

Włodzimierz OGULEWICZ

MODEL MATEMATYCZNY REGULATORA STAŁEGO PRZEPIYU

Streszczenie. Opracowano model matematyczny regulatora stałego przepływu. Podano parametry modelu uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych. Uzyskane wyniki badań, model regulatora i wyznaczone parametry wykorzystano w opracowanym programie obliczeniowym doboru cech konstrukcyjnych regulatora stałego przepływu.

MATHEMATICAL MODEL OF THE CONSTANT FLOW CONTROLLER

Summary. In paper a mathematical model of the constant flow controller was described and obtained model parameters were given. The parameters has been on basis of experimental investigations estimated. The controller model and obtained parameters were used in computer software pack for design computation of the constant flow controller.

MATHEMATISCHER MODELL EINES REGLERS MIT KONSTANTEM DURCHFLUß

Zusammenfassung. Im Aufsatz wurde ein mathematischer Modell eines Reglers mit konstantem Durchfluß besprochen und auch technische Daten, die aus experimentellen Untersuchungen dieses Reglers ermittelt worden sind. Modell des Reglers und sowie ermittelte und geschätzte Parameter fanden die Anwendung in einem vorbereitetem Computerprogramm, der zwecks Planungs- und Konstruktionsberechnungen des Reglers nach dem Prinzip konstanter Durchfluß, dienen werden konnte.

1. WSTĘP

W Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej rozwiązywane są między innymi zagadnienia związane z projektowaniem,

konstrukcją i badaniem prototypów regulatorów stałego przepływu. Regulatory stałego przepływu przeznaczone są głównie dla urządzeń chłodniczych z obiegiem pompowym, gdzie regulują ilość czynnika chłodniczego przepływającego przez parowniki.

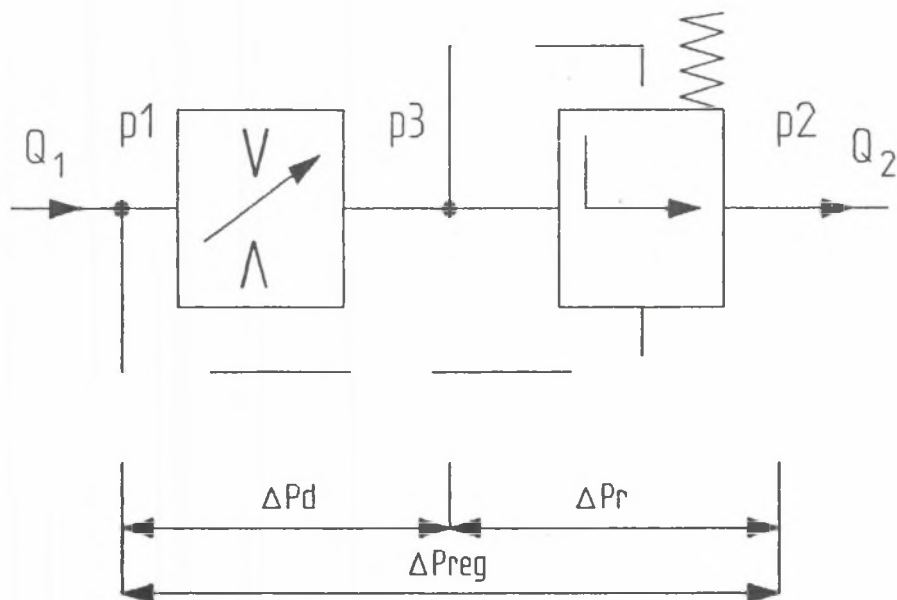
Regulator stałego przepływu jest regulatorem bezpośredniego działania i w napędach hydrostatycznych nazywany jest również dwudrogowym regulatorem przepływu [2]. Konstrukcja regulatora, sposób jego działania oraz wyniki badań doświadczalnych zostały omówione w pracach: [1, 3 – 8].

W artykule omówiono matematyczny model regulatora stałego przepływu oraz podano parametry modelu uzyskane na podstawie badań doświadczalnych.

Model regulatora i wyznaczone parametry modelu znalazły zastosowanie w opracowanym komputerowym programie obliczeń projektowo-konstrukcyjnych regulatorów stałego przepływu [8].

Schemat regulatora stałego przepływu przedstawia rys. 1.

