

# Analitički metod definisanja vremena zatvaranja sličnih ventila usled dejstva impulsa pritiska udarnih talasa

Dr Dragan Knežević, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Definisane su dinamičke karakteristike ventila s aspekta zatvaranja ventila pod dejstvom direktnog vazdušnoudarnog talasa (VUT) nastalog pri nuklearnoj eksploziji zavisno od otpornosti, geometrijskih karakteristika i karakteristika elastičnih elemenata sličnih ventila i nivoa osetljivosti na zatvaranje pod dejstvom direktnog VUT-a. Definisana je analitički model procesa, postavljena diferencijalna jednačina kretanja pokretnog sklopa ventila pod neposrednim dejstvom VUT-a i data njena rešenja. Posebno je određen analitički kriterijum za ocenu ventila s aspekta zatvaranja ventila nazivnih prečnika od 300 mm do 600 mm, otpornosti do 2000 kPa. Izvršena je kompleksna analiza uticaja karakterističnih veličina ventila na vremena zatvaranja ventila pod neposrednim dejstvom VUT-a. Iz uslova stabilnog strujanja vazduha kroz ventile minimalnih otpora u uslovima normalne ventilacije, definisane su karakteristike elastičnih elemenata ventila i njihov uticaj na vremena zatvaranja ventila. Definisani su opšti kriterijumi koji opredeljuju optimalna rešenja ventila otpornih na dejstvo reflektovanog VUT-a nuklearne eksplozije.

*Ključne reči:* Vazdušnoudarni talas, pneumatski protivudarni ventili, matematičko modeliranje, vreme zatvaranja, optimalne karakteristike.

## Korišćene oznake i simboli

VUT	– vazdušnoudarni talas nuklearne eksplozije,
$C$	– krutost opruge ventila,
$x$	– veličina pomeranja pokretnog sklopa ventila,
$x_n$	– veličina ugiba opruge ventila,
$\omega$	– kružna frekvencija,
$m$	– masa pokretnog sklopa ventila,
$m_m$	– masa membrane ventila,
$m_s$	– masa steznog sklopa membrane ventila,
$A$	– napadna površina pokretnog sklopa ventila,
$F_p$	– prinudna sila,
$p_f$	– pritisak u frontu direktnog VUT-a,
$t$	– vreme kretanja pokretnog sklopa ventila pod dejstvom pritiska $p_f$ na putu $x$ ,
$\tau$	– vreme trajanja pozitivne faze VUT-a,
$n$	– eksponent zavisno od nivoa pritiska u frontu VUT-a,
$p_r$	– pritisak reflektovanog VUT-a,
$t_z$	– vreme zatvaranja ventila,
$D_m$	– spoljni prečnik membrane ventila,
$d_c$	– prečnik cilindra ventila,
$\rho_m$	– zapreminska masa materijala membrane i pokretnog sklopa ventila,
$\delta$	– debljina membrane ventila,
$x_0 = h$	– hod pokretnog sklopa ventila,
$v$	– brzina strujanja vazduha neposredno ispred ventila,
$\rho_v$	– gustina vazduha,
$Q_1$	– protok vazduha kroz ventil,
$D_1, d_1$	– odgovarajući prečnici klipa ventila,
$A, a, b, c$	– konstante,

$A_1, e, A_2$	– konstante,
$Fx_0$	– prinudna sila pri hodu $x_0$ pokretnog sklopa ventila,
$Fx_n$	– prinudna sila pri ugibu $x_n$ opruge ventila.

## Uvod

U radu se tretira metod analitičkog definisanja vremena zatvaranja pneumatskih protivudarnih ventila, sistema automatskog zatvaranja ventilacionih otvora objekata specijalne namene pod dejstvom pritiska u frontu VUT-a nastalog pri nuklearnoj i klasičnoj eksploziji.

Cilj istraživanja, obuhvaćenog ovim radom, je nalaženje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila pod neposrednim dejstvom pritiska u frontu VUT-a nastalog pri nuklearnoj i klasičnoj eksploziji, zavisno od radnih i geometrijskih karakteristika i karakteristika elastičnih elemenata sličnih ventila. Zatim, na osnovu kompleksne analize teorijski definisanih analitičkih izraza vremena zatvaranja ventila pod neposrednim dejstvom pritiska direktnog VUT-a nastalog pri nuklearnoj i klasičnoj eksploziji, potrebno je dati opšte kriterijume koji opredeljuju optimalne karakteristike ventila otpornih na dejstvo impulsa pritiska reflektovanog VUT-a. Osim toga, treba definisati opšte kriterijume za izbor optimalnih i po otpornosti univerzalnih rešenja ventila (nazivnih prečnika 300 mm; 350 mm; 400 mm; 500 mm i 600 mm) na dejstvo pritiska  $p_r$  reflektovanog VUT-a. Da bi se postigao postavljeni cilj, potrebno je dati kompleksnu analizu koja obuhvata problem definisanja:

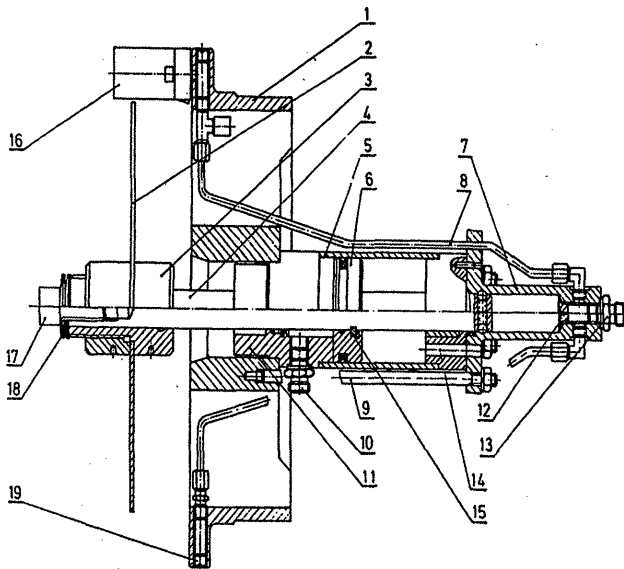
1. vremena zatvaranja pneumatskih protivudarnih ventila pod neposrednim dejstvom pritiska direktnog VUT-a nastalog pri nuklearnoj eksploziji,

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

2. pritiska u frontu direktnog VUT-a, pri kojem nastupa trenutak pokretanja pokretnog sklopa ventila, odnosno zatvaranja ventila i
3. uticaja nivoa osetljivosti ventila na zatvaranje ventila pod dejstvom direktnog VUT-a.

### Uloga i namena ventila

Zadatak ovih ventila je da spreče prodor VUT-a u objekat kroz otvor za dovod svežeg vazduha i odvod zagađenog vazduha, i time spreči oštećenja koja bi mogao izazvati impuls pritiska VUT-a u sistemu ventilacije objekta. Konceptija i konstrukciona rešenja ovih ventila trebalo bi da obezbede njihovu otpornost i funkcionalnost pri visokim impulsnim opterećenjima, tj. njihovo zatvaranje pri dejstvu impulsa pritiska VUT-a (u slučaju da se sistem ventila nije zatvorio pneumatski) i otvaranje po prestanku dejstva VUT-a (ako spoljna atmosfera nije kontaminirana). Ovim se obezbeđuje slobodan dovod svežeg vazduha u zaštitni objekat. Kod ventila tipa HV kada se ventili zatvaraju pneumatski (posredstvom efekata nuklearne eksplozije i bojnih otrova) ili pod dejstvom impulsa pritiska VUT-a, po prestanku dejstva VUT-a ventili se pneumatski zavravaju i ostaju zatvoreni. Ventili tipa HV se otvaraju pneumatski komandom iz objekta (pritiskom na dugme elektropneumatskog razvodnika vazduha pod pritiskom ili preko centralne kontrolne jedinice sistema). Da bi mogli ostvariti navedene funkcije, ventili i sistemi ventila moraju ispunjavati niz tehničkih zahteva. Od posebnog značaja je da vreme zatvaranja ventila pod dejstvom VUT-a bude što kraće. Na sl.1 u [1] i sl.1 dat je šematski izgled pneumatskog protivudarnog ventila tipa PPUV i ventila tipa HV.



Slika 1. Pneumatski protivudarni ventil tipa HV: 1- telo ventila; 2- membrana; 3- stezni sklop membrane; 4- osovina; 5- cilindar; 6- klip; 7- poklopac; 8- cev; 9- vijak; 10- priključak; 11- cilindar; 12- prigušni vijak; 13- priključak; 14- sačasti prsten; 15- graničnik; 16- brava; 17- vijak; 18- opruga; 19- čep

### Funkcija pneumatskih protivudarnih ventila

Pri nailasku VUT-a na objekat, usmereni talas kroz kanal protivudarnog ventila, pod dejstvom impulsa pritiska na membranu, naglo je pomera i zatvara otvor na izlaznom kanalu. Kada nastupi negativna faza VUT-a, pokretni sklop ventila (tipa PPUV) pod dejstvom opruge ventila i potpriti-

