KAZIMIERZ PESZYŃSKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

ANALIZA ZAWORU ZABEZPIECZAJĄCEGO Z UWZGLĘDNIENIEM WŁASNOŚCI NIELINIOWYCH

Zawory zabezpieczające przed nadmiernym wzrostem ciśnienia w systemach pneumatycznych występują przede wszystkim w układach hamulcowych zarówno wagonów kolejowych, jak i ciężkich pojazdów samochodowych. W pracy wyprowadzono model matematyczny takiego zaworu, przy uwzględnieniu ściśle określonych założeń upraszczających. Otrzymany model po podstawieniu wartości liczbowych może być przedmiotem modelowania numerycznego.

Słowa kluczowe: modelowanie, systemy pneumatyczne, układy hamulcowe

1. WSTĘP

Zawory zabezpieczające przed nadmiernym wzrostem ciśnienia w układach pneumatycznych występują przede wszystkim w układach hamulcowych zarówno wagonów kolejowych, jak i ciężkich pojazdów samochodowych. Zadaniem ich jest również zapewnienie niezależności układu hamulcowego od zmian ciśnienia zasilania w komorze roboczej (rys. 1).



Rys. 1. Schemat zaworu zabezpieczającego z elementami jego otoczenia

2. STOSOWANE OZNACZENIA

- 2.1. Zmienne i stałe fizyczne
- A powierzchnia, m²
- B indukcja magnetyczna, V·s·m⁻²
- c ciepło właściwe, J·kg⁻¹·K⁻¹
- c współczynnik sztywności sprężyny, N·m⁻¹

- d średnica, m
- E energia, J
- Ε natężenie pola elektrycznego, V·m⁻¹
- F_ siła, N
- h entalpia właściwa, J·K⁻¹ _
- natężenie prądu elektrycznego, A Ι _
- k _ współczynnik przenoszenia ciepła, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- k współczynnik tłumienia, N·s·m
- L _ indukcja magnetyczna, V·s·A⁻¹
- $m \max$, kg
- \dot{m} nateżenie przepływu, kg s⁻¹
- L liczba zwojów solenoidu, –
- Q strumień ciepła, J·s⁻
- ciśnienie absolutne, Pa р
- R rezystancja elektryczna, Ω
- R rezystancja magnetyczna, A·V⁻¹
- R właściwa stała gazowa, J·kg⁻¹·K⁻¹
- czas, s t
- temperatura bezwzględna, K Т
- U napięcie elektryczne, V
- U energia wewnętrzna gazu, J
- prędkość, m·s[−] v
- _ Vobjętość, m³
- _ przemieszczenie, m x
- α współczynnik kontrakcji, -
- κ wykładnik adiabaty, –
- μ przenikalność magnetyczna, V·s·A⁻¹·m⁻¹
- Φ strumień magnetyczny, V·s
- Ψ sprzężenie magnetyczne, V·s
- Θ wzbudzenie (napięcie magnetyczne), A

2.2. Indeksy

- 0 odnosi się do stanu początkowego lub próżni,
- odnosi się do komory wejściowej, 1
- 2 odnosi się do komory wyjściowej,
- 3 - odnosi się do komory sterującej,
- odnosi się do nieskończoności, ∞
- SP odnosi się do sprężarki,
- ZZ odnosi się do zaworu zabezpieczającego,
- ZM odnosi się do zaworu magnetycznego,
- UH odnosi się do układu hamulcowego,
- ot odnosi się do otoczenia,
- we odnosi się do wejścia,
- wy odnosi się do wyjścia,
- wyp odnosi się do wypływu,
- Σ odnosi się do łącznego oporu magnetycznego, MR odnosi się do oporu magnetycznego rdzenia zaworu magnetycznego,

- MS odnosi się do składowej stałej łącznego oporu magnetycznego,
- MD odnosi się do oporu magnetycznego dławika zaworu magnetycznego,
- MO odnosi się do oporu magnetycznego obudowy zaworu magnetycznego,
- ML1 odnosi się do oporu magnetycznego szczeliny powietrznej między rdzeniem i obudową,
- *ML2* odnosi się do oporu magnetycznego szczeliny powietrznej między rdzeniem i dławikiem.

3. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE PODCZAS BUDOWY MODELU

3.1. Warunki nominalnego trybu hybrydowego

Normalny stan hybrydowy jest to stan układu, dla którego wyprowadzono równania ruchu bez uwzględnienia warunków logicznych.

