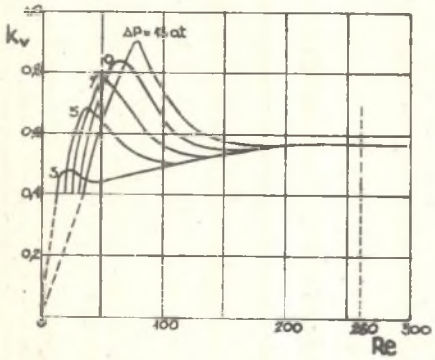
$$k_v = \left(C_v + \frac{\Delta p}{125}\right)^2 \sqrt{\frac{1}{0,1}} \tag{2}$$

dla olejów o lepkości 20 - 60 oSt, lub dla olejów o większej lepkości:

$$k_v = \left[\left(C_v' - \frac{\nu}{2.10^{-3}} + \frac{\Delta p}{125}\right]\right. \sqrt[12]{\frac{1}{0,1}} \tag{3}$$

gdzie:
$C_v$ i $C_v'$ - stałe przepływu rozpatrywanego zaworu wyznaczane doświadczalnie
$\nu$ - lepkość kinematyczna [$m^2/S$].

Blackburn [2] chociaż uzależnia zmienność współczynnika strat od liczby Reynoldsa (rys. 1), to jednak stosuje uproszczenie, przyjmując jego stałość przy spadkach ciśnień powyżej pewnej wielkości, która uzależniona jest od własności fizyko-chemicznych oleju i geometrii diafragmy. Takie podejście będzie słuszne dla pewnej wielkości przepływu, natomiast w przypadku przepływów mniejszych nieuzasadnione.




Rys. 1. Zależność współczynnika strat w zaworze od liczby Reynoldsa przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu

Weule [7] przytacza wyniki prac: Grossa, Zicka, Schlayera oraz Chochłowa, w których współczynnik strat jest funkcją liczby Reynoldsa. Ogólna postać tej zależności jest następująca:

$$k_v = a\sqrt{Re}, \qquad (4)$$

gdzie:

a - parametr zależny od typu szczeliny i jej krawędzi

Re - liczba Reynoldsa.

Rozgraniczone dwa obszary przepływu - laminarny z przejściowym oraz turbulentny - uwidaczniają zmienność współczynnika strat w funkcji liczby Reynoldsa dla zaworów dławiących [7].

Powyższą koncepcję współczynnika strat przyjął Reiner [8] i założył przybliżoną funkcję wykładniczą:

$$k_v = A(1 - e^{-B\sqrt{Re}}) \qquad (5)$$

dla:

$$0 < A \leqslant 1 \quad i \quad B > 0.$$

A i B są funkcjami szerokości gniazda stożkowego i kąta stożka zaworu. Na podstawie badań laboratoryjnych Reiner otrzymał następujące zależności:

$$A = 0{,}9857 - 0{,}0417\,\frac{s}{s_1} - 0{,}1967\,\frac{\sin\alpha}{\sin 45^\circ} \qquad (6)$$

$$B = 0{,}2413 - 0{,}044\,\frac{s}{s_1}, \qquad (7)$$

gdzie:

s - szerokość gniazda stożkowego [mm]

$s_1$ = 1 mm (szerokość odniesieniowa)

