

Analiza sistema upravljanja i regulacije Mahovog broja aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva u transsoničnoj oblasti brzina

Mr Borivoj Bliznac, dipl. inž. ¹⁾

Analiza sistema upravljanja i regulacije Mahovog broja u transsoničnoj oblasti brzina daje jednačine koje se koriste za formiranje programa koji omogućavaju praćenje procesa za uspostavljene uslove strujanja vazduha u sistemu. Razvijeni programi se koriste za dobijanje kalibracionih krivih za feedforward upravljanje i regulaciju Mahovog broja u radnom delu aerotunela. Sistem odsisavanja vazduha iz komore transsoničnog radnog dela i ejektorski sistem čine hardversku realizaciju sistema upravljanja i regulacije Mahovog broja u aerotunelu. Procesi strujanja vazduha u ova dva sistema su analizirani korišćenjem teorije za jednodimenzionalno kompresibilno strujanje vazduha.

Ključne reči: Sistem odsisavanja, ejektorski sistem, Mahov broj.

Korišćene oznake i simboli

A_i	– površina poprečnog preseka m^2 ,
C_v	– bezdimenzionalni strujni koeficijent ventila,
D	– prečnik cevi m ,
f	– faktor prigušenja- trenja
F	– opšta funkcija uticaja - mešanja struja vazduha,
g_c	– funkcija karakteristike prigušenog strujanja vazduha kroz ventil,
g_u	– funkcija karakteristike neprigušenog strujanja vazduha kroz ventil,
g_x	– funkcija granične vrednosti odnosa pritiska ventila,
$P_{0,i}$	– zaustavni pritisci u određenim tačkama sistema, N/m^2 ,
K_i	– faktor pada pritiska,
k_z	– koeficijent perforiranog zida,
l_i	– dužine cevnih vodova, m ,
M	– Mahov broj,
\dot{m}_1	– količina odsisane mase vazduha, kg/s ,
\dot{m}_2	– količina mase vazduha ejektora, kg/s ,
\dot{m}_3	– ukupna količina mase vazduha u sistemu odsisavanja i ejekcije, kg/s ,
P_i	– statički pritisak, N/m^2 ,
q_i	– dinamički pritisak, N/m^2 ,
Q_z	– karakteristika perforiranog zida,
R	– gasna konstanta za vazduh,
T_i	– temperatura, K ,
v_i	– brzina, m/s ,
x	– razlika pritiska na ventilu,
x_T	– limitirana vrednost razlike pritiska na ventilu,
Y	– ekspanzioni faktor ventila,
κ	– izentropska konstanta, za vazduh, $\kappa=1.4$,
ρ_i	– gustina vazduha, kg/m^3 ,
χ	– faktor prigušenja,
ϕ	– otvorenost leptirastog ventila, $^\circ$,

K_p	– koeficijent odsisavanja, %,
RVO	– regulacioni ventil odsisavanja,
EV	– ejektorski ventil,
TRD	– transsonični radni deo.

Indeksi

1	– ulaz u RVO,
2	– izlaz iz RVO,
3	– ravan- presek mešanja vazдушnih struja \dot{m}_1 i \dot{m}_2 ,
4	– ulaz u EV,
5	– izlaz iz EV,
6	– ulaz u mlaznicu,
7	– izlaz iz mlaznice,
8	– ulaz u difuzor,
9	– izlaz iz difuzora,
10	– izlazni presek- atmosfera,
e	– efektivno,
θ	– zaustavno-a,
RD	– radni deo,
∞	– slobodna- neporemećena struja vazduha,
KO	– komora odsisavanja,
R	– rezervoari za vazduh.

