

Paweł GLEŃ

BADANIA SYMULACYJNE MODERNIZOWANEGO REGULATORA PRZEPIYU 2FRM-16

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które umożliwiły modernizację nowego regulatora przepływu typu 2FRM-16-22/100LB. Badania polegały na opisie matematycznym modelu regulatora, wprowadzaniu zmiennych parametrów oraz analizie na podstawie uzyskanych charakterystyk. Efektem badań eksperymentalnych był poprawnie odwzorowujący pracę regulatora model komputerowy.

Słowa kluczowe: regulator przepływu, model komputerowy, badania symulacyjne.

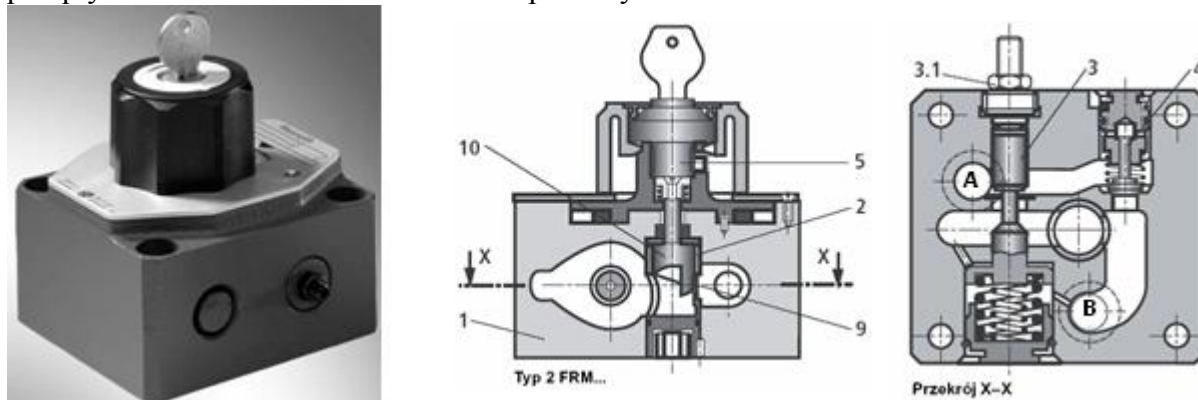
1. WPROWADZENIE

Modele regulatorów przepływu 2FRM-16 przeznaczone są do stabilizowania niewielkich natężeń przepływu, które w zależności od charakteru pracy mogą dochodzić do $160 \text{ dm}^3/\text{min}$ przy ciśnieniu roboczym 31,5 MPa. Celem badań było opracowanie modelu matematycznego modernizowanego regulatora przepływu 2FRM-16. Następnie na jego podstawie należało utworzyć model komputerowy i zamodelować przebiegi zaworu w celu zoptymalizowania parametrów konstrukcyjnych regulatora przepływu. Kolejnym etapem było przeprowadzenie symulacji komputerowych, dzięki którym było możliwe uzyskanie wymaganych charakterystyk statycznych. Ostatnim etapem była modyfikacja modelu komputerowego w taki sposób, aby przy danych założeniach realizował on funkcje zmodernizowanego regulatora przepływu.

Do badań wykorzystany został program Matlab-Simulink, który przeznaczony jest do obliczania, modelowania i symulowania układów z różnych dziedzin inżynierskich. Dzięki zainstalowaniu dodatkowych bibliotek, program ten służy do modelowania graficznego oraz wyznaczania charakterystyk badanego obiektu.

2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA REGULATORA PRZEPIYU 2FRM-16 FIRMY BOSCH REXROTH

Regulator przepływu 2FRM-16 ma za zadanie utrzymywać stałą wartość natężenia przepływu niezależnie od ciśnienia i temperatury.



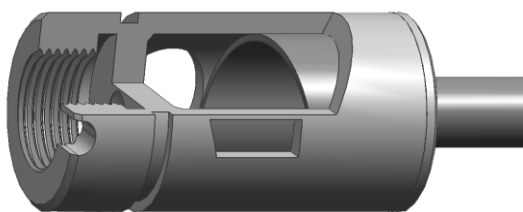
Rys. 1. Dwudrogowy regulator przepływu 2FRM-16 produkowany przez firmę BOSCH REXROTH: widok zewnętrzny i przekrój poprzeczny regulatora [4]

Zawór składa się z: korpusu (1), tulei zwężki (2), zaworu różnicowego (3) z ogranicznikiem skoku (3.1), opcjonalnie zaworu zwrotnego (4), elementu nastawczego - pokrętła (5).