Regulator składa się zasadniczo z nastawnego zaworu dławiącego i z zaworu różnicowego połączonych szeregowo. W wyniku wieloletnich badań stwierdzono, że zachodzi potrzeba projektowania regulatorów przepływu o wymaganych charakterystykach statycznych dostosowanych do konkretnego miejsca zabudowy regulatora w instalacji. Związane jest to z różnymi rodzajami stoso-



Rys. 1. Schemat graficzny regulatora stałego przepływu

Fig. 1. Diagram of constant flow controller

wanych parowników oraz z różną armaturą im towarzyszącą. Odpowiedni dobór geometrii szczelin przepływowych oraz sprężyn regulatora (przy zachowaniu tej samej konstrukcji korpusu) umożliwi indywidualizację parametrów regulatora w zależności od potrzeb. W celu określenia charakterystyk statycznych regulatorów, w zależności od geometrii szczelin przepływowych i stałych sprężyn, opracowano quasi-statyczny model matematyczny regulatora stałego przepływu.

2. QUASI-STATYCZNY MODEL REGULATORA STAŁEGO PRZEPŁYWU

Model bazuje na przedstawionych poniżej związkach.

2.1. Równanie przepływu zaworu dławiącego

Równanie przepływu zaworu dławiącego w postaci ogólnej dla szczeliny dławiącej dowolnego typu [2] dane jest zależnością:

$$Q_d = k_d \cdot f_d \cdot \Delta p_d^{n_d} \quad (1)$$

gdzie:

- Q_d – natężenie przepływu w szczelinie dławiącej,
- k_d – współczynnik przepływu,
- f_d – pole powierzchni szczeliny dławiącej,
- Δp_d – spadek ciśnienia na zaworze dławiącym,
- n_d – wykładnik potęgi uwzględniający przepływ przez rzeczywistą szczelinę.

Charakterystyki przepływowe rzeczywistych szczelin występujących w zaworach dławiących różnią się od charakterystyk dla kryzy ostrokrawędziowej. Różnice te uwzględnić można przyjmując wykładnik potęgowy z przedziału $1 > n > 1/2$.

W przypadku nastawnego zaworu dławiącego:

$$f_d = f_d(x) \quad (2)$$

gdzie:

- x – wartość zadana otwarcia zaworu dławiącego

2.2. Równanie przepływu zaworu różnicowego

Z uwagi na podobne wielkości szczelin przepływowych zaworu dławiącego i różnicowego oraz ogólność zależności (1) przyjęto dla zaworu różnicowego:

$$Q_r = k_r \cdot f_r \cdot \Delta p_r^{n_r} \quad (3)$$

gdzie:

- Q_r – natężenie przepływu w szczelinie różnicowej,
- k_r – współczynnik przepływu,
- f_r – pole powierzchni szczeliny różnicowej,
- Δp_r – spadek ciśnienia na zaworze różnicowym,
- n_r – wykładnik potęgi.

Wyniki pomiarów wskazują na równość wykładników potęg obu zaworów $n_r = n_d = n$.

W przypadku zaworu różnicowego

$$f_r = f_r(y) \quad (4)$$

gdzie:

y – położenie tłoczka zaworu różnicowego

oraz

$$k_r = k_r(f_d) \quad (5)$$

Zależność (5) określa wpływ stopnia otwarcia zaworu dławiącego na przepływ przez zawór różnicowy. Bliskie położenie obu zaworów powoduje widoczny wpływ zaworu dławiącego na pracę zaworu różnicowego.

2.3. Równanie równowagi sił zaworu różnicowego

Na tłoczek zaworu różnicowego działają następujące siły:

– siła sprężyny:

$$F_s = k_s (y + y_0) \quad (6)$$

gdzie:

- k_s - stała sprężyny,
- y_0 - ugięcie wstępne,
- y - położenie tłoczka zaworu różnicowego,

– siła pochodząca od ciśnień panujących przed i za zaworem dławiącym:

$$F_w = \Delta p_d \cdot A_r \quad (7)$$

gdzie:

- A_r - powierzchnia czołowa tłoczka zaworu różnicowego,
- Δp_d - spadek ciśnienia na zaworze dławiącym,

– siła ciężkości tłoczka:

$$F_g = m_r \cdot g \quad (8)$$

gdzie:

m_r – masa tłoczka,
 g – przyspieszenie ziemskie,

– siła hydrodynamiczna (pominięta w modelu z uwagi na minimalny wpływ):

$$F_h = \rho \cdot Q \cdot w = \frac{\rho \cdot Q^2}{A_r} \quad (9)$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu,
 Q – natężenie przepływu,
 w – prędkość płynu,
 A_r – powierzchnia czołowa tłoczka zaworu różnicowego.