Uvod

SISTEM upravljanja i regulacije Mahovog broja, aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva u aerodinamičkom smislu može se opisati na sledeći način:

- Zbog promene napadnog ugla modela u okozvučnom radnom delu, iza modela se javlja vrtložni trag koji smanjuje protočni kapacitet drugog grla, smanjujući maseni protok vazduha kroz drugo grlo \dot{m}_{DG} ;
- Kao posledica smanjenja \dot{m}_{DG} postoji tendencija povećanja P_∞ (uz pretpostavku da su P_0 i T_0 konstantni) i smanjenja \dot{m}_∞ i M_∞ ;

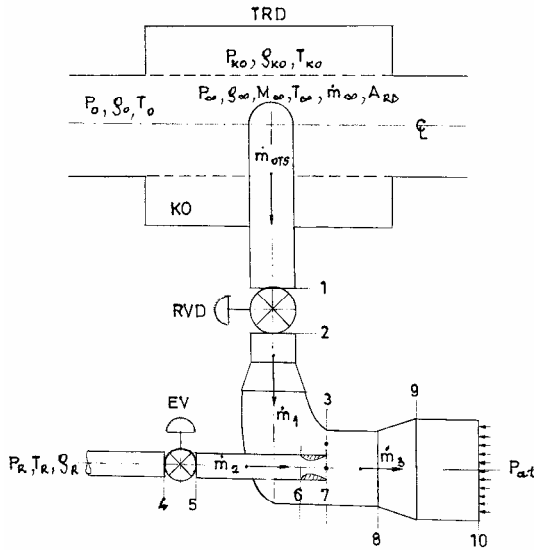
¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

– Da bi se održao potreban \dot{m}_∞ , kao i M_∞ , mora se povećati protok mase vazduha iz komore odsisavanja \dot{m}_{OTS} , što se postiže, otvaranjem regulacionog ventila odsisavanja.

Za definisanje sistema upravljanja i regulacije Mahovog broja potrebno je da se uspostavi funkcionalna zavisnost između M_∞ , \dot{m}_{DG} i položaja *RVO*.

Analiza sistema

Na šematskom prikazu sistema odsisavanja vazduha iz komore odsisavanja radnog dela aerotunela i ejektorskog sistema (sl.1), prikazani su presecci, označeni kao u indeksaciji.



Slika 1. Šematski prikaz sistema odsisavanja vazduha iz transsoničnog radnog dela aerotunela

Rešenje ovog sistema implicira rešavanje jednačina protoka vazduha kroz svaki segment cevodova. Protok mase vazduha mora zadovoljiti granične uslove u radnom delu aerotunela i u izlaznoj ravni-preseku, pri čemu se koristi iterativni postupak. Jednačine se koriste za upravljanje strujom vazduha u svakom segmentu do samog izlaza u atmosferu.

Radni deo - komora odsisavanja

Karakteristike radnog dela i komore odsisavanja aerotunela se koriste da bi se odredili uslovi odsisavanja i izlaz iz komore odsisavanja. Uslovi rada aerotunela su specificirani zavisno od P_0 , T_0 , M_∞ i koeficijenta odsisavanja K_p .

Izentropsko strujanje vazduha u sistemu se podrazumeva. Statički pritisak u radnom delu se dobija iz relacije:

$$P_\infty = P_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_\infty^2\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} \quad (1)$$

Maseni protok vazduha kroz radni deo aerotunela prikazan je izrazom:

$$\dot{m}_\infty = A_{RD} \rho_\infty v_\infty \quad (2)$$

Jednačinama:

$$\rho_\infty = \rho_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_\infty^2\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}}$$

$$T_\infty = T_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_\infty^2\right)^{-1}$$

$$v_\infty = M_\infty a_\infty$$

$$a_\infty = \sqrt{\kappa R T_\infty}$$

$$P_0 = \rho_0 R T_0$$

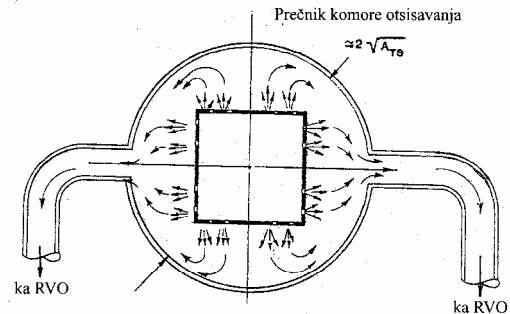
dobija se:

$$\dot{m}_\infty = A_{RD} P_0 \sqrt{\frac{\kappa}{R T_0}} \frac{M_\infty}{\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_\infty^2\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}} \quad (3)$$

Maseni protok vazduha kroz sistem za odsisavanje se dobija na osnovu specificiranog procenta odsisavanja K_p .