Nr	Warunek
1.	$\dot{m}_{ZMwe} \ge 0$
2.	$\dot{m}_{ZMwy} \ge 0$
3.	$0 \le x_{ZZ} < x_{ZZ max}$
4.	$0 \le x_{ZM} < \frac{d_{ZMwyp}}{4}$
5.	$1 \ge \frac{p_2}{p_1} > \prod_{kryt}$
6.	$1 \ge \frac{p_3}{p_1} > \prod_{kryt}$
7.	$1 \ge \frac{p_{ot}}{p_3} > \Pi_{kryt}$

3.2. Założenia upraszczające

- Z1 Fizyczne własności gazu, takie jak: ciepło właściwe, stała gazowa i wykładnik adiabaty przyjęto jako niezmienne w dziedzinie czasu, ciśnienia i temperatury.
- Z2 Wartości ciśnień w rozpatrywanych komorach są przynajmniej równe ciśnieniu otoczenia.
- Z3 Powietrze w komorach jest dokładnie mieszane (jednorodne pole temperatury i ciśnienia).
- Z4 Elementy siłownika magnetycznego zbudowane są z jednorodnych dynamicznie, liniowo zmiennych materiałów.
- Z5 Pominięto wymianę ciepła przez promieniowanie.

- Z6 Strumienie powietrza: ze sprężarki, zużywany przez układ hamulcowy oraz przepływający przez zawór zabezpieczający nie mogą mieć wartości ujemnych. Wszystkie inne strumienie przepływu mogą mieć wartości zarówno dodatnie, jak i ujemne.
- Z7 Wznios tłoka zaworu zabezpieczającego w odniesieniu do średnicy gniazda spełnia nierówność $x_{ZZ} > \frac{d_2}{4}$.
- Z8 Maksymalne przemieszczenie rdzenia magnesu, średnice otworu dopływowego

i wypływowego spełniają nierówność $x_{ZM max} > \frac{d_{ZM we}}{4} + \frac{d_{ZM wy}}{4}$.

Z9 – Przekroje przyłączy zaworu magnetycznego spełniają warunki: $A_{\rm ZMwy} >> A_{\rm ZMwe}$,

 $A_{ZMwy} >> A_{ZMwyp}$.

- Z10 Energia kinetyczna i potencjalna powietrza w komorach jest pomijalna.
- Z11 Podczas analizy ruchu rdzenia w armaturze korpusu magnetycznego pominięto siły ciśnieniowe.
- Z12 Wszystkie komory powietrzne posiadają stałe objętości.

Układ zawiera również kilka elementów, które realizują przełączanie. Oznacza to, że równania, które opisują dynamiczne zachowanie odpowiednich współpracujących podukładów zmieniają się zgodnie z pewnymi warunkami. Jest to również uwzględnione w równaniach zachowania i konstytutywnych.

3.3. Podstawowe elementy układu

Do analizy przyjęto sześć objętości kontrolnych:

- 1) objętość kontrolną komory wejściowej,
- 2) objętość kontrolną komory wyjściowej,
- 3) objętość kontrolną komory sterującej,
- 4) objętość kontrolną komory zaworu zabezpieczającego,
- 5) objętość kontrolną komory armatury zaworu magnetycznego,
- 6) objętość kontrolną komory solenoidu.

Równania ruchu wyprowadzono na podstawie praw zachowania masy, energii, pędu oraz wzajemnych powiązań między poszczególnymi komorami kontrolnymi. We wszystkich przypadkach otwarcie objętości kontrolnej związane było z przepływem masy lub energii przez powierzchnie ograniczające.

4. PRAWA ZACHOWANIA

4.1. Prawa zachowania dotyczące masy powietrza

Na rysunku 1 indeksami 1-3 oznaczono trzy komory, w których rozważany jest bilans masy. Komora wejściowa ma jedno wejście powietrza ze sprężarki i dwa wyjścia: do zaworu zabezpieczającego i do zaworu magnetycznego. Wobec tego otrzymano następujące równanie:

$$\frac{dm_1}{dt} = \dot{m}_{SP} - \dot{m}_{ZZ} - \dot{m}_{ZMwe} \tag{1}$$

Komora wyjściowa ma jedno wejście z zaworu zabezpieczającego oraz jedno wyjście do układu hamulcowego:

$$\frac{dm_2}{dt} = \dot{m}_{ZZ} - \dot{m}_{UH} \tag{2}$$

Komora sterująca jest jednodrogowa, jeden kanał jest kanałem dopływowym przy założeniu kierunku strumienia zgodnie z rysunkiem 1. Otrzymany bilans masowy jest następujący:

$$\frac{dm_3}{dt} = \dot{m}_{ZMwy} \tag{3}$$

4.2. Prawa zachowania energii dotyczące powietrza

Ogólna postać równania dotycząca energii całkowitej w danej objętości kontrolnej o *p* wejściach i *q* wyjściach ma postać:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{j=1}^{p} \dot{m}_{j} \left(h + e_{k} + e_{p} \right) - \sum_{k=1}^{q} \dot{m}_{k} \left(h + e_{k} + e_{p} \right) + Q + W$$
(4)

gdzie h, e_k i e_p oznaczają odpowiednio względne wartości entalpii, energii kinetycznej i energii potencjalnej odniesione do masy powietrza w komorach, Q jest źródłem ciepła a W jest pracą wykonaną nad układem.

Zgodnie z założeniem Z10 składniki w postaci energii potencjalnej i kinetycznej są pomijalne. Na podstawie założenia Z12 trzy objętości są stałe, wobec czego składnik w postaci pracy jest również równy zeru. Wobec tego prawa zachowania energii przyjmują postać:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{j=1}^{p} \dot{m}_{j} h_{j} - \sum_{k=1}^{q} \dot{m}_{k} h_{k} + Q$$
(5)

gdzie ekstensywną wielkością podlegającą zachowywaniu jest energia wewnętrzna, jako energia dominująca energię całkowitą powietrza.

Powyższa ekstensywna postać prawa zachowania energii musi być przetransformowana do postaci intensywnej, w celu otrzymania zmiennej mierzalnej. Do tego celu wybrano ciśnienie w komorze.

Zmiany ciśnienia w komorze mogą być wyrazowe poprzez wykorzystanie związków definiujących energię wewnętrzną jak i równanie gazu doskonałego:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d\left(c_{p}mT\right)}{dt} = \frac{d\left(c_{p}\frac{pV}{R}\right)}{dt} = \frac{c_{p}V}{R}\frac{dp}{dt} = \frac{V}{\kappa-1}\frac{dp}{dt}$$
(6)

gdzie:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \tag{7}$$

Składnik w postaci entalpii właściwej odniesionej do masy *h* jest iloczynem ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i temperatury:

$$h = c_p T \tag{8}$$

Ponieważ temperatura zależy od źródła dopływu powietrza do komory, równanie to wprowadza warunek logiczny (przełączający).

Podobnie jak przy wyprowadzeniu równania zachowania masy równania zachowania energii zostaną wyprowadzone dla tych samych objętości kontrolnych. Należy rozważyć różnorodne wejściowe i wyjściowe strumienie powietrza oraz temperatury uwzględniające tryb hybrydowy, komora wejściowa może zostać opisana czteroma równaniami. W wyjściowym trybie (gdzie $\dot{m}_{SP} \ge 0$, $\dot{m}_{ZZ} \ge 0$ i $\dot{m}_{ZMwe} \ge 0$) zmiany ciśnienia w komorze wejściowej określone są w następujący sposób:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\kappa R}{V_1} \left(\dot{m}_{SP} T_{SP} - \dot{m}_{ZZ} T_1 - \dot{m}_{ZMwe} T_1 \right) + \frac{\kappa - 1}{V_1} Q_1 \tag{9}$$

Podobnie w danym trybie nominalnym (gdzie $\dot{m}_{ZZ} \ge 0$, $\dot{m}_{UH} \ge 0$) zmiany ciśnienia w komorze wyjściowej można określić równaniem:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\kappa R}{V_2} \left(\dot{m}_{ZZ} T_1 - \dot{m}_{UH} T_2 \right) + \frac{\kappa - 1}{V_2} Q_2 \tag{10}$$

Ostatecznie, w przyjętym hybrydowym trybie nominalnym (gdzie $\dot{m}_{ZMwy} \ge 0$) w komorze sterującej występują następujące zmiany ciśnienia:

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{\kappa R}{V_2} \left(\dot{m}_{ZMwy} T_1 \right) + \frac{\kappa - 1}{V_3} Q_3 \tag{11}$$