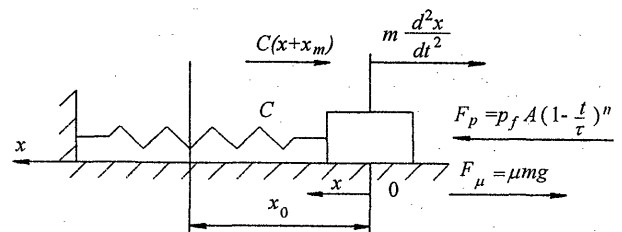
ska naglo će se pokrenuti u suprotnom smeru i otvoriti ventil, dok ventil tipa HV ostaje zatvoren (mehanički zavravljen). Otvaranje ventila tipa HV po prestanku VUT-a se vrši pneumatski komandom iz objekta.

Tokom ventilacije objekta ventil je otvoren, odnosno membrana se posredstvom opruge (ventil tipa PPUV) nalazi na rastojanju  $x_0 = h$  od krajnjeg položaja, kada je ventil zatvoren. Ventil tipa HV je u otvorenom položaju posredstvom pritiska vazduha u cilindru ventila (odnosno instalacije sistema). Rastojanje  $x_0 = h$  membrane pri normalnoj ventilaciji uslovljeno je maksimalnim dozvoljenim padom pritiska u ventilu, koji ne sme da pređe 220 Pa pri nominalnim protocima vazduha kroz ventil, što se postiže konstrukcionim rešenjima ventila. Pri normalnoj ventilaciji (pri brzinama strujanja vazduha do 30 m/s), konstrukcija ventila treba da obezbedi stabilno strujanje vazduha.

### Analičko definisanje pneumatskih protivudarnih ventila

#### Određivanje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila

Mehanički model protivudarnog ventila tipa PPUV je prikazan na sl.2.



Slika 2. Mehanički model pneumatskog protivudarnog ventila tipa PPUV

Masa ( $m$ ) pokretnog sklopa ventila predstavljena je kao materijalna tačka, koja se pod dejstvom prinudne sile  $F_p$  (koja potiče od impulsa pritiska VUT-a) kreće po horizontalnoj ravni  $O_x$ . Na tačku deluje inercijalna sila  $m\ddot{x} = m(d^2x/dt^2)$ , sila u opruzi ventila  $C(x+x_n)$ , koja je proporcionalna rastojanju mase ( $m$ ) od ravnotežnog položaja  $x$  i veličini ugiba  $x_n$  za koji je opruga prethodno sabijena u ravnotežni položaj (radi postizanja stabilnog strujanja vazduha kroz ventil pri normalnoj ventilaciji) i sila Kulonovog trenja klizanja  $F_\mu = \mu mg$ . Iz uslova ravnoteže sila, koje deluju na pokretni sklop ventila mase ( $m$ ), [2-8]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum_{i=1}^n X_i = C(x+x_n) - \mu mg + F_p \quad (1)$$

dobija se diferencijalna jednačina sistema:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{C}{m} \left[ (x+x_n) + \frac{\mu mg}{C} - \frac{F_p}{C} \right] = 0 \quad (2)$$

odnosno:

$$\ddot{x} + \omega^2 \left( x+x_n - \frac{F_p}{C} + \frac{\mu mg}{C} \right) = 0 \quad (3)$$

gde su:  $C$ - krutost opruge ventila;  $x$ - hod pokretnog sklopa ventila;  $x_n$ - vrednost za koju je opruga prethodno sabijena;  $m$ - masa pokretnog sklopa ventila;  $\omega^2$ - kvadrat kružne frekvencije;  $A$ - napadna površina pokretnog sklopa (membrana)

ne) ventila;  $F_p$ - prinudna sila, koja potiče od impulsa pritiska  $p_f$  VUT-a;  $\tau$ - vreme trajanja pozitivne faze VUT-a.

Prinudna sila  $F_p$  je definisana izrazom [2,3,8-11]:

$$F_p = p_f A \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^n; \text{ odnosno } F_p = p_f \frac{\pi}{4} (D_m^2 - d_c^2) \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^n \quad (4)$$

gde su:  $p_f$ - pritisak u frontu direktnog VUT-a,  $t$ - vreme za koje se odvija kretanje pokretnog sklopa ventila (reda ms);  $\tau$ - vreme trajanja pozitivne faze VUT-a (s) a  $n$ -eksponent zavisn od nivoa pritiska u frontu direktnog VUT-a, odnosno pritiska reflektovanog VUT-a.