Ako postoje dva izlazna cevodova iz komore odsisavanja, kako je to prikazano na sl.2, sa obe strane, tada postoji za jednu izlaznu stranu, jedan izlazni cevod:

$$\dot{m}_1 = \frac{K_p}{2} \dot{m}_\infty \quad (4)$$



Slika 2. Lateralna struja vazduha u komori odsisavanja

Pritisak u komori odsisavanja je određen karakteristikom perforiranih zidova radnog dela. Karakteristike perforiranih zidova su opisane empirijskom relacijom [4] u linearizovanoj formi:

$$\frac{P_\infty - P_{KO}}{q_\infty} = k_z \frac{A_{RD}}{A_z} K_p - Q_z \quad (5)$$

gde su k_z i Q_z konstante koje zavise od geometrije perforiranog zida.

Iz (5) se dobija:

$$P_{KO} = P_\infty - \frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2 \left(k_z \frac{A_{RD}}{A_z} K_p - Q_z \right) \quad (6)$$

Veza komore odsisavanja i regulacionog ventila za odsisavanje vazduha

Veza *KO* i *RVO* je vrlo kratka. Ukupni pad pritiska se dobija za oštru ivicu na izlazu iz *KO* i koleno pod 90°.

Pad pritiska je proporcionalan referentnom dinamičkom pritisku, tako da je:

$$P_{KO} = P_{0,1} + k_{KO,1} q_{ref} \quad (7)$$

Faktor pada pritiska $k_{KO,1}$ je određen za dužinu i konfiguraciju cevovoda.

Referentni dinamički pritisak q_{ref} je određen izrazom:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\dot{m}_1}{A_{KO,1}} \right)^2$$

Ako se pretpostavi da je $\rho = \rho_0$, zaustavna gustina je definisana relacijom:

$$\rho = \rho_0 = \left(\frac{P_{KO} + P_{0,1}}{2} \right) \frac{1}{RT_0}$$

Isto je:

$$P_{0,1} = \left[P_{KO}^2 - k_{KO,1} RT_0 \left(\frac{\dot{m}_1}{A_{KO,1}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$A_{KO,1}$ je (srednja) vrednost površine poprečnog preseka cevovoda od KO do preseka 1.

Mahov broj, statički pritisak i statička temperatura u preseku 1 se dobijaju korišćenjem iterativne metode.

Usvajeno je da se radi o subsoničnom strujanju vazduha, tj da je $0 \leq M_1 \leq 1$.

Za rešavanje ovog slučaja koristi se metoda dva krajnja slučaja, tj. $(M_1)_{min} = 0$ i $(M_1)_{max} = 1$.

Sada je:

$$\hat{M}_1 = \frac{1}{2} [(M_1)_{min} + (M_1)_{max}] \quad (8)$$

Proračunski maseni protok vazduha $(\dot{m}_1)_{pro}$ se dobija izrazom:

$$(\dot{m}_1)_{pro} = A_1 \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0}} P_{0,1} \frac{\hat{M}_1}{\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \hat{M}_1^2\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}} \quad (9)$$

Ako je $\frac{|(\dot{m}_1)_{pro} - \dot{m}_1|}{\dot{m}_1} <$ od dozvoljenog i $M_1 = \hat{M}_1$, tada se mogu uspostaviti uslovi:

$$(\dot{m}_1)_{pro} \langle \dot{m}_1 \rightarrow (M_1)_{min} = \hat{M}_1$$

$$(\dot{m}_1)_{pro} \rangle \dot{m}_1 \rightarrow (M_1)_{max} = \hat{M}_1$$

Korišćenjem prethodno određenog \hat{M}_1 mogu da se dobiju relacije za statički pritisak i statičku temperaturu u preseku 1.

$$P_1 = P_{0,1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \hat{M}_1^2\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} \quad (10)$$

$$T_1 = T_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \hat{M}_1^2\right)^{-1} \quad (11)$$

Prethodna iterativna metoda se koristi kada su poznate vrednosti masenog protoka vazduha \dot{m}_1 , zaustavnog pritiska P_{01} i površina poprečnog preseka A u ravni 1. Na isti način koristi se ako je poznata vrednost statičkog

pritiska u preseku 1, tj. P_1 , što se prikazuje izrazima:

$$(\hat{M})_0 = \frac{\dot{m}}{AP_1} \sqrt{\frac{RT_0}{\kappa}} \quad (12)$$

$$(\hat{T})_k = T_0 \left[1 + \frac{\kappa-1}{2} (\hat{M})_{k-1}^2\right]^{-1} \quad (13)$$

$$(\hat{M})_k = \frac{\dot{m}}{AP_1} \sqrt{\frac{R}{\kappa}} (\hat{T})_{k-1}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

gde je k korak iterativnog postupka, tj. iterativne metode. Ovaj proces se ponavlja do zadatog uslova konvergencije.