4.3. Prawo zachowania pędu dla tłoka zaworu zabezpieczającego

Uwzględniając siły działające na analizowany element generowane przez ciśnienie, sprężyny itd. pokazane na rysunku 2, prawo zachowania pędu dotyczące tłoka zaworu zabezpieczającego ma postać:

$$\frac{d(m_{ZZ}v_{ZZ})}{dt} = F_{ZZ1} + F_{ZZ2} - c_{ZZ}(x_{ZZ} + x_{0ZZ}) - k_{ZZ}v_{ZZ} - F_{ZZ3} + F_{ZZgr}$$
(12)

gdzie F_{ZZ1} i F_{ZZ2} są siłami wywołanymi przez ciśnienia panujące w komorze wejściowej i wyjściowej, F_{ZZ3} jest siłą wywołaną przez ciśnienie w komorze sterującej, oraz F_{ZZgr} jest siłą wynikającą z ograniczeń ułożenia tłoka w obudowie.



Rys. 2. Zawór zabezpieczający

Po przyjęciu, że masa tłoka jest stała, równanie (11) można zapisać:

$$\frac{dv_{ZZ}}{dt} = \frac{F_{ZZ1} + F_{ZZ2} - c_{ZZ} \left(x_{ZZ} + x_{0ZZ}\right) - k_{ZZ} v_{ZZ} - F_{ZZ3} + F_{ZZgr}}{m_{ZZ}}$$
(13)

Zmiany położenia tłoka są otrzymane z równania:

$$\frac{dx_{ZZ}}{dt} = v_{ZZ} \tag{14}$$

4.4. Prawo zachowania pędu dla rdzenia zaworu magnetycznego

Podobnie do równania zachowania pędu tłoka zaworu zabezpieczającego można napisać równanie równowagi dla rdzenia zaworu magnetycznego, uwzględniając założenie Z11 i rysunek 3:

$$\frac{dv_{ZM}}{dt} = \frac{F_{ZM} - c_{ZM} \left(x_{ZM} + x_{0ZM} \right) - k_{ZM} v_{ZM} + F_{ZMgr}}{m_{ZZ}}$$
(15)

$$\frac{dx_{ZM}}{dt} = v_{ZM} \tag{16}$$



Rys. 3. Schemat zaworu magnetycznego

4.5. Prawa dotyczące sprzężenia magnetycznego

Równowaga sprzężenia magnetycznego jest określona przez drugie równanie Maxwella:

$$U_{ind} = -U_L = \oint_I E dl \equiv \int_A \frac{\partial B}{\partial t} dA = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI_{ZM})}{dt}$$
(17)

gdzie E jest natężeniem pola elektrycznego, B jest indukcją magnetyczną, Ψ jest sprzężeniem magnetycznym, Φ jest strumieniem magnetycznym, N jest liczbą zwojów, a L jest współczynnikiem indukcji. Przekrój A odnosi się do przekroju solenoidu, natomiast krzywa całkowania I jest obwodem tego przekroju (rys. 3). Ekwiwalentny schemat układu elektrycznego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu elektrycznego analizowanego zaworu magnetycznego

Spadek napięcia zasilającego jest sumą spadku napięcia na oporze omowym i na oporze indukcyjnym:

$$U = U_{R} + U_{I} \tag{18}$$

Korzystając z prawa Ohma oraz równania (16) można określić związek między napięciem a natężeniem prądu:

$$U = R_{ZM}I_{ZM} + \frac{d\left(LI_{ZM}\right)}{dt}$$
(19)

Po zróżniczkowaniu iloczynu określającego indukowane napięcie otrzymano:

$$U = R_{ZM}I_{ZM} + L\frac{dI_{ZM}}{dt} + I_{ZM}\frac{dL}{dt}$$
(20)

gdzie R_{ZM} oznacza opór omowy.

W równaniu (20) $\frac{dL}{dt}$ może być przedstawione w postaci $\frac{dL}{dx_{ZM}} \frac{dx_{ZM}}{dt}$, natomiast $\frac{dL}{dx_{ZM}}$ może być zapisane w postaci $\frac{dL}{dR_{\Sigma}} \frac{dR_{\Sigma}}{dx_{ZM}}$. Z równania (18) po przedstawieniu (20) i powyższych zależności otrzymamy:

$$\frac{dI_{ZM}}{dt} = \frac{U}{L} - \frac{R_{ZM}I_{ZM}}{L} - \frac{I_{ZM}}{L}\frac{dL}{dR_{\Sigma}}\frac{dR_{\Sigma}}{dx_{ZM}}v_{ZM}$$
(21)

gdzie R_{Σ} jest magnetycznym oporem zaworu magnetycznego z solenoidem.