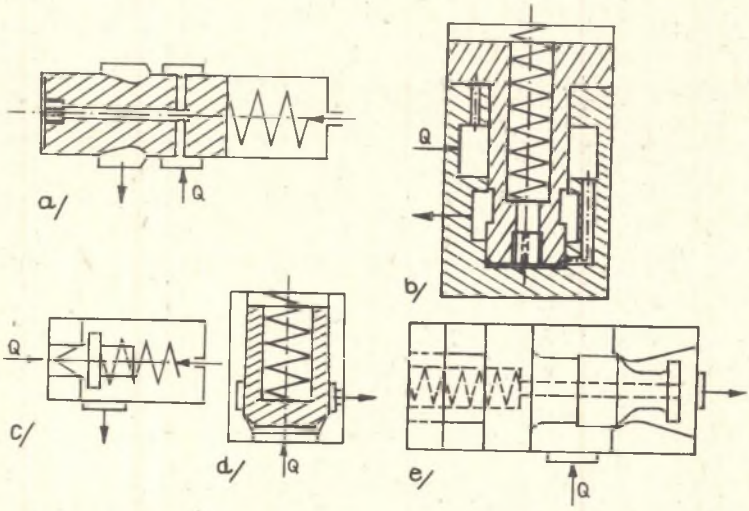
$\alpha$ - kąt stożka zaworu

$\alpha$ = 45° (kąt odniesieniowy).

## UJĘCIE PROBLEMU

Wprowadzenie omawianych według literatury zależności od (2) - (5) do ogólnych rozważań teoretycznych jest utrudnione, ponieważ współczynnik strat $k_v$ nie jest uzależniony wprost od wielkości otwarcia elementu ruchomego, lecz od liczby Reynoldsa. Podjęto więc próbę uzależnienia $k_v x = f(x)$, która będzie prostsza w zastosowaniu do badań teoretycznych zaworów. Badania laboratoryjne przeprowadzono dla zaworów UZPX-16, UZPP-16, DB-10, CT06 oraz pilota zaworu DB-10.

Rysunek 2 przedstawia w uproszczeniu pary "element ruchomy - gniazdo" powyższych zaworów.



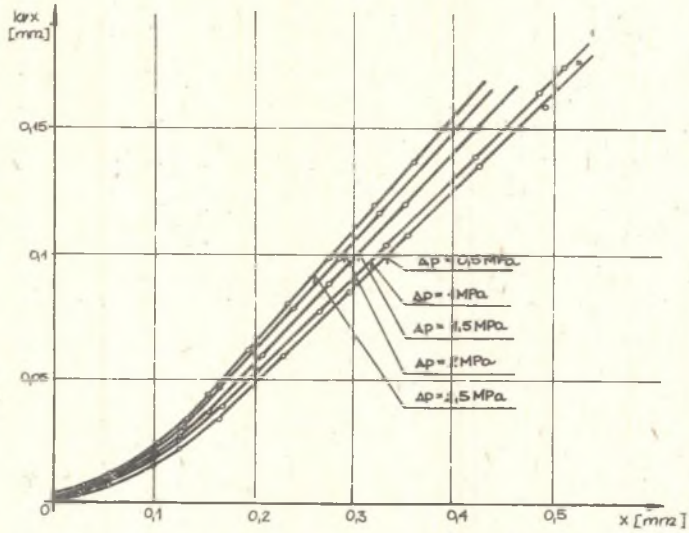

Rys. 2. Schematy ideowe zaworów hydraulicznych
a - UZPX-16, b - UZPP-16, c - pilot zaworu DB-10, d - DB-10, e - CT06

## WYNIKI BADAŃ

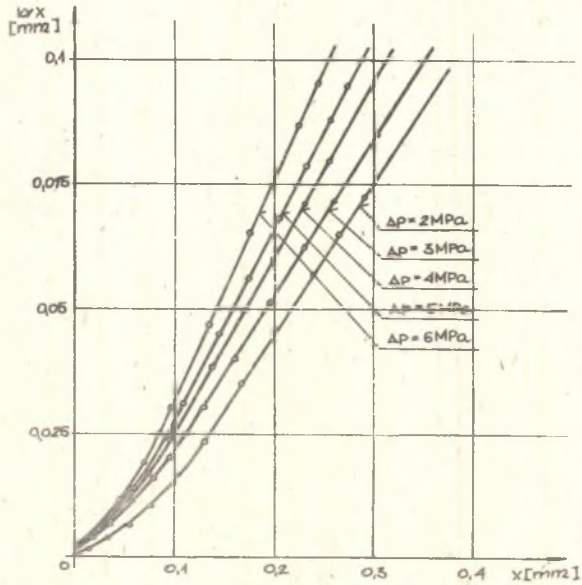
W oparciu o badania laboratoryjne, przeprowadzone na stanowisku badawczym opisanym w opracowaniu [9], wyznaczono zależności $k_v x = f(x)$ przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu roboczym. Uzyskane zależności przedstawiono na rys. 3,4,5,6 i 7.