Sada je zaustavni pritisak dat izrazom:

$$P_{0,1} = P_1 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Regulacioni ventil odsisavanja vazduha iz komore odsisavanja radnog dela aerotunela

Zbog kružnog preseka cevovoda, najčešću primenu u sistemu odsisavanja imaju leptirasti ventil. Za odabranu veličinu, protočne karakteristike za ventil daje proizvođač, a koriste se za definisanje pada pritiska kroz ventil.

Otvorenost ventila Φ , je poznata ulazna veličina koja reprezentuje maksimalnu otvorenost ventila, za koju ventil daje dobru funkciju odgovora.

Ventil može raditi u području prigušenog ili neprigušenog strujanja vazduha kroz njega, zavisno od odnosa pritiska ispred i iza njega, odnosno u odnosu na pad pritiska kroz njega:

$$x = \frac{P_1 - P_2}{P_1}$$

Za $x < x_T$ ventil radi u neprigušenom režimu; za $x \geq x_T$ ventil radi u prigušenom režimu, gde je x_T funkcija otvorenosti ventila, $x_T = g_x(\Phi)$.

Maseni protok kroz ventil može da se izračuna, zavisno od koeficijenta protoka:

$$C_v = \pi_1 \frac{\dot{m}_1}{Y P_1} \sqrt{\frac{T_1}{x}} \quad (15)$$

gde su: π_1 konstantni koeficijent za leptirasti ventil određene veličine, a Y faktor ekspanzije koji je definisan relacijom:

$$Y = 1 - \frac{x}{3F_{\kappa} x_T}$$

gde je

$$F_{\kappa} = \frac{\kappa}{1.4} = 1$$

za vazduh.

Za neprigušeno strujanje mase vazduha kroz ventil $C_v / (C_v)_{max}$ je poznata polinomna funkcija od Φ :

$$\frac{C_v}{(C_v)_{max}} = g_u(\Phi) \quad (16)$$

Koeficijent $(C_v)_{max}$ se dobija od proizvođača kao kataloška vrednost.

Prigušeno strujanje vazduha kroz ventil se izražava:

$$\frac{C_v}{(C_v)_{\max}} = \frac{A_e}{K} \sqrt{x_T} \quad (17)$$

gde je A_e/K efektivni faktor protočnog preseka.

Efektivni faktor A_e/K je poznata polinomna funkcija od Φ .

$$\frac{A_e}{K} = g_c(\Phi)$$

Za dobijanje rešenja pada pritiska kroz ventil, za slučaj otvorenog ventila, koristi se Φ ili iterativni postupak, gde se prvo pretpostavlja koeficijent pada pritiska x . Ovaj postupak daje faktor ekspanzije Y , koji se potom koristi za izračunavanje pada pritiska.

Nova vrednost koeficijenta pada pritiska x se koristi za dobijanje nove vrednosti faktora ekspanzije Y . Iteracija se nastavlja do konvergencije vrednosti pada pritiska.

Kada vrednost statičkog pritiska postane poznata, tada je moguće izračunati Mahov broj, zaustavnu temperaturu i zaustavni pritisak korišćenjem iterativne metode.

Protok mase vazduha od regulacionog ventila odsisavanja do ravni mešanja vazdušne struje sa vazdušnom strujom ejektorskog sistema

Pretpostavlja se da je ukupan pad pritiska između *RVO* i ravni mešanja proporcionalan dinamičkom pritisku na izlazu *RVO*, što može da se izrazi:

$$P_{0,2} = P_{0,3} + K_{2,3}q_2 \quad (18)$$

$$q_2 = \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \rho_2 \left(\frac{\dot{m}_1}{A_2} \right)^2 \quad (19)$$

Faktor pada pritiska $K_{2,3}$ se određuje za datu geometriju cevni vodova.

