

IZRAČUNAVANJE STACIONARNE AKSIJALNE SILE USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI U RAZVODNOM VENTILU

Dušan Gordić¹, Nebojša Jovičić, Vanja Šušteršić, Jelena Živanović²

Rezime: *Sila usled strujanja radne tečnosti nastaje zbog promene vektora količine kretanja pri strujanju radne tečnosti kroz kontrolnu zapreminu razvodnika. Stacionarna aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti deluje uvek u smeru zatvaranja prigušnog otvora, bez obzira na smer strujanja radne tečnosti. Kod razvodnika kod koga je protočna površina linearna funkcija hoda razvodnog klipa, za konstantan pad pritiska na prigušnom otvoru, ova sila se ponaša analogno otpornoj sili opruge. Vrednosti veličina i parametara koji figurišu u izrazu za izračunavanje vrednosti ove sile, vrlo je teško precizno odrediti. Najčešće istraživači pri analizi dinamike razvodnika, za njih uzimaju konstantne vrednosti (koje je dobio Von Mises). U radu je uzeta u obzir promena njihovih vrednosti sa promenom hoda razvodnog klipa, pri čemu su vrednosti veličina i parametara određivane na osnovu podataka Donga i Uena. Izračunavanje vrednosti stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti ovim modelom daje bolje rezultate, jer su izračunate vrednosti bliže odgovarajućim eksperimentalnim.*

Ključne reči: ventil, razvodni klip, sila usled strujanja radne tečnosti

CALCULATION OF STATIONARY AXIAL FLOW FORCE ON SPOOL VALVE

Abstract: *The flow force originated from the change of momentum of fluid through the spool valve control volume. The direction of stationary axial flow force is such that it always tends to close the valve port no matter the direction of fluid flow. This force acts analogously to resistive spring force at the directional control valve which spool orifices areas are linearly dependent on the spool movement, in the case of constant pressure drop at the orifice. It is very hard to determine the values of quantities and parameters from equation for the calculation of this force. Researchers usually take their constant values (obtained by Von Mises) for the analysis of dynamics of directional control valve. This paper takes into account their change with the spool movement where Dong and Ueno obtained the values of these quantities and parameters. Calculation of stationary axial flow force value using this model gives better results because obtained values are closer to experimental.*

Keywords: valve, spool, flow force

¹ Dr Dušan Gordić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, gordic@ptt.yu,

² Dr Nebojša Jovičić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, njovicic@knez.uis.kg.ac.yu
Mr Vanja Šušteršić, asistent, Mašinski fakultet Kragujevac, vanjas@knez.uis.kg.ac.yu
Jelena Živanović, dipl. inž, Mašinski fakultet Kragujevac

1. UVOD (10 PT BOLD)

Za izvođenje optimalne konstrukcije klipno-aksijalnog razvodnog ventila, neophodno je analizirati sile koje deluju na razvodni klip. Te sile, u zavisnosti od pravca delovanja, mogu da budu aksijalne i radikalne. Aksijalne sile deluju u pravcu radnog hoda klipa i one utiču na karakteristiku razvodnog ventila kao funkcije hoda razvodnog klipa. To su: pogonska sila, sila trenja, inercijalna sila i aksijalna komponenta sile usled strujanja radne tečnosti.

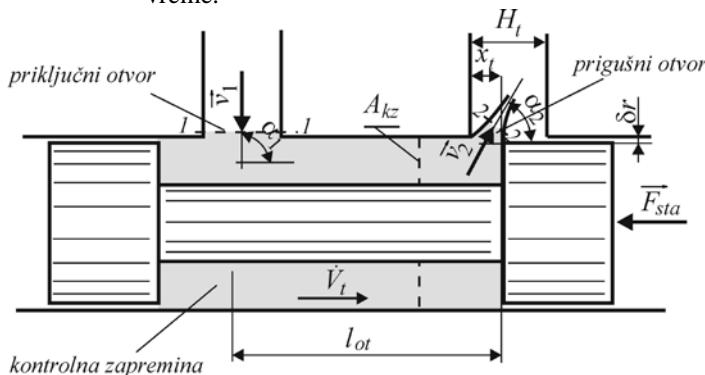
2. AKSIJALNA SILA USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI

Sila usled strujanja radne tečnosti nastaje zbog promene vektora količine kretanja, pri strujanju radne tečnosti kroz zapreminu koju čine prigušni otvor i komora razvodnika (kontrolna zapremina na sl. 1). Primenom zakona o promeni količine kretanja radne tečnosti na kontrolnu zapreminu sa sl. 1, uz pretpostavke neviskoznog, dvodimenzionalnog i bezvrtložnog strujanja radne tečnosti u kontrolnoj zapremini, za silu usled strujanja dobiće se izraz [1]:

$$F_{sta} = -\rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_1 \cdot \cos \alpha_1 + \rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_2 \cdot \cos \alpha_2 + \rho \cdot l_{ot} \cdot \frac{d\dot{V}_t}{dt}, \quad (1)$$

gde su:

F_{sta} [N]	- aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti,
ρ [kg/m ³]	- gustina radne tečnosti,
\dot{V}_t [m ³ /s]	- zapreminska struja kroz prigušni otvor na telu razvodnika,
v_1 [m/s]	- brzina radne tečnosti u ulaznom preseku 1 - priključnom otvoru,
v_2 [m/s]	- brzina radne tečnosti u izlaznom preseku 2 - prigušnom otvoru,
α_1 [rad]	- ugao skretanja radne tečnosti u ulaznom preseku 1,
α_2 [rad]	- ugao skretanja radne tečnosti u izlaznom preseku 2,
l_{ot} [m]	- rastojanje između priključnog i prigušnog otvora,
t [s]	- vreme.