Równanie **równowagi sił** przy uwzględnieniu powyższego wyraża się zależnością:

$$\Delta p_d \cdot A_r = k_s(y + y_0) + m_r \cdot g \pm F_t \quad (10)$$

gdzie:

F_t – siła tarcia.

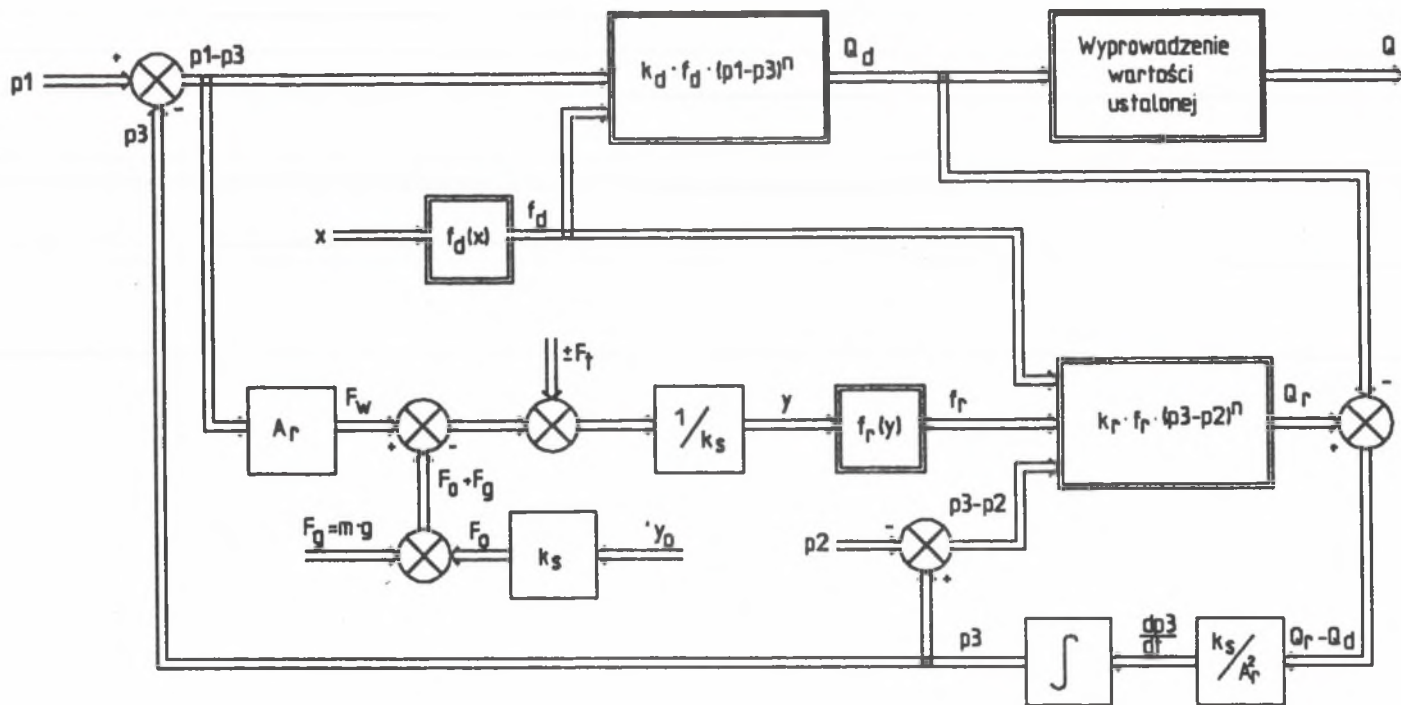
2.4. Równanie natężeń przepływu

Dla stanu ustalonego natężenie przepływu przez zawór dławiący regulatora – Q_d równa się natężeniu przepływu przez zawór różnicowy – Q_r , ($Q_d = Q_r = Q_{ust}$). Po zaistnieniu zaburzenia (zmiana przepływu Q_{ust1} na Q_{ust2}) istnieje chwilowa nierówność przepływów Q_d i Q_r spowodowana ruchem tłoczka zaworu różnicowego. Z uwagi na ruch tłoczka zaworu różnicowego zmienia się objętość przestrzeni V pomiędzy zaworami. Prowadzi to do zależności:

$$\Delta Q = Q_d - Q_r = \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

uwzględniając równanie (10) oraz fakt, że $V = A_r y$ otrzymujemy:

$$\Delta Q = \frac{k_s}{A_r^2} \frac{dp_3}{dt} \quad (12)$$



Rys. 2. Schemat blokowy modelu regulatora stałego przepływu

Fig. 2. Block diagram of constant flow controller model

gdzie:

p_3 – ciśnienie w przestrzeni między zaworami dławiącym i różnicowym.

Zależności (1), (3), (10) i (12) posłużyły do opracowania schematu blokowego modelu regulatora stałego przepływu przedstawionego na rys. 2.

3. PARAMETRY MODELU

Dane wejściowe do zaprojektowania regulatora stałego przepływu stanowi charakterystyka lub rodzina charakterystyk przepływowych regulatora $Q = f(p_1 - p_2)$ gdzie parametrem poszczególnych krzywych jest pole powierzchni szczeliny f_d zaworu dławiącego lub wielkość zadana otwarcia x , przy znanej charakterystyce otwarcia zaworu dławiącego $f_d = f_d(x)$. Danymi wyjściowymi natomiast są pola powierzchni szczelin przepływowych zaworu dławiącego f_d i różnicowego f_r oraz stała sprężyny k_s i pole powierzchni czołowej tłoczka zaworu różnicowego A_r .

Znajomość tych parametrów pozwala skonstruować regulator stałego przepływu o takim doborze wymiarów geometrycznych szczelin przepływowych zaworów, który zapewni uzyskanie żądanych charakterystyk.

W celu wyznaczenia funkcji $f_d = f(x)$ i $f_r = f(y)$ należy znać następujące wielkości:

- $n = n_d = n_r$ – wykładnik potęgi w równaniach (1) i (3),
- k_d – współczynnik przepływu w równaniu (1),
- k_r – współczynnik przepływu w równaniu (3),
- A_r – powierzchnie czołową tłoczka w równaniu (10),
- k_s – stałą sprężyny w równaniu (10),
- m_r – masę tłoczka zaworu różnicowego w równaniu (10),
- F_t – siłę tarcia w równaniu (10),
- y_0 – ugięcie wstępne sprężyny w równaniu (10).

Parametry A_r , k_s , m_r , y_0 – dobiera się podczas projektowania regulatora, natomiast parametry k_d , k_r , n , F_t należy uznać jako stałe dla danej klasy regulatorów stałego przepływu.

Wyznaczenia parametrów modelu k_r , k_d oraz n dokonano na podstawie pomiarów. Wychodząc z zależności (1) i (3) otrzymujemy po zlogarytmowaniu:

$$\lg w_d = \lg \frac{Q_d}{f_d} = \lg k_d + n_d \lg (\Delta p_d) \quad (13)$$

$$\lg w_r = \lg \frac{Q_r}{f_r} = \lg k_r + n_r \lg (\Delta p_r) \quad (14)$$

Są to równania prostych, w których współczynnik kierunkowy określa wykładnik potęgi n , a wyrazy wolne są poszukiwanymi parametrami k_d i k_r .

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że regulator stałego przepływu cechuje się wyraźną histerezą mechaniczną. Wprowadzony parametr F_t – siła tarcia – ma na razie znaczenie bardziej jakościowe, niż ilościowe. Zmierzona i wprowadzona do modelu średnia wartość siły tarcia będzie miała większe znaczenie dla konstruktora po przeprowadzeniu badań uzupełniających, uwzględniających wpływ rodzaju pasowania, tolerancji współosiowości i klasy gładkości powierzchni elementów przemieszczających się względem siebie na jej wartość.

3.1. Wyznaczenie współczynników k_d i n_d

Na podstawie danych pomiarowych wyznaczono parametry k_d i n_d jako współczynniki regresji liniowej zależności (13), otrzymując bezpośrednio wartości:

$$n_d = 0,6751 \pm 0,0014$$

$$k_d = 0,005948 \pm 0,000028$$

Maksymalna niepewność aproksymacji pomiarów prędkości w_d w szczelinie przepływowej zaworu dławiącego zależnością $w_d = k_d \cdot (p_d)^{n_d}$ nie przekracza $\pm 2\%$.