Kada ejektorski sistem nije uključen, smatra se da je:

$$P_{0,2} = P_{0,10} + K_{2,10}q_2 \quad (20)$$

Vrednost pritiska $P_{0,2}$ je određena u cilju dobijanja jednačine:

$$P_{0,3} = P_{0,2} - \frac{K_{2,3}}{2} \frac{RT_2}{P_2} \left(\frac{\dot{m}_1}{A_2} \right)^2 \quad (21)$$

Mahov broj, statička temperatura i statički pritisak u ravni mešanja 3 se dobijaju korišćenjem standardne iterativne metode.

Cevovod od rezervoara za vazduh do ejektorskog ventila

Pretpostavlja se da je pad pritiska između rezervoara za vazduh i ejektorskog ventila proporcionalan dinamičkom pritisku na ulazu u ejektorski ventil.:

$$P_{0,4} = P_R - K_{R,4}q_4 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P_{0,4} &= P_R - K_{R,4} \frac{1}{2} \rho_4 \left(\frac{\dot{m}_2}{A_4} \right)^2 = \\ &= P_R - \frac{K_{R,4}}{2} \frac{RT_4}{P_4} \left(\frac{\dot{m}_2}{A_4} \right)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

Iz vrednosti zaustavnog pritiska $P_{0,4}$ mogu se, korišćenjem opisane iterativne metode, odrediti Mahov broj, statički pritisak i statička temperatura u preseku-ravni 4.

Faktor pada pritiska $K_{R,4}$ se određuje iz izvedenog

stanja cevovoda.

Ejektorski ventil

S obzirom na kružni presek cevovoda, za ejektorski ventil i za *RVO* se koristi leptirasti ventil; oni se međusobno razlikuju po veličini i po vrednosti maksimalnog koeficijenta protoka, $(C_{VEV})_{\max}$ koji daje proizvođač ventila. Pad pritiska kroz *EV* se dobija korišćenjem iste metodologije kao i za *RVO*.

Tri karakteristične funkcije ejektorskog ventila su:

$$\hat{C}_v = g_u(\Phi_{EV}) \quad (24)$$

$$\frac{A_e}{K} = g_c(\Phi_{EV}) \quad (25)$$

$$x_T = g_x(\Phi_{EV}) \quad (26)$$

koje se dobijaju istom metodologijom kao i *RVO*.

Cevovodna veza ejektorskog ventila i ejektorske mlaznice

Pad pritiska između ejektorskog ventila i ejektorske mlaznice je proporcionalan dinamičkom pritisku na izlazu ejektorskog ventila.

$$P_{0,6} = P_{0,5} - K_{5,6}q_5 \quad (27)$$

$$P_{0,6} = P_{0,5} - \frac{K_{5,6}}{2} \frac{RT_5}{P_5} \left(\frac{\dot{m}_2}{A_5} \right)^2 \quad (28)$$

Faktor pada pritiska $K_{5,6}$ je određen izvedenim stanjem cevovoda.

Korišćenjem iterativne metode, iz zaustavnog pritiska $P_{0,6}$ mogu da se odrede Mahov broj, statički pritisak i statička temperatura.

Ejektorska mlaznica

Strujanje vazduha kroz ejektorsku mlaznicu se dobija korišćenjem teorije o jednodimenzionalnom kompresibilnom strujanju vazduha, što dozvoljava mogućnost strujanja vazduha kroz mlaznicu u jednom od tri radna-operativna režima:

- subsonično strujanje vazduha,
- supersonično strujanje vazduha sa normalnim udarnim talasima u mlaznici,
- potpuno ekspanziono strujanje vazduha.

Postoje još dva slučaja strujanja vazduha kroz mlaznicu, produženog i skraćenog strujanja vazduha gde kosi udarni talasi ili kosi reflektovani talasi postoje van mlaznice. Ovo je problem dvodimenzionalnog strujanja vazduha.

Subsonično strujanje vazduha kroz mlaznicu

Strujanje vazduha kroz mlaznicu je izentropsko bez gubitaka.