Sl. 1 Određivanje aksijalne komponente sile usled strujanja radne tečnosti

Ugao skretanja radne tečnosti u ulaznom preseku 1 je $\alpha_1=90^\circ$. Ako se usvoje označbe za brzinu radne tečnosti u nazužem preseku strujanja u prigušnom otvoru v_t ($v_t = v_2$) i za ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru α_t ($\alpha_t = \alpha_2$), za silu F_{sta} se može pisati:

$$F_{sta} = \rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_t \cdot \cos \alpha_t + \rho \cdot l_{ot} \cdot \frac{d\dot{V}_t}{dt}. \quad (2)$$

Prvi sabirak sa leve strane izraza (2) predstavlja stacionarnu aksijalnu silu usled strujanja radne tečnosti - F_{sta_s} [N]:

$$F_{sta_s} = \rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_t \cdot \cos \alpha_t, \quad (3)$$

a drugi sabirak predstavlja nestacionarnu aksijalnu silu usled strujanja radne tečnosti - F_{sta_n} [N]:

$$F_{sta_n} = \rho \cdot l_{ot} \cdot \frac{d\dot{V}_t}{dt}. \quad (4)$$

3. STACIONARNA AKSIJALNA SILA USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI

Zavisnost između zapremskog protoka i pada pritiska radne tečnosti na prigušnom otvoru, definisana je izrazom [1]:

$$\dot{V}_t = K_t \cdot A_t \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p_t}, \quad (5)$$

gde su:

K_t [-] - koeficijent protoka,

A_t [m^2] - protočna površina prigušnog otvora,

Δp_t [Pa] - pad pritiska na prigušnom otvoru.

Za brzinu strujanja radne tečnosti u nazužem preseku strujanja prigušnog otvora, može se pisati [1]:

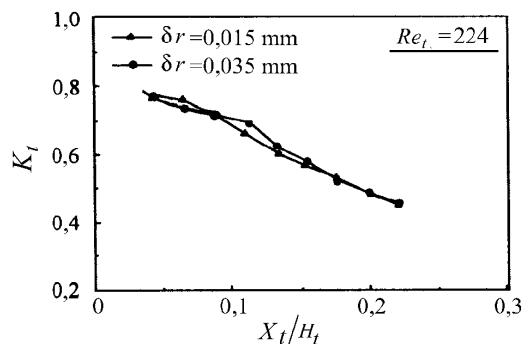
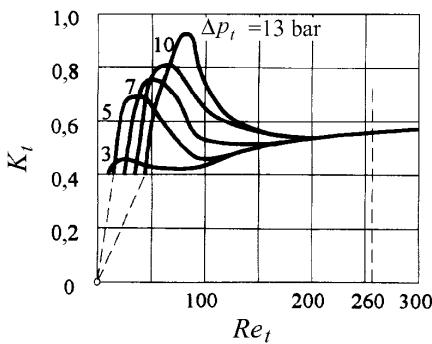
$$v_t = \frac{\dot{V}_t}{A_t \cdot K_c}, \quad (6)$$

gde je:

K_c [-] - koeficijent kontrakcije.

Ako se u (3), zamene izrazi za zapremski protok (5) i brzinu strujanja (6), dobiće se:

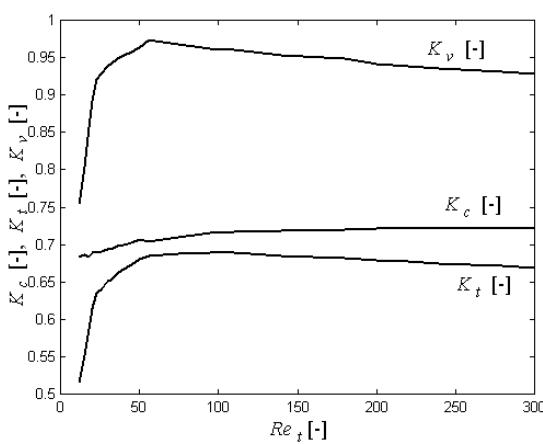
$$F_{sta_s} = 2 \cdot \frac{K_t^2}{K_c} \cdot A_t \cdot \cos \alpha_t \cdot \Delta p_t. \quad (7)$$



Sl. 2 Zavisnost koeficijenta protoka od režima strujanja radne tečnosti kroz prigušne otvore na telu razvodnika a) eksperimentalna zavisnost Hohlova, b) eksperimentalni podaci Donga i Uena

Za slučaj suprotnosmernog strujanja radne tečnosti u odnosu na smer prikazan na sl. 1, dobio bi se identičan rezultat. Stacionarna aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti uvek deluje u smeru zatvaranja prigušnog otvora, bez obzira na smer strujanja radne tečnosti. Kod razvodnika kod koga je protočna površina prigušnog otvora linearna funkcija hoda klipa (razvodnici sa pravougaonim i prstenastim prigušnim otvorom), za konstantan pad pritiska na prigušnom otvoru, ova sila ponaša se analogno otpornoj sili opruge.