Dla uzyskania efektu nastawiania przepływu konieczne jest podanie cieczy roboczej pod ciśnieniem do kanału A. Dławienie natężenia przepływu z kanału A do B następuje w dławiku (9). Przekrój dławika ustawiany jest przez obrót trzpienia krzywkowego (10) mechanicznie przez element nastawczy (5) zamykany na kluczyk, który może się obracać w zakresie od 0 (przepływ zamknięty) do 300° (przepływ całkowicie otwarty) co odpowiada 10-ciu działkom skali. W celu utrzymania stałego, niezależnego od ciśnienia natężenia przepływu przy dławiku (9) zawór różnicowy (kompensator ciśnienia) (3) jest wstępnie podłączony. Znaczna niezależność od temperatury wynika z odpowiedniego zaprojektowania dławika. Jeśli nie jest pożądane występowanie dużych zaburzeń przy rozruchu, można zamówić regulator przepływu z ogranicznikiem skoku tłoczka różnicowego (3.1) w postaci sworznia gwintowanego M6 kontrolowanego nakrętką sześciokątną M6. Dla zapewnienia swobodnego przepływu z kanału B do A zabudowany jest dodatkowo zawór zwrotny (4) [1,4].

2.1. Zawór dławiący

Zawory dławiące stosowane w regulatorach przepływu mają postać zbliżoną do tłoczka. Na obwodzie walcowej powierzchni wykonana jest szczelina dławiąca. Osiove przesunięcie tłoczka powoduje przemykanie bądź też otwieranie szczeliny dławiącej, co w rezultacie reguluje natężenie przepływu.

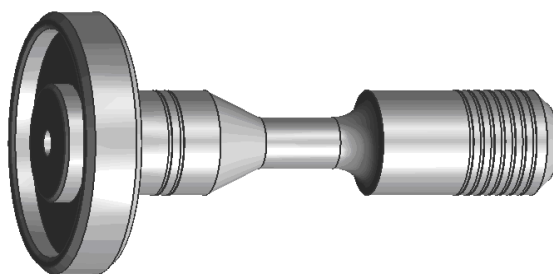


Rys. 2. Konstrukcja zaworu dławiącego w regulatorze przepływu 2FRM-16

W zależności od zastosowanej szczeliny dławiącej możemy uzyskać różne rodzaje przepływu. W regulatorze firmy F.E.H. „PONAR-WADOWICE” S.A. zastosowana jest szczelina dławiąca wykonana w kształcie zbliżonym do prostokąta. Otwór ten zapewnia zachowanie najkorzystniejszych parametrów dla małych przepływów. Konstrukcja otworu dławiącego pozwala na uzyskanie przepływu zbliżonego do turbulentnego.

2.2. Zawór różnicowy

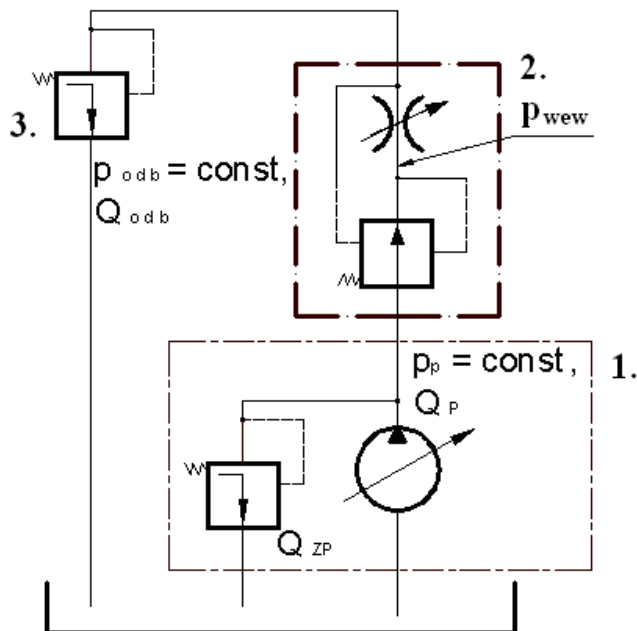
Zawór różnicowy zabudowany jest wewnątrz korpusu, prostopadle do dławika. Jego skok ograniczony jest przez zamknięcie szczeliny, która odcina dopływ. Pole powierzchni szczeliny dławiącej na zaworze różnicowym jest polem powierzchni bocznej walca. Zadaniem zaworu różnicowego jest utrzymanie stałej różnicy ciśnień za i przed zaworem dławiącym.



Rys. 3. Suwak zaworu różnicowego (kompensatora ciśnienia) w regulatorze

3. MODEL MATEMATYCZNY MODERNIZOWANEGO REGULATORA PRZEPIYWU

Ze względu na obszerność obliczeń oraz równań matematycznych w pracy przedstawiono jedynie najważniejsze etapy tworzenia modelu matematycznego, jak i komputerowego. Badania modelowe modernizowanego regulatora przepływu będą symulowały pracę tego regulatora na stanowisku badawczym.