Izjednačavanjem pritiska strujanja vazduha na izlazu mlaznice sa izlaznim pritiskom *RVO*, $P_7 = P_3$, parametri struje mase vazduha iz ejektora \dot{m}_2 , $P_{0,7}$ i M_7 se određuju iz P_7 i \dot{m}_2 korišćenjem standardne iterativne metode.

Pošto nema pada pritiska $P_{0,6} = P_{0,7}$, a P_6 , M_6 , T_6 se određuju iz $P_{0,6}$ i \dot{m}_2 korišćenjem standardne iterativne

metode.

Supersonično strujanje vazduha kroz mlaznicu sa normalnim udarnim talasom

Pretpostavlja se da je $P_7 = P_3$. Kada je odnos masenog strujanja vazduha \dot{m}_2 poznat, tada je zaustavni pritisak na ulazu mlaznice poznat korišćenjem uslova za prigušeno strujanje vazduha u grlu mlaznice [1];

$$P_{0,6} = \frac{\dot{m}_2}{A_{grla}} \left[\frac{T_0 R}{\kappa} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1+\kappa}{1-\kappa}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Sada se P_6 , T_6 i M_6 određuju korišćenjem $P_{0,6}$ i \dot{m}_2 pomoću standardne iterativne metode.

Parametri $P_{0,7}$, T_7 i M_7 se određuju korišćenjem P_7 i \dot{m}_2 pomoću standardne iterativne metode.

Potpuno ekspanziono strujanje vazduha kroz mlaznicu

U slučaju da je M_7 poznat kao funkcija geometrije mlaznice, nastaje izraz:

$$\frac{A_7}{A_{grla}} = \frac{1}{M_7} \left[\left(\frac{2}{\kappa+1} \right) \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_7^2 \right) \right]^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \quad (30)$$

Statički pritisak P_7 se izjednačava sa P_3 , tj. $P_7 = P_3$, gde su:

$$P_{0,7} = P_7 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_7^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (31)$$

$$T_7 = T_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_7^2 \right)^{-1} \quad (32)$$

Kako nema gubitaka pritiska kroz mlaznicu $P_{0,6} = P_{0,7}$. Masa strujanja vazduha iz ejektorskog ventila nastaje iz prigušenih uslova u grlu mlaznice:

$$\dot{m}_2 = P_{0,6} A_{grla} \left[\frac{\kappa}{RT_0} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

Iz $P_{0,6}$ i \dot{m}_2 se dobijaju P_6 , M_6 korišćenjem standardnog iterativnog postupka.

Mešanje struje vazduha iz regulacionog ventila odsisavanja i ejektorskog ventila

Dve struje vazduha \dot{m}_1 i \dot{m}_2 , iz *RVO* i *EV*, se mešaju u oblasti cevi preseka 3 i 7 do preseka 8, tj. do ulaska u difuzor (sl.1).

Osobine izmešane struje vazduha određene su pomoću jednodimenzionalne teorije kompresibilnog strujanja vazduha. Na osnovu ove teorije dobija se jednačina:

$$F_3 \left[M_8, \frac{\bar{f}_{7,8}}{2} \left(\frac{l_{7,8}}{D_{7,8}} \right) \right] = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} F_1 [M_3, 0] + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} F_2 [M_7, 0] \quad (34)$$

gde su $\bar{f}_{7,8}$ faktor trenja u cevi, $l_{7,8}$ dužina cevi, $D_{7,8}$ prečnik cevi.

Funkcija $F[M, \chi]$ je opšta funkcija mešanja data izrazom:

$$F[M, \chi] = \frac{1 + \kappa M^2 (1 + \chi)}{\kappa M \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (35)$$

gde je $\chi = \frac{\bar{f}}{2} \frac{L}{D}$ faktor prigušenja.

Iz jednačine kontinuiteta $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$.

U opštem slučaju mogu postojati dva rešenja funkcije mešanja, jedno za subsonično strujanje i drugo za supersonično strujanje vazduha. Ova dva rešenja odgovaraju strujanju vazduha sa bilo koje strane normalnog udarnog talasa u konstantnoj oblasti cevi. Pretpostavlja se da će subsonično rešenje biti korektno.