3.2. Wyznaczanie współczynników k_r i n_r

Wykorzystując zależność (14) obliczono współczynniki regresji liniowej dla zadanych wartości otwarcia zaworu dławiącego. Graficznym przedstawieniem zależności (3) we współrzędnych logarytmicznych jest rodzina prostych równoległych. Na podstawie danych pomiarowych stwierdzono, że wykładnik potęgi n_r jest wielkością stałą względem zmian otwarcia zaworu dławiącego i wynosi:

$$n_r = 0,6746 \pm 0,0011$$

Wartości wyznaczonych współczynników n_d i n_r są zbliżone do siebie, a przedziały niepewności ich wyznaczenia zachodzą na siebie. Przyjęto więc jedną wspólną dla obu zaworów wartość wykładnika n , będącą średnią ważoną współczynników n_d i n_r :

$$n = n_d = n_r = 0,6749 \pm 0,0013$$

Z danych pomiarowych wynika równocześnie, że współczynnik przepływu k_r jest funkcją otwarcia zaworu dławiącego. Jest to spowodowane bliskim położeniem obu zaworów. Zaburzenia wywołane przez zawór dławiący wpływają na

pracę zaworu różnicowego. Oddziaływanie to jest tym mniejsze, im większa jest szczelina przepływowa zaworu dławiącego. Wartość współczynnika k_r maleje ze wzrostem pola szczeliny przepływowej zaworu dławiącego. Założono, że ze wzrostem szczeliny zaworu dławiącego współczynnik k_r asymptotycznie zdąża do wartości współczynnika k_d . Funkcję $k_r = f(f_d)$ aproksymowano zależnością:

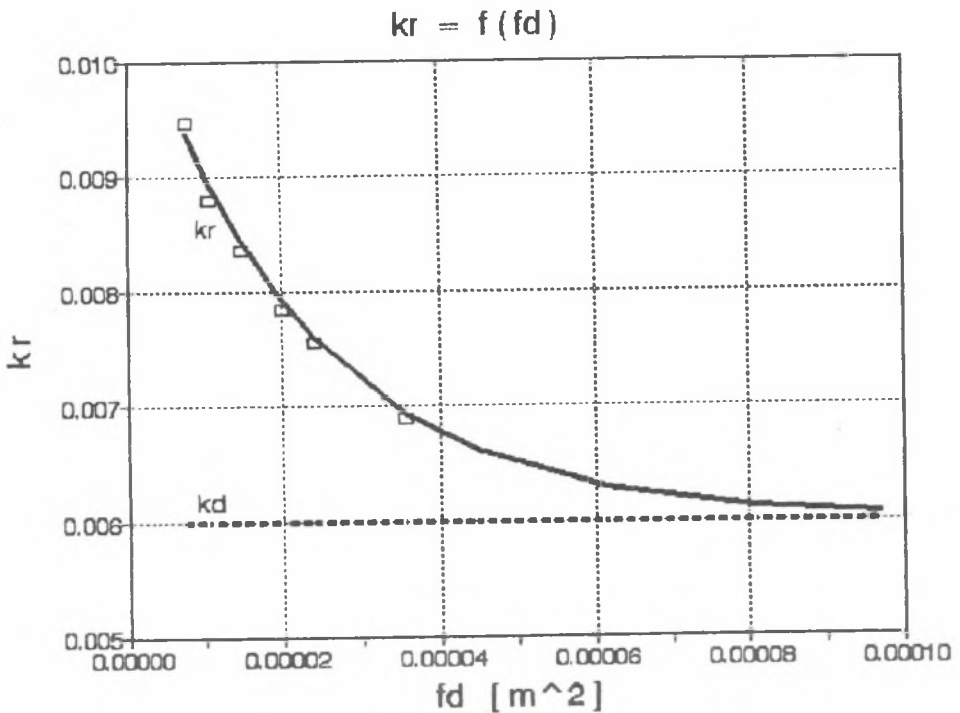
$$k_r = k_d + B_r \cdot e^{-C_r \cdot f_d} \quad (15)$$

gdzie:

$$B_r = 0,00482 \pm 0,00028$$

$$C_r = 46000 \pm 1100$$

Ilustracją zależność zmian współczynnika k_r w funkcji pola szczeliny przepływowej zaworu dławiącego f_d jest rys. 3.