Rys. 4. Budowa analizowanego modelu

W skład stanowiska wchodzi następujące elementy:

1. Idealny zasilacz hydrauliczny,
2. MODELOWANY REGULATOR PRZEPIYWU 2FRM-16,
3. Idealny odbiornik – zawór przelewowy.

3.1. Parametry elementów modelowanego zaworu

3.1.1. Wyznaczenie stałej dławika zaworu dławiącego C^{**} .

Zgodnie z założeniem - przepływ przez szczelinę dławiącą dławika jest turbulentny, dlatego wzór na stałą dławika ma postać: $C^{**} = \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot kv$ gdzie: ρ - oznacza gęstość oleju.

Stała dławika zaworu dławiącego C^{**} została wyznaczona dla nominalnego przepływu regulatora wynoszącego $100 \text{ dm}^3/\text{min}$ i wynosi $0,042521 \left[\sqrt{\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \right]$

Szczelina dławiąca zaworu ma postać równoległoboku o stałej szerokości $5,5 \text{ mm}$ i zmiennej wysokości uzależnionej od nastawy regulatora (przy maksymalnym otwarciu dławika – Otwarcie 10 - wysokość wynosi 16 mm).

Pole powierzchni otworu dławiącego dla maksymalnego otwarcia wynosi:

$$A_{dl} = b \cdot x_{NAST} = 0,000088 \left[\text{m}^2 \right]$$

3.1.2. Wyznaczenie masy zastępczej elementu ruchomego.

Masa zastępcza m_z elementu ruchomego jest uzależniona od masy tłoczka zaworu różnicowego m_t oraz współpracującej z nim sprężyny m_s .

Zależność ta przedstawia się następująco:

$$m_z = m_t + \frac{1}{3} m_s \qquad m_z = 0,0112 + \frac{1}{3} 0,0321 = 0,112 \left[\text{kg} \right]$$

3.1.3. Zestawienie wielkości wykorzystanych do budowy modelu

Poniższa tabela przedstawia wielkości, jakie będą wykorzystane w tworzeniu modelu matematycznego modernizowanego regulatora przepływu.

Tabela 1. Zestawienie wielkości wykorzystywanych do budowy modelu

NAZWA	OZNACZENIE	WARTOŚĆ	JEDNOSTKA
Pole powierzchni tłoczka	A_{tr}	1,2560 e-03	m^2
Pole powierzchni bocznej tłoczka zaworu różnicowego	$A_{btr\ x=0}$	1,0048 e-03	m^2
Pole powierzchni otworu dławiącego zaworu dławiącego	A_{dl}	8,8000 e-05	m^2
Pole powierzchni otworu dławiącego zaworu różnicowego	A_{szczZR}	3,5419 e-04	m^2
Współczynnik ściśliwości oleju	B	1,4 e+09	Pa
Stała sprężyny	c	11281,83	$\frac{N}{m}$
Stała dławika	C^{**}	0.042521	$\sqrt{\frac{m^3}{kg}}$
Średnica tłoczka	d_{tr}	16 e-3	m
Luz promieniowy tłoczka zaworu różnicowego	h	2,5 e-5	m
Współczynnik strat dla dławika	k_v	0,902	
Masa zastępcza elementu ruchomego	m_z	1,2346 e-01	kg
Masa tłoczka zaworu różnicowego	m_{tr}	1,1274 e-01	kg
Lepkość dynamiczna medium	μ	0,06	$Pa \cdot s$
Współczynnik tarcia suchego	μ_s	0,1	
Współczynnik oporów przepływu dławika	ξ	1,231	
Ciśnienie robocze pompy	p_p	25 e+6	Pa
Gęstość oleju	ρ	900	$\frac{kg}{m^3}$
Tarcie suche	T_s	0,011274	N
Objętość komory pomiędzy zaworem dławiącym a różnicowym	$V_{wew\ x=0}$	7,379 e-05	m^3
Wydajność pompy	Q_p	75	$\frac{dm^3}{min}$
Napięcie wstępne sprężyny	x_0	2,45 e-02	m

3.2. Równania matematyczne modelu

Badania modelowe modernizowanego regulatora przepływu 2FRM-16 polegały na utworzeniu, dla tak wyodrębnionego obiektu, równań różniczkowych cząstkowych, dla których dokonana była dyskretyzacja ze względu na zmienną niezależną czasu t lub zmienną przestrzenną x wynikającą z przemieszczenia tłoczka zaworu różnicowego.