5. RÓWNANIA KONSTYTUTYWNE

5.1. Własności komór powietrznych

Temperatura w komorze wejściowej jest określona na podstawie równania stanu gazu idealnego:

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{m_1 R} \tag{22}$$

Podobnie można określić temperaturę gazu w komorze wyjściowej i sterującej:

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{m_2 R}$$
(23)

$$T_3 = \frac{p_3 V_3}{m_3 R}$$
(24)

Przekazywanie ciepła traktowane jako źródło ciepła obliczane jest na podstawie prawa Newtona dotyczącego przepływu ciepła. Dla komory wejściowej można napisać:

$$Q_{1} = k_{1}A_{1}\left(T_{1} - T_{ot}\right)$$
(25)

gdzie k jest współczynnikiem przepływu ciepła a A jest powierzchnią ścian komory.

Podobnie wyznacza się przepływające ciepło w komorze wyjściowej i sterującej:

$$Q_2 = k_2 A_2 \left(T_2 - T_{ot} \right)$$
 (26)

$$Q_3 = k_3 A_3 \left(T_3 - T_{ot} \right)$$
 (27)

5.2. Siły działające na tłok zaworu zabezpieczającego

Od góry na tłok działa siła cylindrycznej sprężyny i siła wywołana ciśnieniem sterującym p_3 . O dołu na tłok działają dwie siły wywołane ciśnieniami p_1 i p_2 . Siły wywoływane przez poszczególne ciśnienia można określić wzorami:

$$F_{ZZ1} = p_1 \frac{d_1^2 - d_2^2}{4} \pi \tag{28}$$

$$F_{ZZ2} = p_2 \frac{d_2^2}{4} \pi$$
 (29)

$$F_{ZZ3} = p_3 \frac{d_1^2}{4} \pi$$
 (30)

Siła ograniczająca skok tłoka zaworu zabezpieczającego jest modelowana jako sprężyna o nieskończenie dużym współczynniku sztywności, jeżeli skok przekroczy ograniczenia konstrukcyjne. Zgodnie z przyjętym nominalnym trybem pracy, tłok jest w położeniu pośrednim, w którym ta siła jest równa zeru:

$$F_{ZZogr} = 0 \tag{31}$$

5.2. Własności przepływowe zaworu zabezpieczającego

Po to, aby zapewnić możliwość sterowania przepływem minimalny przekrój przepływowy między tłokiem zaworu i gniazdem zaworu powinien być powierzchnią boczną walca o średnicy podstawy d_2 . Implikuje to również różne tryby pracy. W nominalnym położeniu tłoka ($0 < x_{ZZ} \le d_2/4$) przekrój przepływowy jest określony wzorem:

$$A_{ZZ} = x_{ZZ} d_2 \pi \tag{32}$$

Lokalne natężenie przepływu w przekroju "vena contracta" jest określone różnicą ciśnień między komorą wejściową i wyjściową:

$$\dot{m}_{ZZ} = \alpha_{ZZ} A_{ZZ} \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_1 m_1}{V_1}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^2 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]$$
(33)

gdzie α_{ZZ} jest współczynnikiem kontrakcji strumienia.

5.3. Siły działające na rdzeń zaworu magnetycznego

Jeżeli wznios zaworu magnetycznego jest mały, ale zawór znajduje się w położeniu pośrednim, siła ograniczająca jest równa zeru:

$$F_{ZMogr} = 0 \tag{34}$$

Siła magnetyczna może zostać obliczona jako pochodna cząstkowa energii pola magnetycznego względem skoku rdzenia ze wzoru:

$$F_{ZM} = -\frac{\partial E_{ZM}}{\partial x_{ZM}} = \frac{\Theta^2}{2R_{\Sigma}^2} \frac{dR_{\Sigma}}{dx_{ZM}} = \frac{\left(NI_{ZM}\right)^2}{2R_{\Sigma}^2} \frac{dR_{\Sigma}}{dx_{ZM}}$$
(35)

gdzie Θ jest wymuszeniem (napięcie magnetyczne).