Rys. 3. Współczynniki przepływu k_d i k_r regulatora

Fig. 3. Flow coefficients k_d , k_r of constant flow controller

Maksymalna niepewność aproksymacji pomiarów prędkości w_r w szczelinie przepływowej zaworu różnicowego wyrażona zależnością $w_r = k_r \cdot (p_r)^n$ również nie przekracza $\pm 2\%$.

Tak wyznaczone parametry modelu matematycznego regulatora stanowią (po uwzględnieniu rodzaju cieczy przepływającej przez regulator) dane wejściowe do programu obliczającego parametry konstrukcyjne regulatorów stałego przepływu.

4. UWAGI KOŃCOWE

Na bazie przedstawionego modelu matematycznego regulatora stałego przepływu i wyznaczonych parametrów tego modelu opracowano algorytm obliczeń służących do projektowania przyszłych konstrukcji regulatorów tego typu. Algorytm obliczeń w postaci arkusza kalkulacyjnego programu QUATRO PRO 2.0, uwzględniający miejsce zabudowy regulatora w instalacji i zadaną charakterystykę przepływu, upraszcza projektowanie i konstruowanie regulatorów eliminując kosztowne i pracochłonne badania modeli fizycznych.

Wydaje się, że niekonwencjonalne równanie przepływu z wykładnikiem potęgowym większym niż 0,5, mimo kształtu szczeliny klasyfikowanej do grupy „kryza ostrokrawędziowa”, znajdzie szersze zastosowanie przy opisie przepływów przez szczeliny zaworowe regulatorów.

LITERATURA

- [1] Rozwój maszyn i urządzeń chłodniczych w badaniach teoretycznych i eksperymentalnych. Praca zbiorowa, t. 1 i 2, Pol. Krak. Kraków 1991.
- [2] Stryczek S.: Napęd hydrostatyczny. WNT, Warszawa 1984.
- [3] Bartnik R., Kopeć St., Ogulewicz W., Około-Kułąk J.: Opracowanie konstrukcji i przeprowadzenie badań prototypu zaworu stałego przepływu czynnika chłodniczego (NH_3) przeznaczonego do urządzeń chłodniczych z obiegiem pompowym – praca NB-252, Gliwice 1986 ÷ 1990 t. 1–5.
- [4] Ogulewicz W., Około-Kułąk J.: Badania, identyfikacja i automatyczna regulacja procesów ciepło-przepływowych w urządzeniach stosowanych w chłodnictwie – praca BK-372, Gliwice 1991 ÷ 1992, t. 1, 2.
- [5] Automatic flow regulator for ammonia liquid recirculation systems – Bulletin 41-10, may 1971 – Refrigerating Specialties Company – Illinois.
- [6] Refrigerant feed control and systems. Patent No 3449923 – June 1969 United States Patent Office.

- [7] Magdziak G., Wilczyński A.: Opracowanie konstrukcyjno-technologiczne oraz badania laboratoryjne nowego typu zaworu ARP-15 – praca dyplomowa – Politechnika Krakowska.
- [8] Ogulewicz W.: Matematyczny model regulatora stałego przepływu – praca doktorska – Politechnika Śląska
- [9] Szolc T.: Chłodnictwo. WSiP, Warszawa 1970.
- [10] Leszczyński H.: Aparatura i urządzenia chłodnicze. WSiP, Warszawa.
- [11] Wesołowski A., Dworski F.: Automatyzacja urządzeń chłodniczych. WNT, Warszawa 1984.
- [12] Kurs obsługi programu komputerowego „Quattro Pro 2.0” – praca zbiorowa. Warszawa 1991.
- [13] Poradnik chłodnictwa – praca zbiorowa WNT, Warszawa 1965.

Abstract

In paper a mathematical model of the constant flow controller was described and obtained model parameters were given. The parameters has been on basis of experimental investigations estimated. The controller model and obtained parameters were used in computer software pack for design computation of the constant flow controller. The controller consist of adjustable throttle valve and an differential valve linked serial. In practical application is demand for the constant flow controller having the static characteristics adapted to a mounting place. From measuring was observed that constant flow controller has an histeresis.