Jeśli dokonamy dyskretyzacji ze względu na jedną z nich, np. na x , to w efekcie otrzymamy układ równań różniczkowych zwyczajnych. Taki układ równań można rozwiązać używając

standardowych, komputerowych pakietów matematycznych. Jednym z takich programów jest Matlab Simulink, który zawiera procedury całkowania wykorzystywane do rozwiązywania takich właśnie równań. Program ten wymaga takiego przekształcenia równań matematycznych, aby z jednej strony równania znajdowała się największa pochodna analizowanej zmiennej, a cała reszta wyrażenia znajdowała się po znaku równości.

3.2.1. Natężenie ściśliwości

Natężenie ściśliwości komory wewnętrznej regulatora:

$$Q_{\dot{p}_{wew}} = \frac{V_{wew}}{B} \frac{dp_{wew}}{dt}$$

3.2.2. Bilans przepływu przez zawór

$$\begin{aligned} Q_{dl} + Q_{\dot{p}_{wew}} + Q_{\dot{x}} - Q_{ZR} &= 0 \\ Q_{dl} &= -Q_{\dot{p}_{wew}} - Q_{\dot{x}} + Q_{ZR} \\ Q_{dl} &= C^{**} \cdot A_{dl} \cdot (p_{wew} - p_{odb})^m \\ Q_{ZR} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \cdot k_V \cdot A_{szczZR} \end{aligned}$$

3.2.3. Równanie funkcji ciśnienia w komorze wewnętrznej p_{wew}

Z równania bilansu przepływu przez dławik Q_{DL} :

$$\begin{aligned} C^{**} \cdot A_{dl} \cdot (p_{wew} - p_{odb})^m &= -Q_{\dot{p}_{wew}} - Q_{\dot{x}} + Q_{ZR} \\ \frac{V_{\dot{p}_{wew}}}{B} \frac{dp_{wew}}{dt} &= \frac{B}{V_{\dot{p}_{wew}}} \cdot \left[-\left(C^{**} \cdot A_{dl} \cdot (p_p - p_{wew})^m \right) - Q_{\dot{x}} + Q_{ZR} \right] \end{aligned}$$

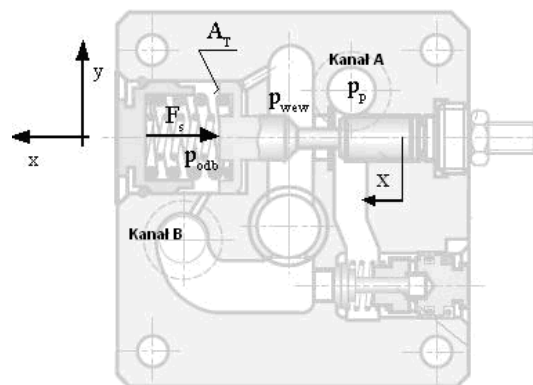
otrzymujemy równanie funkcji ciśnienia w komorze regulatora p_{wew} :

Zakładam przepływ turbulentny- $m = 0,5$

$$\frac{dp_{wew}}{dt} = \frac{B}{V_{\dot{p}_{wew}}} \cdot \left[-\left(C^{**} \cdot A_{dl} \cdot (p_{wew} - p_{odb})^m \right) - Q_{\dot{x}} + Q_{ZR} \right]$$

3.2.4. Równanie funkcji przemieszczenia tłoczka zaworu różnicowego x

Równanie funkcji przemieszczenia tłoczka zaworu różnicowego realizuje w modelu komputerowym zmianę szczeliny dławiącej na zaworze różnicowym przez co następuje kompensacja ciśnień. Równanie to uwzględnia takie składowe, jak masę zastępczą elementu ruchomego (sprężyny, suwak), 2 rodzaje tarcia (lepkie i suche), bezwładność elementu ruchomego, jak i siłę hydrodynamiczną i siłę pochodzącą od sprężyn [2].



Rys. 5. Rozkład sił działających na suwak zaworu różnicowego

W równaniu funkcji przemieszczenia tłoczka zaworu różnicowego występują następujące składowe:

- bezwładność układu tłoczek – sprężyna o zredukowanej masie m_z :

$$m_z \cdot \frac{d^2 \ddot{x}}{dt^2}$$

- tarcie suche:

$$T_s = m_t \cdot \mu_s$$

- siła sprężyny:

$$F_s = c \cdot (x + x_0)$$

- siła hydrodynamiczna:

- tarcie lepkie:

$$T_l = \frac{\mu \cdot A_{bt}}{h} \frac{d\dot{x}}{dt}$$

$$F_{HD} = \frac{0,72 \cdot A_{szczdl} \cdot \Delta p}{\sqrt{\xi}}$$

- współczynnik oporów przepływu:

$$\xi = \frac{1}{k v^2}$$

Z równania sił: $\sum F_{ix} = 0$,

$$-p_{odb} \cdot A_{tr} - m_z \cdot \frac{d^2 \ddot{x}}{dt^2} - \frac{\mu \cdot A_{btr}}{h} \frac{d\dot{x}}{dt} - c \cdot (x + x_0) + p_{wew} \cdot A_{tr} - T_s \cdot \text{sig}\dot{x} + F_{HD} = 0$$

otrzymujemy równanie przemieszczenia tłoczka zaworu różnicowego:

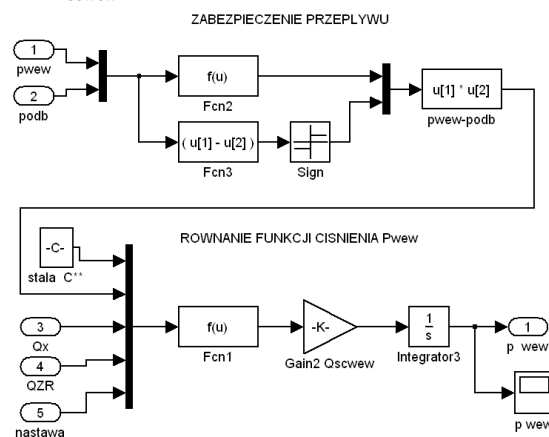
$$\frac{d^2 \ddot{x}}{dt^2} = \frac{1}{m_z} \cdot \left[(p_{wew} \cdot A_{tr}) - p_{odb} \cdot A_{tr} - \frac{\mu \cdot A_{btr}}{h} \frac{d\dot{x}}{dt} - c \cdot (x + x_0) - T_s \cdot \text{sig}\dot{x} + F_{HD} \right]$$

4. MODEL KOMPUTEROWY MODERNIZOWANEGO REGULATORA PRZEPLÝWU

Na podstawie modelu matematycznego, równań matematycznych opisujących działanie regulatora przepływu został opracowany model komputerowy w programie MATLAB-SIMULINK.

Model komputerowy równania funkcji ciśnienia w komorze wewnętrznej regulatora:

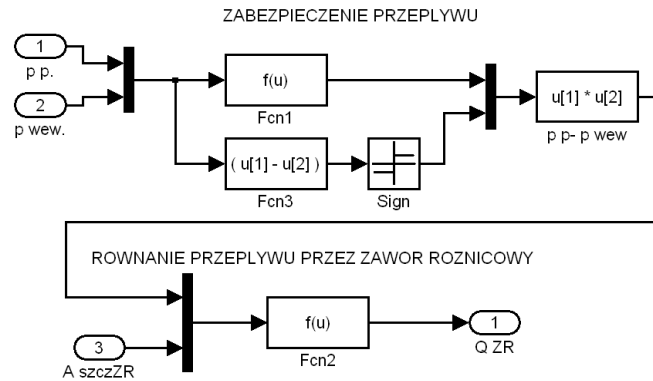
$$\frac{dp_{wew}}{dt} = \frac{B}{V_{\acute{s}cwew}} \cdot \left[- (C^{**} \cdot A_{dl} \cdot (p_{wew} - p_{odb})^m) - Q_x + Q_{ZR} \right]$$



Rys. 6. Model komputerowy równania funkcji ciśnienia w komorze wewnętrznej regulatora wykonany w programie MATLAB SIMULINK