Da bi za neki proizvoljni razvodni ventil izračunali vrednost ove sile, pored poznavanja geometrije - A_t , i pada pritiska - Δp_t , treba znati i vrednosti ostalih veličina koje figurišu u izrazu (7): koeficijenta protoka, koeficijenta kontrakcije i ugla skretanja radne tečnosti.



Sl. 3 Zavisnost koeficijenta protoka, brzinskog koeficijenta i koeficijenta kontrakcije od Rejnoldsovog broja [3]

turbulentni režim strujanja, za prigušne otvore kružnog poprečnog preseka sa oštrim ivicama. McCloy i Martin [2], predlažu određivanje koeficijenta protoka za pravougaoni prigušni otvor razvodnika, korišćenjem dijagrama za prigušni otvor sa oštim ivicama sa sl. 2. Istraživanja Hohlova pokazuju da koeficijent protoka ne zavisi samo od Rejnoldsovog broja - Re_t , definisanog izrazom [2]:

$$Re_t = \frac{\dot{V}_t}{d_k \cdot \pi \cdot v} \text{ - za prstenasti i } Re_t = \frac{\dot{V}_t}{f_t \cdot v} \text{ - za pravougaoni prigušni otvor,} \quad (10)$$

gde su:

d_k [m] - prečnik razvodnog klipa,

f_t [m] - širina pravougaonog otvora na telu razvodnika,

x_t [m] - dužina prigušnog otvora na telu razvodnika,

već i od pada pritiska na prigušnom otvoru (sl. 2 - a). Eksperimentalni i numerički rezultati Donga i Uena [3], pokazuju da vrednost koeficijenta protoka značajno opada povećanjem dužine prigušnog otvora (sl. 2 - b), pri čemu se sa dijagrama vidi da je taj pad relativno nezavisno od radijalnog zazora na klipu.

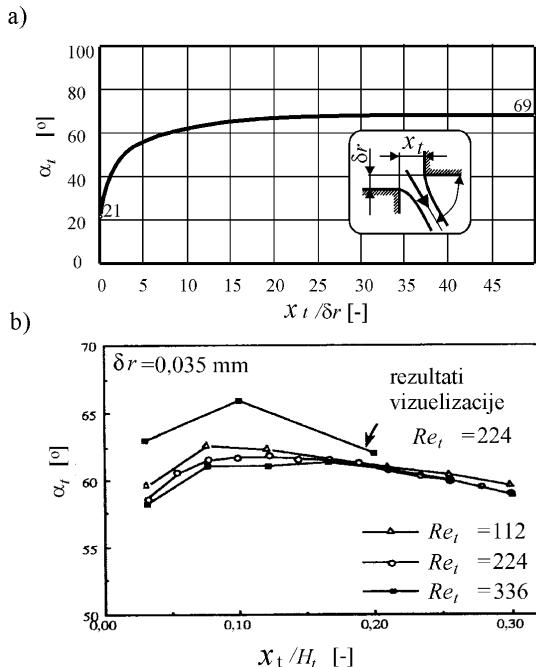
Von Mises je teorijskim putem utvrdio da koeficijent kontrakcije ima vrednost od 0,673 za male prigušne otvore na telu razvodnog klipa [2]. Numerički rezultati Donga i Uena

Na temu određivanja zavisnosti koeficijenta protoka prigušnih otvora razvodnika od režima strujanja, obavljen je veliki broj teorijskih i eksperimentalnih istraživanja. I pored toga dosta je još nepoznato, jer veliki broj pojava i veličina utiče na njegovu vrednost (oblik prigušnog otvora, smer strujanja radne tečnosti kroz prigušni otvor, veličina radijalnog zazora, hod razvodnog klipa, pad pritiska na prigušnom otvoru, itd). Sve to ima za posledicu da se izrazi i dijagrami koji definišu zavisnost koeficijenta protoka od režima strujanja značajno razlikuju. Još je 1917. godine Von Mises [1] analitički odredio da je vrednost koeficijenta protoka $K_t = 0,611$ za

[3], daju funkcionalne zavisnosti promene brzinskog koeficijenta K_v i koeficijenta protoka K_t od Rejnoldsovog broja za prstenasti prigušni otvor na telu razvodnika. Koristeći njihove rezultate i uzimajući u obzir da je [4]:

$$K_c = \frac{K_t}{K_v}, \quad (11)$$

može se indirektno dobiti funkcionalna zavisnost koeficijenta kontrakcije od Rejnoldsovog broja, prikazana na sl. 3.