Eksponent  $n$  određen eksperimentalnim putem [2,3,8-11] je definisan izrazom:

$$n = 1,9 p_f^{1/2}$$

Promena pritiska  $p_f$  u frontu direktnog VUT-a je definisana izrazom [6,7,11-15]:

$$p = p_f \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^n$$

Teorijsko-eksperimentalnim metodama je utvrđena zavisnost između reflektovanog pritiska  $p_r$  i pritiska  $p_f$  u frontu VUT-a. Ova zavisnost je definisana izrazom [2,3,8-11]:

$$p_r = 2p_f + \frac{6p_f^2}{p_f + 7,2}$$

Numerička zavisnost između  $p_r$ ,  $p_f$  i eksponenta  $n$  je data u tabeli 1.

Tabela 1. Numerička zavisnost  $p_r$ ,  $p_f$  i eksponenta  $n$

$p_r$ [bar]	3	6	9	15	20	25	30
$p_f$ [bar]	1,078493	1,857357	2,52849	3,71193	4,60705	5,45196	6,261835
$n$	2,0	2,6	3,02	3,6	4,08	4,42	4,75

Diferencijalna jednačina (2), odnosno (3), biće rešena ako se zatvaranje ventila vrši pod dejstvom impulsa pritiska čije je vreme trajanja  $\tau$  znatno duže od vremena zatvaranja ventila, tj.  $t/\tau \ll 1$ . Lako je zapaziti da se odnos  $t/\tau$  može zanemariti u odnosu na jedinicu. Iz ove analize sledi da ventil zatvara prinudna sila  $F_p$ , koja ima (aproksimativno) konstantnu vrednost:

$$F_p = p_f \frac{\pi}{4} (D_m^2 - d_c^2) \quad (5)$$

Opšte rešenje diferencijalne jednačine (3) ima oblik:

$$x = \left(\frac{F_p - \mu mg}{m}\right) \frac{t^2}{2} - \frac{C}{m} (x + x_n) \frac{t^2}{2} + C_1 + C_2 \quad (6)$$

odnosno:

$$x = C_3 \cos \omega t + C_4 \sin \omega t + \frac{F_p}{C} - x_n - \frac{\mu mg}{C} \quad (7)$$

Iz početnih uslova se određuju konstante integracije  $C_1$  i  $C_2$ , odnosno  $C_3$  i  $C_4$ :

1.  $t = 0$ ;  $dx/dt = \dot{x} = 0$ , dobijaju se konstante integracije  $C_1 = 0$  i  $\dot{x}|_{t=0} = -C_3 \omega \sin \omega t + C_4 \omega \cos \omega t = 0$ ,  $C_4 = 0$

2.  $t = 0$ ,  $x = -x_n$ , dobijaju se konstante integracije

$$C_2 = -x_n \text{ i } C_3 = -\frac{F_p}{C} + \frac{\mu mg}{C}$$

Nakon uvođenja vrednosti za integracione konstante  $C_1$  i  $C_2$ , odnosno  $C_3$  i  $C_4$  u opšta rešenja diferencijalne jednačine, dobija se:

$$x = \left(\frac{F_p - \mu mg}{m}\right) \frac{t^2}{2} - \frac{C}{m} (x + x_n) \frac{t^2}{2} - x_n \quad (8)$$

i

$$x = \left(\frac{F_p - \mu mg}{m}\right) \frac{t^2}{2} - (1 - \cos \omega t) - x_n \quad (9)$$

Rešenjem jednačina (8 i 9) po  $t$  i uvođenjem izraza za prinudnu silu, dobija se:

$$t = 2 \left[ \frac{2m(x + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2) - 4C(x + x_n) - 4\mu mg} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$t = \left(\frac{m}{C}\right)^{1/2} \arccos \left[ \frac{2m(x + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2) - 4\mu mg} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Iz graničnog uslova:  $t = T_z$ ,  $x = x_0$  i nakon dimenzionalnog sređivanja jednačina (10 i 11), zanemarivanjem člana  $4\mu mg$ , pošto je  $4\mu mg \ll p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)$ , dobijaju se analitički izrazi vremena zatvaranja ventila  $T_z$ , oblika:

$$T_z = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2) - 4000C(x_0 + x_n)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

odnosno:

$$t_z = \left(\frac{m}{1000C}\right)^{1/2} \arccos \left[ 1 - \frac{4000C(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right] \quad (13)$$

gde su:  $T_z, t_z$  [s]- vreme zatvaranja ventila;  $m$  [kg]- masa pokretnog sklopa ventila;  $x_0$  [m]-hod pokretnog sklopa ventila;  $x_n$  [m]-veličina ugiba opruge ventila u ravnotežnom položaju pokretnog sklopa ventila;  $C$  [N/mm]- krutost opruge ventila;  $p_f$  [N/m<sup>2</sup>]- pritisak u frontu direktnog VUT-a;  $D_m$  [m]- spoljni prečnik membrane ventila;  $d_c$  [m]- prečnik cilindra ventila.