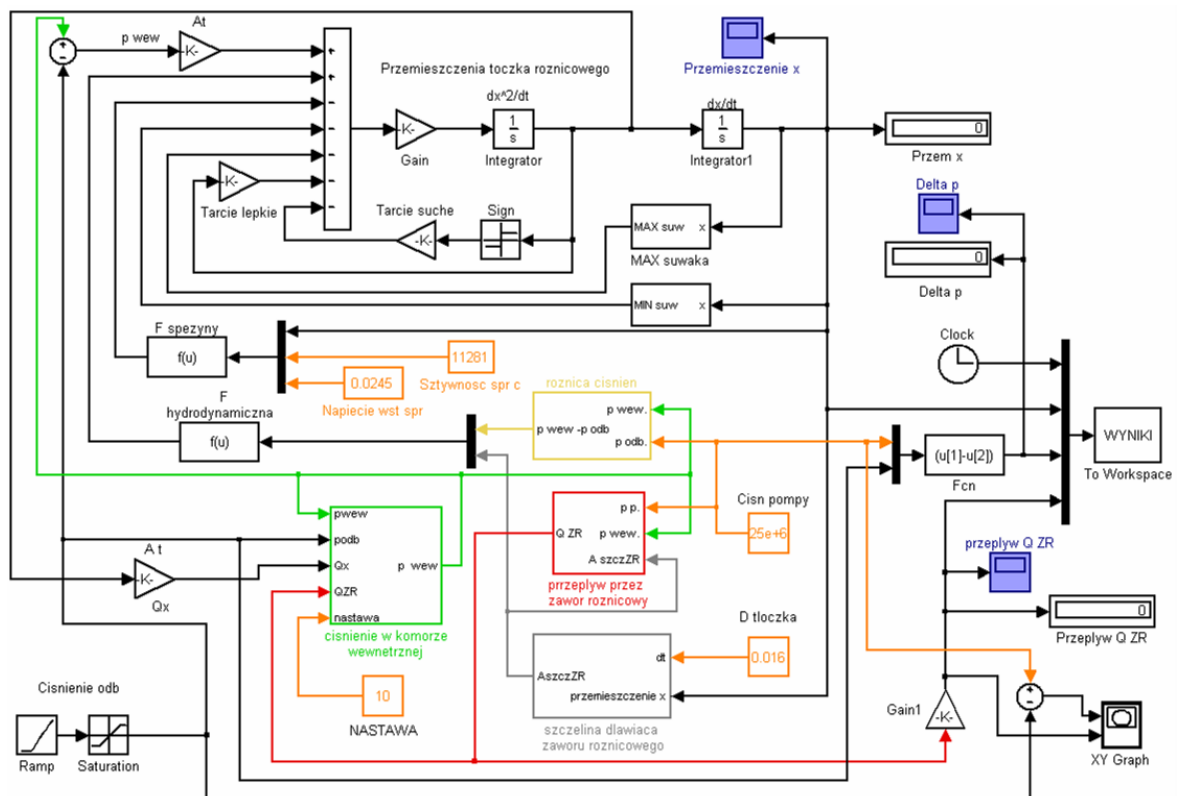
Model komputerowy przepływu przez zawór różnicowy:

$$Q_{ZR} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_p - p_{wew})}{\rho}} \cdot kv \cdot A_{szczZR}$$



Rys. 7. Model komputerowy równania funkcji przepływu przez zawór różnicowy wykonany w programie MATLAB SIMULINK

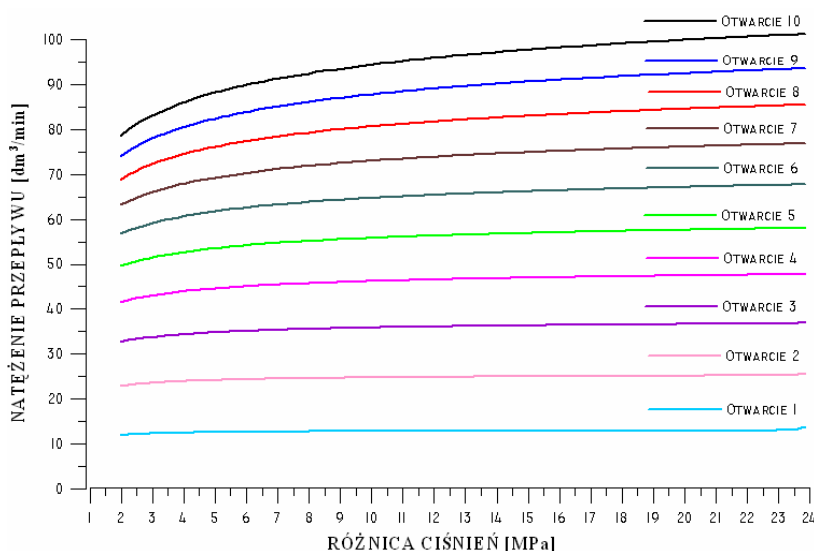
Kompletny model komputerowy regulatora w postaci graficznej przedstawiono poniżej.



Rys. 8. Model komputerowy układu z regulatorem przepływu 2FRM-16 wykonany w programie MATLAB SIMULINK

5. WYNIKI BADAŃ

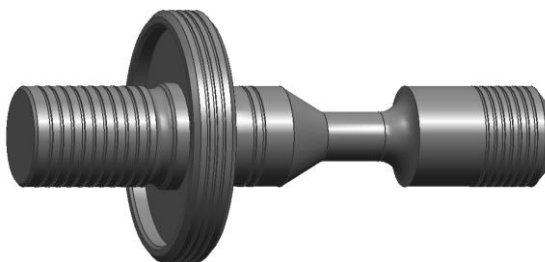
W celu sprawdzenia poprawności działania modelu komputerowego pierwszym etapem było wyznaczenie charakterystyki statycznej produkowanego seryjnie regulatora 2FRM-16. Charakterystykę statyczną dla takiej konstrukcji, przed jego modyfikacją pokazano na rys.9, gdzie oś y prezentuje wartość natężenia przepływu zaś oś x różnicę ciśnienia w komorze wewnętrznej p_{wew} i ciśnienia na odbiorniku p_{odb} .