Sl. 4 Različite grafičke zavisnosti za određivanje ugla skretanja radne tečnosti u funkciji geometrije razvodnika

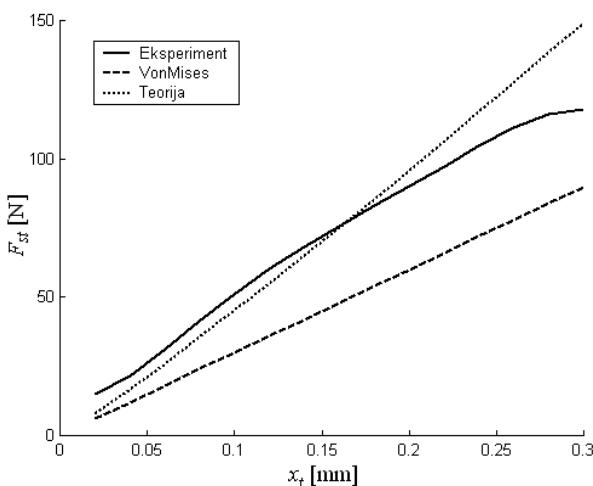
Prepostavljajući bezvrtložno strujanje, neviskozne i nestišljive radne tečnosti, Von Mises je utvrdio da je ugao skretanja $\alpha_t = 69^\circ$, za slučaj pravougaonog upravljačkog prigušnog otvora sa svim oštrim ivicama, čija je dužina mala u poređenju sa ostalim dimenzijama komora ispred i iza otvora, i kada nema radijalnog zazora između klipa i tela razvodnika (čaure) [1]. U slučaju da su ivice upravljačkog prigušnog otvora zaobljene, primećeno je da se vrednost ugla skretanja smanjuje, ali nije utvrđena funkcionalna veza između ugla skretanja i radiusa zaobljenja. Uticaj radijalnog zazora na vrednost ugla skretanja je prikazan na sl. 4-a [1]. Vrednost ugla skretanja se kreće od 21° - za male relativne dužine otvora na telu razvodnika, do 69° - za velike relativne dužine otvora na telu razvodnika. Numerička analiza Donga i Uena [3] (sl. 4-b), pokazuje slične trendove, ali su ovde izračunate vrednosti uglova skretanja nešto manje. Rezultati njihove analize pokazuju praktičnu nezavisnost ugla α_t od režima strujanja, definisanog Re_t brojem.

4. IZRAČUNAVANJE STACIONARNE AKSIJALNE SILE USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI

Pri izračunavanju vrednosti stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti, istraživači najčešće koriste konstantne vrednosti: za ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika $\alpha_t = 69^\circ$, koeficijent protoka $K_t = 0,611$ i koeficijent kontrakcije $K_c = 0,673$, koje je dao Von Mises [2]. U ovom radu su pri izračunavanju vrednosti stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti uzete u obzir varijacije ugla skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika, koeficijenta protoka i koeficijenta kontrakcije sa promenom hoda razvodnog klipa. Korišćeni su podaci Donga i Uena [3]: za ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika - dijagram sa slike 4-b, za koeficijent

protoka - dijagram sa slike 2-b i za koeficijent kontrakcije dijagram sa slike 3-b.

Uzimajući sve navedeno u obzir, napisan je odgovarajući program korišćenjem programskog paketa MatLab 5.3, u kojem je računata vrednost stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti kada su ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika, koeficijent protoka i koeficijent kontrakcije konstantni (model Von Mises) i promenljivi (model Teorija) [4]. Oba modela su poređena sa odgovarajućim eksperimentalnim podacima G. Geisler [5]. Merenja su vršena na razvodniku sa prstenastim prigušnim otvorom, kod koga je prečnik razvodnog klipa $d_k = 12 \text{ mm}$ i širina priključnog otvora $H_t = 10 \text{ mm}$. Pad pritiska na prigušnom otvoru razvodnika je održavan u konstantnom iznosu od 200 bar. Za vreme merenja položaj razvodnog klipa (dužina prigušnog otvora) se menjao i merena je vrednost stacionarne aksijalne komponente sile usled strujanja radne tečnosti.



Sl. 5 Uporedna analiza različitih modela za izračunavanje stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti

5. ZAKLJUČAK

Rezultati uporedne analize prikazani su na slici 5. Zavisnost stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti od dužine prigušnog otvora na telu razvodnika koja odgovara modelu Teorija, ima daleko manja odstupanja od eksperimentalne zavisnosti u odnosu na zavisnost koja odgovara modelu Von Mises. Može se zaključiti da izračunavanje stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti kada su ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika, koeficijent protoka i koeficijent kontrakcije promenljivi, daje znatno bolje rezultate nego kada su prethodno navedene veličine konstantne.