Treba napomenuti da teorijski postoje dva rešenja u slučaju kada je $F_3 < F_{Kr}$, gde je:

$$F_{Kr} = (1 + \chi) \sqrt{\frac{2}{\kappa-1}} \quad (36)$$

Ista analiza mešanja vazduha može da se koristi kada je ejektorski sistem isključen (EV zatvoren). U tom slučaju je;

$$F_3 \left[M_8, \frac{\bar{f}_{7,8}}{2} \left(\frac{l_{7,8}}{D_{7,8}} \right) \right] = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} F_1 [M_3, 0] + \lim_{\dot{m}_2, M_7 \rightarrow 0} \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} F_2 [M_7, 0] \quad (37)$$

za granične uslove $\dot{m}_3 = \dot{m}_1$.

Može da se pokaže da je:

$$\lim_{\dot{m}_2, M_7 \rightarrow 0} \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} F_2 [M_7, 0] = \frac{A_7 P_3}{\kappa \dot{m}_1} \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0}}$$

odakle proizlazi da nema strujanja vazduha kroz ejektorski ventil, pa je:

$$F_3 [M_8, \chi] = F_1 [M_3, 0] + \frac{A_7 P_3}{\kappa \dot{m}_1} \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0}} \quad (38)$$

Treba istaći da se F_3 i M_8 dobijaju korišćenjem iterativne metode. Maseni protok vazduha \dot{m}_3 dat je izrazom:

$$\dot{m}_3 = A_8 \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0}} P_8 M_8 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_8^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

Parametri strujanja vazduha $P_{0,8}$, P_8 i T_8 se dobijaju jednačinama:

$$P_8 = \frac{\dot{m}_3}{A_8} \sqrt{\frac{RT_0}{\kappa}} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_8^2 \right)^{\frac{1}{2}} M_8$$

$$P_{0,8} = P_8 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_8^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$T_8 = T_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_8^2 \right)^{-1}$$

Nizstrujni difuzor

Pad pritiska kroz difuzor se određuje korišćenjem izraza za efikasnost difuzora. Faktor efikasnosti difuzora je definisan izrazom $\eta_{dif} = \frac{P_9 - P_8}{\Delta P_i}$, gde je $\Delta P_i = (P_9)_i - P_8$, a

$(P_9)_i$ se određuje kada je $P_{0,9} = P_{0,8}$ idealni slučaj. $(P_9)_i$ se može odrediti pomoću $P_{0,9}$ korišćenjem standardnog iterativnog postupka.

Aktualni statički pritisak P_9 je dat izrazom:

$$P_9 = \eta_{dif} [(P_9)_i - P_8] + P_8 \quad (40)$$

Na osnovu statičkog pritiska P_9 , zaustavni pritisak $P_{0,9}$, Mahov broj M_9 i statička temperatura T_9 se izračunavaju korišćenjem standardnog iterativnog metoda.

Difuzor - izlazni cevovod

Gubitak pritiska kroz izlazni cevovod je proporcionalan referentnom dinamičkom pritisku;

$$P_{0,10} = P_{0,9} - K_{9,10} q_{ref} \quad (41)$$

$$q_{ref} = \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}_3}{A_{9,10}} \right)^2 \quad (42)$$

Smatra se da je:

$$\rho = \rho_0 = \left(\frac{P_{0,9} + P_{0,10}}{2} \right) \frac{1}{RT_0}$$

$$P_{0,10} = P_{0,9} - \frac{K_{9,10}}{P_{0,9} + P_{0,10}} RT_0 \left(\frac{\dot{m}_3}{A_{9,10}} \right)^2 \\ = \left[P_{0,9} - K_{9,10} RT_0 \left(\frac{\dot{m}_3}{A_{9,10}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

gde je $A_{9,10}$ srednja vrednost površine poprečnog preseka, 9-10, a $K_{9,10}$ je faktor gubitaka, između preseka 9-10.

Iz zaustavnog pritiska $P_{0,10}$, statički pritisak P_{10} , Mahov broj M_{10} i statička temperatura T_{10} se određuju korišćenjem standardne iterativne metode.

Treba naglasiti da, P_{10} mora biti veći od spoljnog-atmosferskog pritiska, tj mora biti $P_{10} > P_{atm}$, kao mogućnost za potpuno strujanje vazduha kroz sistem u atmosferu.