Dla badanych zaworów przyjęto zależność zastępczego współczynnika strat w funkcji otwarcia jako wielomian trzeciego stopnia o postaci:

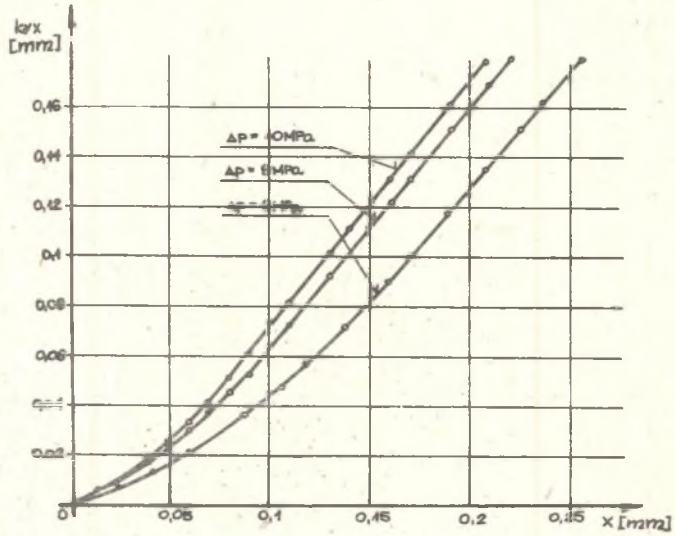
$$k_v x = A + Bx + Cx^2 + Dx^3. \tag{8}$$



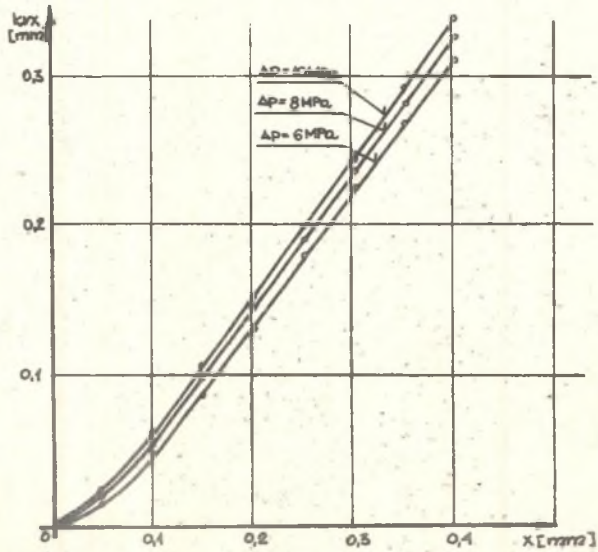

Rys. 3. Zależność $k_v x = f(x)$ dla zaworu UZPX-16 przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu



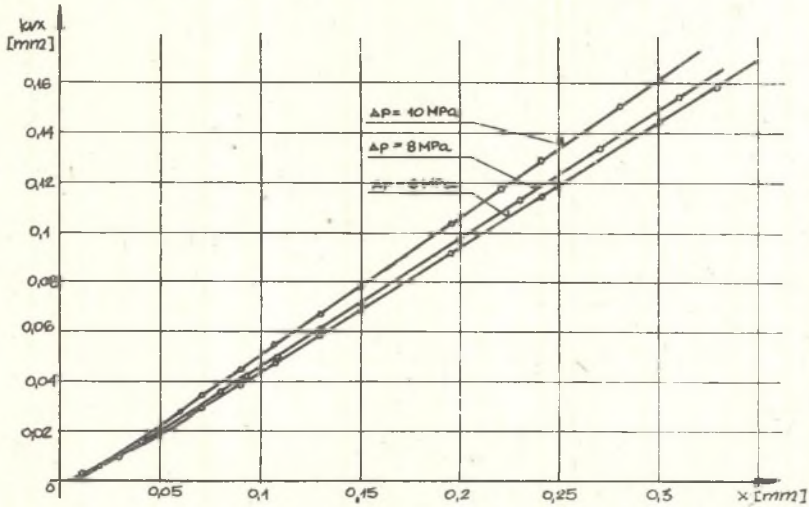

Rys. 4. Zależność $k_v x = f(x)$ dla pilota zaworu UZPP-16 przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu




Rys. 5. Zależność $k_v x = f(x)$ dla pilota zaworu DB-10 przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu




Rys. 6. Zależność $k_v x = f(x)$ dla zaworu DB-10 przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu




Rys. 7. Zależność $k_v x = f(x)$ dla zaworu CT06 przy parametrycznie zmiennym ciśnieniu

Współczynniki równania regresji (8) wyznaczono na maszynie cyfrowej, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. Dla poszczególnych badanych zaworów uogólniono wartości współczynników równania regresji, wprowadzając do nich czynną średnicę elementu ruchomego oraz spadek ciśnienia.

Uogólnione wartości współczynników wynoszą:

A = 0 - dla wszystkich zaworów

zawór UZPX-16

$$B = 1{,}784 \cdot 10^{-2} d_t - 21{,}23\,\Delta p + 6{,}254 \cdot 10^{-2} (\Delta p)^2$$

$$C = 9{,}224 \cdot 10^{-3} d_t + 1{,}083\,\Delta p - 20{,}65\,(\Delta p)^2 \qquad (9)$$

$$D = 2{,}331 \cdot 10^{-2} d_t - 0{,}1155\,\Delta p + 17{,}57\,(\Delta p)^2$$

zawór UZPP-16

$$B = 1{,}972 \cdot 10^{-2} d_t + 5{,}779 \cdot 10^{-2}\,\Delta p - 7{,}22 \cdot 10^{-3} (\Delta p)^2$$

$$C = 4{,}425 \cdot 10^{-2} d_t - 30{,}7\,\Delta p + 7.451 \cdot 10^{-2} (\Delta p)^2 \qquad (10)$$

$$D = 5{,}157 \cdot 10^{-2} d_t + 57{,}17\,\Delta p - 14{,}96 (\Delta p)^2$$

zawór CT06

$$B = -60{,}8405 \cdot 10^{-3} d_g - 336{,}993 \cdot 10^{-4} \Delta p - 47{,}168 \cdot 10^{-4} (\Delta p)^2$$

$$C = 269.2579 \cdot 10^{-4} d_g + 236{,}185 \cdot 10^{-4} \Delta p - 41{,}603 \cdot 10^{-4} (\Delta p)^2 \qquad (11)$$

$$D = -34{,}119 \cdot 10^{-3} d_g - 778{,}425 \cdot 10^{-4} \Delta p + 82{,}859 \cdot 10^{-4} (\Delta p)^2$$

zawór DB-10

$$B = -177{,}585 \cdot 10^{-4} d_g + 140{,}6191 \cdot 10^{-3} \Delta p - 76{,}2828 \cdot 10^{-4} (\Delta p)^2$$

$$C = -25{,}963 \cdot 10^{-2} d_g + 1845{,}5707 \cdot 10^{-3} \Delta p - 65{,}7083 \cdot 10^{-3} (\Delta p)^2 \qquad (12)$$

$$D = 1076{,}9221 \cdot 10^{-3} d_g - 5416{,}3995 \cdot 10^{-3} \Delta p + 145{,}9961 \cdot 10^{-3} (\Delta p)^2$$

Pilot DB-10

$$B = -608{,}405 \cdot 10^{-4} d_g - 336{,}993 \cdot 10^{-4} \Delta p + 60{,}089 \cdot 10^{-4} (\Delta p)^2$$

$$C = -5448{,}539 \cdot 10^{-4} d_g + 1627{,}5922 \cdot 10^{-3} \Delta p - 117{,}4111 \cdot 10^{-3} (\Delta p)^2 \qquad (13)$$

$$D = -587{,}1086 \cdot 10^{-3} d_g - 809{,}5563 \cdot 10^{-3} \Delta p + 714{,}137 \cdot 10^{-4} (\Delta p)^2$$

gdzie:

$d_t, d_g$ - czynna średnica tłoczka lub grzybka [mm]

$\Delta p$ - spadek ciśnienia na zaworze [MPa].