6. LITERATURA

- [1] Merritt E. Herbert, *Hydraulic Control Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [2] Gordić D., *Analiza dvostepenih elektrohidrauličnih servovrazvodnika sa povratnom spregom po položaju razvodnog klipa*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2002.

Izračunavanje stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti u razvodnom ventilu

- [3] Dong X., Ueno H., *Flows and Flow Characteristics of Spool Valve*, Proc.of the Forth JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo '99, Japan, 15-17 November, 1999.
- [4] Živanović Jelena, *Stacionarna aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti i metodi njene kompenzacije*, diplomski rad, Mašinski fakultet Kragujevac, 2003.
- [5] Geisler G., *Flow force coefficient – A Basic for Valve Analysis*, Power Transmission and Motion Control PTMC' 98, 1998.

IZRAČUNAVANJE STACIONARNE AKSIJALNE SILE USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI U RAZVODNOM VENTILU

Dušan Gordić¹, Nebojša Jovičić, Vanja Šušteršić, Jelena Živanović²

Rezime: Sila usled strujanja radne tečnosti nastaje zbog promene vektora količine kretanja pri strujanju radne tečnosti kroz kontrolnu zapreminu razvodnika. Stacionarna aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti deluje uvek u smjeru zatvaranja prigušnog otvora, bez obzira na smjer strujanja radne tečnosti. Kod razvodnika kod koga je protočna površina linearna funkcija hoda razvodnog klipa, za konstantan pad pritisaka na prigušnom otvoru, ova sila se ponaša analogno otpornoj sili opruge. Vrednosti veličina i parametara koji figurisu u izrazu za izračunavanje vrednosti ove sile, vrlo je teško precizno odrediti. Najčešće istraživači pri analizi dinamike razvodnika, za njih uzimaju konstantne vrednosti (koje je dobio Von Mises). U radu je uzeta u obzir promena njihovih vrednosti sa promenom hoda razvodnog klipa, pri čemu su vrednosti veličina i parametara određivane na osnovu podataka Donga i Uena. Izračunavanje vrednosti stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti ovim modelom daje bolje rezultate, jer su izračunate vrednosti bliže odgovarajućim eksperimentalnim.

Ključne reči: ventil, razvodni klip, sila usled strujanja radne tečnosti

CALCULATION OF STATIONARY AXIAL FLOW FORCE ON SPOOL VALVE

Abstract: The flow force originated from the change of momentum of fluid through the spool valve control volume. The direction of stationary axial flow force is such that it always tends to close the valve port no matter the direction of fluid flow. This force acts analogously to resistive spring force at the directional control valve which spool orifices areas are linearly dependent on the spool movement, in the case of constant pressure drop at the orifice. It is very hard to determine the values of quantities and parameters from equation for the calculation of this force. Researchers usually take their constant values (obtained by Von Mises) for the analysis of dynamics of directional control valve. This paper takes into account their change with the spool movement where Dong and Ueno obtained the values of these quantities and parameters. Calculation of stationary axial flow force value using this model gives better results because obtained values are closer to experimental.

Keywords: valve, spool, flow force

¹ Dr Dušan Gordić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, gordic@ptt.yu,

² Dr Nebojša Jovičić, docent, Mašinski fakultet Kragujevac, njovicic@knez.uis.kg.ac.yu

Mr Vanja Šušteršić, asistent, Mašinski fakultet Kragujevac, vanjas@knez.uis.kg.ac.yu

Jelena Živanović, dipl.inž, Masinski fakultet Kragujevac

1. UVOD

Za izvođenje optimalne konstrukcije klipno-aksijalnog razvodnog ventila, neophodno je analizirati sile koje deluju na razvodni klip. Te sile, u zavisnosti od pravca delovanja, mogu da budu aksijalne i radijalne. Aksijalne sile deluju u pravcu radnog hoda klipa i one utiču na karakteristiku razvodnog ventila kao funkcije hoda razvodnog klipa. To su: pogonska sila; sila trenja, inercijalna sila i aksijalna komponenta sile usled strujanja radne tečnosti.

2. AKSIJALNA SILA USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI

Sila usled strujanja radne tečnosti nastaje zbog promene vektora količine kretanja, pri strujanju radne tečnosti kroz zapreminu koju čine prigušni otvor i komora razvodnika (kontrolna zapremina na sl. 1). Primenom zakona o promeni količine kretanja radne tečnosti na kontrolnu zapreminu sa sl. 1, uz pretpostavke neviskoznog, dvodimenzionalnog i bezvrtložnog strujanja radne tečnosti u kontrolnoj zapremini, za silu usled strujanja dobije se izraz [1]:

$$F_{sta} = -\rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_1 \cdot \cos \alpha_1 + \rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_2 \cdot \cos \alpha_2 + \rho \cdot l_{ot} \cdot \frac{dV_t}{dt}, \quad (1)$$

gde su:

F_{sta} [N]
 ρ [kg/m^3]

\dot{V}_t [m^3/s]

v_1 [m/s]

v_2 [m/s]