Obwód magnetyczny stanowią szeregowo połączone opory magnetyczne (patrz rysunki 3 i 5) określone oporem obudowy (R_{MO}), dławika (R_{MD}), rdzenia (R_{MR}) oraz szczelin powietrza między rdzeniem a obudową (R_{ML1}) i między dławikiem a rdzeniem (R_{ML2}). Jedyną składową zależną od położenia rdzenia jest opór R_{ML2} . Jest to zależność proporejonalna.

Po wprowadzeniu oznaczenia $R_{MS} = R_{MO} + R_{MD} + R_{MR} + R_{ML1}$ obejmującego wszystkie stałe składniki oporu magnetycznego, wzór określający opór magnetyczny obwodu przyjmuje postać:

$$R_{\Sigma} = R_{MS} + R_{ML2} = R_{MS} + \frac{x_{ZM}}{\mu_0 A_{MR}}$$
(36)

Rys. 5. Schemat obwodu magnetycznego w zaworze magnetycznym

Ponieważ jest to związek określony wyłącznie w funkcji przesunięcie rdzenia, pochodna względem X_{ZM} ma postać:

$$\frac{dR_{\Sigma}}{dx_{ZM}} = \frac{dR_{ML2}}{dx_{ZM}} = \frac{1}{\mu_0 A_{MR}}$$
(37)

5.4. Własności przepływowe zaworu magnetycznego

W trybie nominalnym przekrój przepływowy przy wypływie określony jest powierzchnią boczną walca:

$$A_{ZMwyp} = \pi x_{ZM} d_{ZMwyp} \tag{38}$$

natomiast przekrój przepływowy kanału wejściowego jest przekrojem kołowym:

$$A_{\rm ZMwe} = \pi \frac{d_{\rm ZMwe}^2}{4} \tag{39}$$

Zgodnie z założeniem Z9 ciśnienie w komorze sterującej jest wewnętrznym ciśnieniem panującym w zaworze magnetycznym. Wyjściowy strumień powietrza jest określony następującym równaniem algebraicznym:

$$\dot{m}_{ZMwy} = \dot{m}_{ZMwe} - \dot{m}_{ZMwyp} \tag{40}$$

Składniki równania (38) są określone wzorami:

$$\dot{m}_{ZMwyp} = \alpha_{ZMwyp} A_{ZMwp} \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_3 m_3}{V_3}} \left[\left(\frac{p_{ot}}{p_3} \right)^2 - \left(\frac{p_{ot}}{p_3} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]$$
(41)

$$\dot{m}_{ZMwe} = \alpha_{ZMwe} A_{ZMwe} \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p_1 m_1}{V_1} \left[\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^2 - \left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]}$$
(42)

gdzie α_{ZMwyp} i α_{ZMwe} są współczynnikami kontrakcji odpowiednio kanału wypływowego i wejściowego.

5.5. Zależności elektromagnetyczne

Indukcja magnetyczna solenoidu jest określona jako zależność między liczbą zwojów solenoidu a oporem magnetycznym:

$$L = \frac{N^2}{R_{\Sigma}}$$
(43)

Pochodna indukcji względem oporu magnetycznego określona jest wzorem:

$$\frac{dL}{dR_{\sigma}} = -\frac{N^2}{R_{\Sigma}^2} \tag{44}$$

6. PODSUMOWANIE

Układ równań (1)÷(44) stanowi model matematyczny analizowanego zaworu zabezpieczającego, spełniający przyjęte na wstępie warunki upraszczające. Składa się on z dwóch podstawowych części:

- Równań zachowania dotyczących masy, energii i pędu. Równania są ułożone dla sześciu wstępnie zdefiniowanych objętości kontrolnych. Równania zachowania są nieliniowymi równaniami różniczkowymi. Przedstawiony model zawiera jedenaście takich równań.
- Algebraicznej części modelu, zawierającego dodatkowe związki, które czynią model pełnym:
 - pierwsza część równań konstytutywnych zawiera równania niezbędne dla określenia własności powietrza, traktowanego jako gaz idealny oraz prawa przewodzenia ciepła,
 - druga część określa nieznane siły działające na tłok zaworu zabezpieczającego. Siły te związane są z ciśnieniami panującymi w poszczególnych komorach, równania umożliwiają również wprowadzenie sił ograniczających zależnych od przemieszczenia tłoka,