Rys. 9. Modelowa charakterystyka statyczna seryjnego regulatora przy różnych nastawach zaworu dławiącego

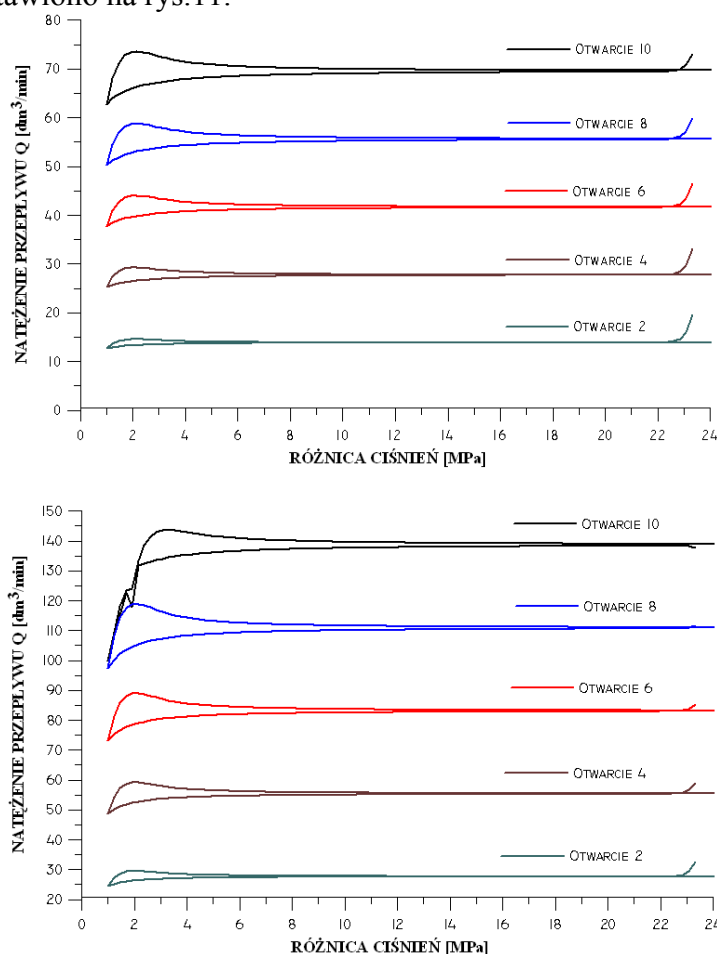
Zbliżona w granicach tolerancji liniowość natężenia przepływu i różnicy ciśnień potwierdza prawidłowość modelu, co umożliwia dalsze badania.

Modyfikacji w regulatorze przepływu poddany został zawór różnicowy. W modyfikacji pierwotnej wprowadzono dodatkowe ciśnienie sterujące działające na tłoczek zaworu różnicowego, które miało zastąpić zestaw sprężyn. Pierwsze próby jednak nie dały pozytywnych efektów. Dobór odpowiednich parametrów i powiększenie średnicy trzpienia suwaka zaworu różnicowego spowodowało wyrównanie pola powierzchni kołnierza suwaka od strony komory sterującej, z polem powierzchni tego samego kołnierza od strony komory wewnętrznej regulatora. Dzięki temu nastąpiło zrównoważenie ciśnienia p_{wew} z ciśnieniem odbiornika p_{odb} , co spowodowało prawidłową pracę zaworu różnicowego i w konsekwencji odpowiednią regulację natężenia przepływu przy zmiennym obciążeniu.



Rys. 10. Konstrukcja zmodernizowanego suwaka zaworu różnicowego

Charakterystyki statyczne dla takiej konstrukcji suwaka przy dwóch różnych ciśnieniach sterujących przedstawiono na rys.11.



Rys. 11. Modelowa charakterystyka statyczna zmodernizowanego regulatora przepływu 2FRM-16 przy ciśnieniu sterującym 0,5 i 2 MPa

Charakterystyki statyczne dla różnych ciśnień sterujących wykazują bardzo dobrą liniowość w pełnym zakresie spadku ciśnienia. Jedynie przy dolnych zakresach ciśnień pojawia się nieliniowość, która spowodowana jest efektem reakcji hydrodynamicznej, a także sił tarcia suchego i lepkiego, które zostały uwzględnione w modelu komputerowym. Przy wyższych spadkach ciśnienia (24 MPa) obserwujemy także niewielką nieliniowość, która wynika z przyjętych warunków początkowych dla symulacji – początek symulacji został określony na poziomie natężenia przepływu wynoszącego 50 dm³/min.

6. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Badania modelowe nad regulatorem przepływu 2FRM-16 doprowadziły ostatecznie do opracowania optymalnej konstrukcji czego efektem były charakterystyki, które ukazują jak najbardziej prawidłową pracę regulatora.

Utworzony model komputerowy umożliwia zmianę nastawy pola powierzchni otworu dławiącego dławika, dzięki czemu uzyskujemy różne natężenia przepływu. Mimo iż regulator umożliwia płynną zmianę nastaw otwarcia dławika od 0 – 10, to w pracy zostały przedstawione wyniki badań dla kilku tylko nastaw (2, 4, 6, 8, 10) w celu ukazania możliwości i prawidłowości pracy danego regulatora.

Rozwiązanie zastosowania dodatkowego ciśnienia sterującego powoduje:

- niezmiennosc wartości siły działającej na suwak zaworu różnicowego przy zmianie przemieszczenia, co w przypadku zastosowania siły pochodzącej od sprężyn nie miało miejsca, gdyż sprężyna pod wpływem ugięcia powodowała wzrost wartości siły wynikający z napięcia wstępnego sprężyny,
- większe możliwości regulacyjne – zwiększony zakres pracy regulatora przy większych natężeniach przepływu i ciśnieniach,
- łatwość i elastyczność pracy – możliwość płynnego sterowania ciśnieniem sterującym i uzyskanie oczekiwanych przepływów, co było ograniczone w seryjnej konstrukcji przy zastosowaniu sprężyn.

W modyfikacji pierwotnej ciśnienie sterujące wynosiło 5, 10, 15 MPa, zaś przy zastosowaniu większej średnicy trzpienia wartości wymaganych ciśnień sterujących wynosiły tylko 0,5, 1 i 2 MPa, co znacznie obniżyło trudności w realizacji takich ciśnień.

Wpływ ciśnienia sterującego na wartość natężenia przepływu jest znaczny, w przypadku nastawy otwarcia dławika 10, zwiększając ciśnienie sterujące czterokrotnie, natężenie przepływu wzrasta dwukrotnie (np. dla $p_{st} = 0,5 \text{ MPa} \rightarrow Q = 70 \text{ dm}^3/\text{min}$, zaś dla $p_{st} = 2 \text{ MPa} \rightarrow Q = 140 \text{ dm}^3/\text{min}$), co wynika z zależności pierwiastkowej.

Niewielkie nieliniowości pojawiające się na charakterystykach są efektem sił tarcia, reakcji hydrodynamicznej, a także wynikają z przyjętych warunków początkowych symulacji i czasu ustabilizowania układu w stan ustalony.

Badania modelowe opracowywane w środowisku MATLAB SIMULINK pozwalają ograniczyć koszty wykonywania modeli rzeczywistych. Opracowanie modelu komputerowego, który ilustruje pracę układu pozwala na dokładne przeanalizowanie zjawisk, jakie zachodzą w badanym modelu fizycznym. Bardzo dużą zaletą jest to, że w sytuacji, kiedy wyniki badań są niezadowolające lub różnią się od wyników badań eksperymentalnych to badacz ma możliwość łatwej ingerencji w równania opisujące zjawisko.

Powstały w ramach niniejszej pracy model komputerowy modernizowanego regulatora przepływu 2FRM-16 może stać się podstawą do dalszych bardziej szczegółowych badań dotyczących rozwoju tego typu regulatorów.

7. LITERATURA

- [1] Tomasiak E.: Napędy i sterowanie hydrauliczne i pneumatyczne. Gliwice 2001.
- [2] Ostrowski T.: Praca Dyplomowa: Badania modelowe modernizowanego regulatora przepływu 2FRM-6. Gliwice 2005.
- [3] Kamińska A. , Pańczyk B.: Matlab. Przykłady i ćwiczenia. MIKOM, Warszawa 2002.
- [4] Katalog MANNESMANN REXROTH.

NUMERICAL RESEARCH ON THE MODERNIZED FLOW CONTROLLER 2FRM-16

Abstract: In the paper the numerical research has been presented, which make possible modernization of flow controller type 2FRM-16-22/100LB. The research relied on mathematical description of flow controller, introduction of basic parameters and on the analysis of characteristic. There was effect of numerical research correctly acting computer model.

Key words: flow controller, computer model, numerical research.

Recenzent: Dr inż. Andrzej SZAFRANIEC