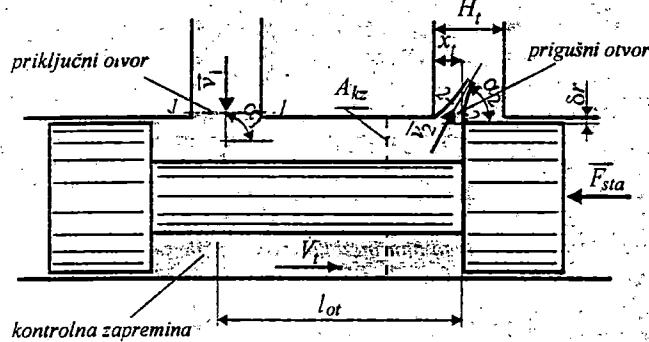
α_1 [rad]

α_2 [rad]

l_{ot} [m]

t [s]

- aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti,
- gustina radne tečnosti,
- zapreminski protok kroz prigušni otvor na telu razvodnika,
- brzina radne tečnosti u ulaznom preseku 1 - priključnom otvoru,
- brzina radne tečnosti u izlaznom preseku 2 - prigušnom otvoru,
- ugao skretanja radne tečnosti u ulaznom preseku 1,
- ugao skretanja radne tečnosti u izlaznom preseku 2,
- rastojanje između priključnog i prigušnog otvora,
- vreme:



Sl. 1 Određivanje aksijalne komponente sile usled strujanja radne tečnosti

Ugao skretanja radne tečnosti u ulaznom preseku 1 je $\alpha_1 = 90^\circ$. Ako se usvoje oznake za brzinu radne tečnosti u najužešem preseku strujanja u prigušnom otvoru v_2 ($v_1 = v_2$) i za ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru α_2 ($\alpha_1 = \alpha_2$), za silu F_{sta} se može pisati:

$$F_{sta} = \rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_1 \cdot \cos \alpha_1 + \rho \cdot l_{ot} \cdot \frac{dV_t}{dt}. \quad (2)$$

Prvi sabirak sa leve strane izraza (2) predstavlja stacionarnu aksijalnu silu usled strujanja radne tečnosti - $F_{sta s}$ [N]:

$$F_{sta s} = \rho \cdot \dot{V}_t \cdot v_1 \cdot \cos \alpha_1, \quad (3)$$

a drugi sabirak predstavlja nestacionarnu aksijalnu silu usled strujanja radne tečnosti - $F_{sta n}$ [N]:

$$F_{sta n} = \rho \cdot l_{ot} \cdot \frac{dV_t}{dt}. \quad (4)$$

3. STACIONARNA AKSIJALNA SILA USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI

Zavisnost između zapreminskega protoka i pada pritiska radne tečnosti na prigušnom otvoru definisana je izrazom [1]:

$$\dot{V}_t = K_t \cdot A_t \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_t}, \quad (5)$$

gde su:

K_t [-] - koeficijent protoka,

A_t [m^2] - protočna površina prigušnog otvora,

Δp_t [Pa] - pad pritiska na prigušnom otvoru.

Za brzinu strujanja radne tečnosti u najužešem preseku strujanja prigušnog otvora, može se pisati [1]:

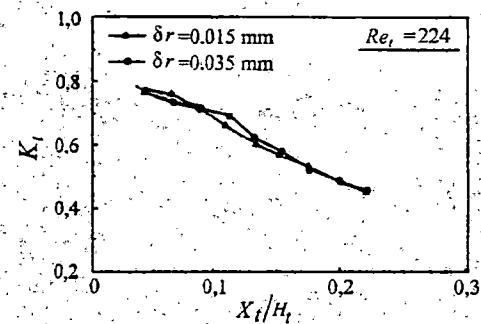
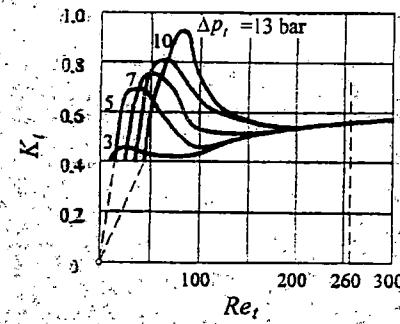
$$v_t = \frac{\dot{V}_t}{A_t \cdot K_c}, \quad (6)$$

gde je:

K_c [-] - koeficijent kontrakcije.