## WNIOSKI

Wyznaczone na podstawie badań zależności zastępczego współczynnika strat w funkcji otwarcia dają się w pełni wykorzystać w zależności opisującej przepływ przez zawór i mogą być stosowane w badaniach modelowych.

Inne zawory należy zaszeregować - na podstawie cech konstrukcyjnych, np. usytuowania krawędzi sterującej gniazda i elementu ruchomego - do znanych zaworów i przyjąć jako pierwsze przybliżenie uogólnione współczynniki równań regresji.

## LITERATURA

[1] TOMASIAK E.: Model matematyczny zaworu przelewowego w świetle badań przebiegów analogowych i rzeczywistych. Mechanika Teoretyczna i Stosowana, 4, 12 (1974).

[2] BLACKBURN J.F., REETHAF G., SHEARER S.L.: Fluid Power Control. Krausskopf - Verlag. Wiesbaden.

[3] GUILLON M.: Teoria i obliczanie układów hydraulicznych, WNT, Warszawa 1967.

[4] BASZTA T.M.: Hydraulika w budowie maszyn, WT Warszawa 1966.

[5] ХАИМОВИЧ Е.М.: Гидроприводы и гидроавтоматика станков. Машгиз, Москва 1959.

[6] ACEL St.: Statisches und dynamisches Verhalten von ölhydraulischen Steurungs - und Regelungelementen. Technische Rundschau, Heft 59,Bern 1963.

[7] WEULE H.: Eine Durchflussgleichung für den laminarturbulenten Strömungsbereich. Ö + P, nr 1, 1974.

[8] REINER G.: Einbeitrag zur Klärung des stationaren Verhalten von direktwirktenden Druckbegrenzungsventilen in hochdruckkreislaüfen der Bergwerksmaschinenhydraulik. Technische Hochschule Aachen, 1971.

[9] ТОМАСЯК Э.: Влияние конструкционных параметров на динамические характеристики гидравлических клапанов. III Конф. Гидравлика и пневматика. Казанлых 1979 Бульгария .

## КОЭФФИЦИНЕТ ПОТЕРЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КЛАПАНОВ

Р е з ю м е

Коэффициент потерь гидравлических клапанов зависит от изменения вектора скорости и вместе с изменяющейся величиной расхода изменяет своё значение. Изменяющаяся во время работы клапана величина расхода является типичной для регуляторов давления и принятие постоянного значения коэффициента потерь теоретически необосновано. Встречаемые в литературе интерпретации изменений коэффициента потерь непригодны для непосредственного применения к теоретическим исследованиям, так как изменения выше упомянутого коэффициента в функции числа Рейнольдца затрудняют применить его при определении основной величины, т.е. величины расхода в клапане. Автор дает характеристику взаимосвязи между изменениями коэффициента потерь в зависимости от величины проходной цели в клапане, создавая возможность обобщить зависимость между расходом в функции проходной цели, коэффициентом потерь и перепадом давлений.

## THE LOSS-FACTOR IN HYDRAULIC VALVES

S u m m a r y

The loss-factor in hydraulic valves depends on the velocity vector changes and alters with the flow velocity in the valve. The variable rate of flow is typical for the pressure regulators and assuming the loss-factor as a constant is theoretically injustified. Every presented in literature approach of loss-factors can not be directly used in theoretical studies as the variability of the factor in question as a function of Reynolds number to enter the fundamental equation of a flow-rast through the valve. The author gives the way of computing the flow-ratio changes at opening the valve enabling thus to evaluate the flow ratio as a function of gap, loss-factor nad the pressure fall.