Opšti rezultati analize

Ejektorska masa vazduha može da umanji performanse sistema odsisavanja vazduha umesto da ih poboljša, ako je maseni protok vazduha dovoljno mali.

Kao prva pretpostavka usvaja se da sistem odsisavanja vazduha u radu nije povezan sa ejektorskim sistemom. Kako odsisana struja vazduha ulazi u deo cevi gde se vrši mešanje vazдушnih struja, oblast većeg poprečnog preseka, dolazi do povećanja pritiska odsisane mase vazduha u toj oblasti.

Kao druga pretpostavka usvaja se ista vazдушna struja koja ulazi u oblast mešanja pri čemu je uključen ejektorski sistem. Neka je, u ovom slučaju, prisutna takva ejektorska struja vazduha da je izlazni Mahov broj sa ejektorske mlaznice jednak Mahovom broju odsisane struje vazduha, tako da su obe struje vazduha jednake; tada ne dolazi do

porasta pritiska izmešane struje vazduha u oblasti mešanja. Mala masena struja vazduha, kroz mlaznicu ejektorskog sistema, dovodi do umanjenja performansi odsisavanja vazduha jer eliminiše porast pritiska koji bi struja odsisane vazduha imala sa isključenim ejektorskim sistemom.

Uticaj masenog protoka vazduha, kroz ejektorski sistem na performanse sistema, u celini, je takav da dolazi do degradacije performansi kada je \dot{m}_2 malo; do poboljšanja performansi sistema dolazi kada \dot{m}_2 počne da raste iznad neke kritične vrednosti. U slučaju da je potreban rad ejektorskog sistema, mora biti ispunjen uslov za minimalnu brzinu masenog protoka vazduha kroz ejektorski sistem, kako bi isti bio efikasan u radu sistema u celini.

Kada je opšta funkcija mešanja vazduha (mešanje struja vazduha *RVO* i *EV*) manja od kritične vrednosti, tada postoje dva moguća rešenja: supersonično i subsonično. Izbor između ova dva rešenja se zasniva na vrednosti entropije. Drugi zakon termodinamike ukazuje da je entropija uvek rastuća funkcija stanja sistema. Supersonično rešenje može postojati samo ako je njegova entropija veća ili jednaka početnoj entropiji sistema. U suprotnom, samo će subsonično rešenje biti validno.

Zaključak

Analizirano je strujanje vazduha u sistemu odsisavanja vazduha iz komore odsisavanja transsoničnog radnog dela, kao i rad ejektorskog sistema koji se uključuje u rad radi poboljšanja performansi sistema odsisavanja u cilju dobijanja što kvalitetnijeg upravljanja i regulacije Mahovog broja u transsoničnom radnom delu aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva. Date matematičke relacije omogućavaju formiranje matematičkog modela sistema za izradu programa rada sistema upravljanja i regulacije Mahovog broja u transsoničnom radnom delu aerotunela.

Literatura

- [1] SHAPIRO, A.H. *The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow*. J.Wiley & Sons, 1953, New York
- [2] RENDULIĆ, Z. *Aerodinamika*. SSNO-ZNGŠ JNA za RV i PVO-259, Beograd, 1984.
- [3] BLIZANAC, B. Prikaz i analiza primarnih parametara koji definišu kvalitet strujnog polja vazduha u radnom delu aerotunela. *Naučnotehnički pregled*, 1996, vol. XLVI, no. 4-5, p.92-98.
- [4] BLIZANAC, B. Matematičko modeliranje i analogna električna simulacija dinamike sistema regulacije Mahovog broja u trisoničnom aerodinamičkom tunelu T-38. *Naučnotehnički pregled*, 1996, vol. XLVI, no. 9-10, p.38-43.
- [5] BLIZANAC, B. Određivanje indeksa kontrolabilnosti sistema upravljanja i regulacije Mahovog broja aerotunela sa natpritiskom prekidnog dejstva. *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol. XLVIII, no. 4, p.108-114.
- [6] ...*Dokumentacija aerotunela T-38*. int. dok., Vojnotehnički institut VI, Žarkovo, Beograd.

Rad primljen: 8.9.2000. god.