Ako se u (3), zamene izrazi za zapreminski protok (5) i brzinu strujanja (6), dobije se:

$$F_{sta s} = 2 \cdot \frac{K_t^2}{K_c} \cdot A_t \cdot \cos \alpha_1 \cdot \Delta p_t. \quad (7)$$

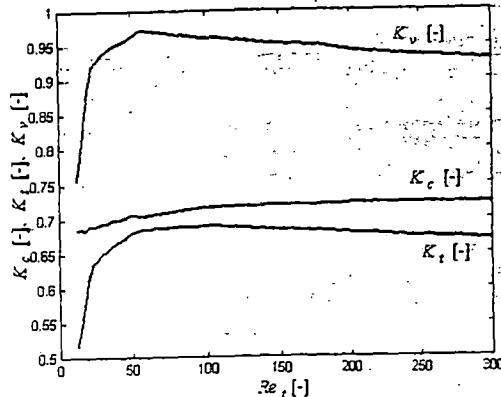


Sl. 2 Zavisnost koeficijenta protoka od režima strujanja radne tečnosti kroz prigušne otvore na telu razvodnika a) eksperimentalna zavisnost Hohlova, b) eksperimentalni podaci Donga i Uena

Za slučaj suprotnosmernog strujanja radne tečnosti u odnosu na smer prikazan na sl. 1, dobio bi se identičan rezultat. Stacionarna aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti uvek

deluje u smeru zatvaranja prigušnog otvora, bez obzira na smer strujanja radne tečnosti. Kod razvodnika kod koga je protočna površina prigušnog otvora linearna funkcija hoda klipa (razvodnici sa pravougaonim i prstenastim prigušnim otvorom), za konstantan pad pritiska na prigušnom otvoru, ova sila ponaša se analogno otpornoj sili opuge.

Daći bi za neki proizvoljni razvodni ventil izračunali vrednost ove sile, pored poznavanja geometrije - A , i pada pritiska - Δp , treba znati i vrednosti ostalih veličina koje figurišu u izrazu (7): koeficijenta protoka; koeficijenta kontrakcije i ugla skretanja radne tečnosti.



Sl. 3 Zavisnost koeficijenta protoka, brzinskog koeficijenta i koeficijenta kontrakcije od Rejnoldsovog broja [3]

otvore kružnog poprečnog preseka sa oštrim ivicama. McCloy i Martin [2], predlažu određivanje koeficijenta protoka za pravougaoni prigušni otvor razvodnika, korišćenjem dijagrama za prigušni otvor sa oštim ivicama sa sl. 2. Istraživanja Hohlova pokazuju da koeficijent protoka ne zavisi samo od Rejnoldsovog broja - Re ; definisanog izrazom [2]:

$$Re_t = \frac{\dot{V}_t}{d_k \cdot \pi \cdot v} - \text{za prstenasti i } Re_t = \frac{\dot{V}_t}{f_t \cdot v} - \text{za pravougaoni prigušni otvor}, \quad (10)$$

gde su:

d_k [m] - prečnik razvodnog klipa;

f_t [m] - širina pravougaonog otvora na telu razvodnika,

x_t [m] - dužina prigušnog otvora na telu razvodnika,

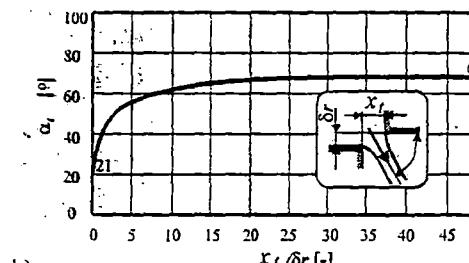
već i od pada pritiska na prigušnom otvoru (sl. 2 - a). Eksperimentalni i numerički rezultati Donga i Uena [3], pokazuju da vrednost koeficijenta protoka značajno opada povećanjem dužine prigušnog otvora (sl. 2 - b), pri čemu se sa dijagrama vidi da je taj pad relativno nezavisan od radijalnog zazora na klipu.

Von Mises je teorijskim putem utvrđio da koeficijent kontrakcije ima vrednost od 0,673 za male prigušne otvore na telu razvodnog klipa [2]. Numerički rezultati Donga i Uena [3], daju funkcionalne zavisnosti promene brzinskog koeficijenta K_c i koeficijenta protoka K_t od Rejnoldsovog broja za prstenasti prigušni otvor na telu razvodnika. Koristeći njihove rezultate i uzimajući u obzir da je [4]:

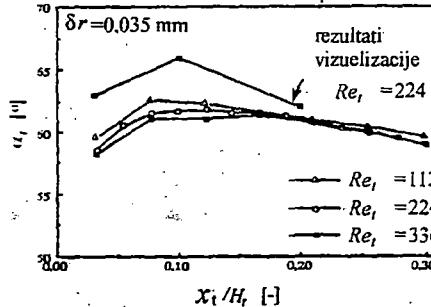
$$K_c = \frac{K_t}{K_v}, \quad (11)$$

može se indirektno dobiti funkcionalna zavisnost koeficijenta kontrakcije od Rejnoldsovog broja, prikazana na sl. 3.

a)



b)



Sl. 4 Različite grafičke zavisnosti za određivanje ugla skretanja radne tečnosti u funkciji geometrije razvodnika