- trzecia część definiuje własności strumienia powietrza w zaworze zabezpieczającym łącznie z analizą przekrojów przepływowych i określeniem masowego natężenia przepływu,
- czwarta część definiuje nieznane siły działające w zaworze magnetycznym na jego rdzeń. Są to siły magnetyczne, jak również wstępnie przeanalizowane siły wynikające z ograniczenia przemieszczenia,
- piąta część definiuje własności strumienia powietrza w zaworze magnetycznym łącznie z analizą przekrojów przepływowych i określeniem masowego natężenia przepływu,
- szósta część określa zależności dotyczące własności magnetycznych umożliwiające wyznaczenie indukcji magnetycznej oraz jej pochodnych względem przemieszczenia rdzenia.

Należy przeprowadzić dokładną analizę poszczególnych stanów logicznych, czyli trybów pracy dla poszczególnych elementów systemu:

- równania zachowania energii w komorze wejściowej,
- równania zachowania energii w komorze sterującej,
- przekrojów przepływowych oraz sił ograniczających w zaworze zabezpieczającym,
- przekrojów przepływowych oraz sił ograniczających w zaworze magnetycznym,
- równania określającego przepływ (podkrytyczny lub podkrytyczny) w zaworze zabezpieczającym,
- równania określającego przepływ wejściowy w zaworze magnetycznym,
- równania określającego wypływ z zaworu magnetycznego.

O postaci równań opisujących poszczególne wielkości, których przełączanie czyni model modelem hybrydowym (analogowo-logicznym) decydują trzy grupy składników: – entalpia,

- przekroje przepływowe i siły ograniczające przemieszczenie,
- warunki przepływu powietrza (podkrytyczny lub nadkrytyczny).

Najdogodniejszym modelem służącym do analizy i zaprojektowania układu sterowania jest model w przestrzeni stanów. Pozwoli on na uwzględnienie nieliniowości zawartych w powyższych równaniach.

Proponowany do przyszłej analizy wektor stanu, oparty na wyprowadzonych równaniach zachowania, może mieć następującą postać:

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} m_1 & p_1 & m_2 & p_2 & m_3 & p_3 & x_{ZZ} & v_{ZZ} & x_{ZM} & v_{ZM} & I_{ZM} \end{bmatrix}^T$$

Wektor zakłóceń należy przyjąć jako:

$$z = \begin{bmatrix} \dot{m}_{SP} & T_{SP} & \dot{m}_{UH} & T_{ot} & p_{ot} \end{bmatrix}^{T},$$

a wektor sterowań:

$$\boldsymbol{u} = [U]$$

Wektor wyjść $y_w = [p_2]$ powinien zostać uzupełniony o wektor wielkości mierzonych:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & I_{ZM} & \lambda_{UH} \end{bmatrix}^T$$

gdzie λ_{UH} jest informacją dotyczącą występowania przepływu powietrza w układzie hamulcowym.

Równania stanu mają następującą postać:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, \mathbf{z}, r) + g(\mathbf{x})\mathbf{u}$$
$$\mathbf{y}_{w} = C\mathbf{x} + e(d)$$
$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{y}_{w}$$

LITERATURA

- Bassi M., 1996. Electronic Braking System. Present and Future Developments.
 In] IMechE Seminar Publication, Volume 16 of Symp. Electronic Braking Systems.
- [2] Feynman R.P., Leighton R. B., Sands M., 1970. Feynmana wykłady z fizyki. PWN Warszawa.
- [3] Kuszyński Z., Peszyński K., 2005. Identyfikacja wybranych elementów pneumatycznego układu zawieszenia wagonu. Międzynarodowa konf. nauk.-tech. Napędy i Sterowania Hydrauliczne i Pneumatyczne 2005, Wrocław, ISBN: 83-87982-41-6, 358-365.
- [4] Wang J., Pu J., Moore P., 1999. A Practical Control Strategy for Servo-Pneumatic Actuator Systems. Control Engineering Practice 7(12); 1483-1488.

PROTECTION VALVE ANALYSIS INCLUDING NONLINEAR PROPERTIES

Summary

Valves protected against excessive pressure increase in pneumatic systems are used, first of all, in braking systems both railway cars and heavy road vehicles. In the paper the mathematical model of this valve has been developed, including precisely defined simplified assumptions. The model obtained, after numerical values insertion, can be the subject of numerical modeling.

Key words: modeling, pneumatic systems, braking systems