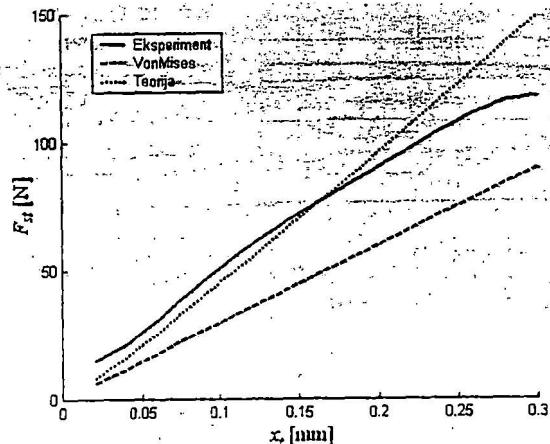
Pretpostavljajući bezvrtložno strujanje, neviskozne i nestišljive radne tečnosti, Von Mises je utvrđio da je ugao skretanja $\alpha_t = 69^\circ$, za slučaj pravougaonog upravljačkog prigušnog otvora sa svim oštim ivicama, čija je dužina mala u poređenju sa ostalim dimenzijama komora ispred i iza otvora, i kada nema radijalnog zazora između klipa i tela razvodnika (čaure) [1]. U slučaju da su ivice upravljačkog prigušnog otvora zaobljene, primećeno je da se vrednost ugla skretanja smanjuje, ali nije utvrđena funkcionalna veza između ugla skretanja i radijusa zaobljenja. Uticaj radijalnog zazora na vrednost ugla skretanja je prikazan na sl. 4 - a [1]. Vrednost ugla skretanja se kreće od 21° - za male relativne dužine otvora na telu razvodnika, do 69° - za velike relativne dužine otvora na telu razvodnika. Numerička analiza Donga i Uena [3] (sl. 4-b), pokazuje slične trendove, ali su ovde izračunate vrednosti ugla skretanja nešto manje. Rezultati njihove analize pokazuju praktičnu nezavisnost ugla α_t od režima strujanja, definisanog Re_t brojem..

4. IZRAČUNAVANJE STACIONARNE AKSIJALNE SILE USLED STRUJANJA RADNE TEČNOSTI

Pri izračunavanju vrednosti stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti, istraživači najčešće koriste konstantne vrednosti: za ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika $\alpha_t = 69^\circ$, koeficijent protoka $K_t = 0,611$ i koeficijent kontrakcije $K_c = 0,673$, koje je dao Von Mises [2]. U ovom radu su pri izračunavanju vrednosti stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti uzete u obzir varijacije ugla skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika, koeficijenta protoka i koeficijenta kontrakcije sa promenom hoda razvodnog klipa. Korišćeni su podaci Donga i Uena [3]: za ugao skretanja, radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika - dijagram sa slike 4-b, za koeficijent protoka - dijagram sa slike 2-b i za koeficijent kontrakcije dijagram sa slike 3-b.

Uzimajući sve navedeno u obzir, napisan je odgovarajući program korišćenjem programskog paketa Matlab 5.3, u kojem je računata vrednost stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti kada su ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu

razvodnika, koeficijent protoka i koeficijent kontrakcije konstantni (model Von Mises) i promenljivi (model Teorija) [4]. Oba modela su poređena sa odgovarajućim eksperimentalnim podacima G. Geisler [5]. Merenja su vršena na razvodniku sa prstenastim prigušnim otvorom, kod koga je prečnik razvodnog klipa $d_k = 12 \text{ mm}$ i širina priključnog otvora $H_t = 10 \text{ mm}$. Pad pritiska na prigušnom otvoru razvodnika je održavan u konstantnom iznosu od 200 bar. Za vreme merenja položaj razvodnog klipa (dužina prigušnog otvora) se menjao i merena je vrednost stacionarne aksijalne komponente sile usled strujanja radne tečnosti.



Sl. 5 Uporedna analiza različitih modela za izračunavanje stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti.

5. ZAKLJUČAK

Rezultati uporedne analize prikazani su na slici 5. Zavisnost stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti od dužine prigušnog otvora na telu razvodnika koja odgovara modelu Teorija, ima daleko manja odstupanja od eksperimentalne zavisnosti u odnosu na zavisnost koja odgovara modelu Von Mises. Može se zaključiti da izračunavanje stacionarne aksijalne sile usled strujanja radne tečnosti kada su ugao skretanja radne tečnosti u prigušnom otvoru na telu razvodnika, koeficijent protoka i koeficijent kontrakcije promenljivi, daje znatno bolje rezultate nego kada su prethodno navedene veličine konstantne.

LITERATURA

- [1] Merritt E. Herbert, *Hydraulic Control Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [2] Gordić D., *Analiza dvostepenih elektrohidrauličnih servorazvodnika sa povratnom spregom po položaju razvodnog klipa*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2002.
- [3] Dong X., Ueno H., *Flows and Flow Characteristics of Spool Valve*, Proc.of the Forth JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo '99, Japan, 15-17 November, 1999.
- [4] Živanović Jelena, *Stacionarna aksijalna sila usled strujanja radne tečnosti i metodi njene kompenzacije*, diplomski rad, Mašinski fakultet Kragujevac, 2003.
- [5] Geisler G., *Flow force coefficient – A Basic for Valve Analysis*, Power Transmission and Motion Control PTMC '98, 1998.