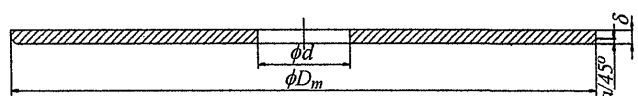
Analitički izrazi (12 i 13) predstavljaju rešenja iste diferencijalne jednačine. U analitičkom izrazu (12), odnosno (13) vremena zatvaranja ventila figurišu veličine:  $m$ - masa pokretnog sklopa ventila i ugib  $x_n$ , koje je potrebno analitički definisati.

*Analitički izraz mase pokretnog sklopa ventila*

Masa pokretnog sklopa ventila se sastoji iz mase membrane, steznog sklopa membrane ventila i 2/3 mase opruge ventila:

$$m = m_m + m_s + \frac{2}{3} m_{opr.} \quad (14)$$

Šematski izgled membrane ventila je dat na sl.3.



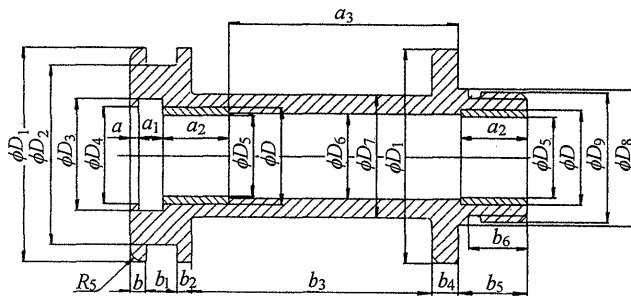
Slika 3. Membrana ventila

Masa membrane ventila je definisana izrazom:

$$m_m = \rho_m \left[ \frac{\pi \delta}{4000} (D_m^2 - d^2) - \frac{a_0^2 \pi}{4} (D_m - a_0) \right] \quad (15)$$

gde su:  $\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>]- zapreminska masa materijala membrane ventila,  $\delta$  [mm]- debljina membrane ventila a  $D_m, d$  [m]-odgovarajući prečnici membrane ventila.

Šematski izgled klipa ventila je dat na sl.4.



Slika 4. Klip ventila

Masa klipa ventila tipa PPUV je definisana izrazom:

$$m_k = \rho_k + \left\{ \left( D_2 + \frac{4R}{3\pi} \right) \frac{R^2 \pi^2}{4} + \frac{\pi}{4} \left[ D_1^2 (b_2 + b_4) + D_2^2 (b + b_1) + D_7^2 b_3 + D_8^2 (b_5 - b_6) + D_9^2 b_6 - (D_4^2 a + D_3^2 a_1 + 2D_4^2 a_2 + D_6^2 a_3) \right] \right\} + \rho_\varepsilon \cdot \frac{\pi}{2} (D_\varepsilon^2 - D_5^2) a_2 \quad (16)$$

gde su:  $D_\varepsilon, D_1, D_2, \dots, D_9$  [m]- odgovarajući prečnici klipa ventila;  $a, a_1, a_2, a_3$  [m]- dimenzije klipa;  $b, b_1, \dots, b_6$ - dimenzije klipa;  $\rho_k$  [kg/m<sup>3</sup>]- zapreminska masa materijala klipa ventila i  $\rho_\varepsilon$  [kg/m<sup>3</sup>]- zapreminska masa materijala čaura klipa ventila.

Numerički podaci dimenzija klipa ventila su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2: Dimenzije klipa ventila

Veličina	Oznaka i dimenzije [mm]									
prečnik $D_i$ [mm]	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	$D_8$	$D_9$	$D_\varepsilon$
	79	66	41	35,5	30	31	45	50	48	35
dužina $a_i, b_i$ [mm]	$a$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	3	92	25	86,7	11,5	5,5	90	10	25	22

Masu steznog sklopa membrane ventila čine masa klipa i navrtke. Masa steznog sklopa nije funkcija nazivnog prečnika ventila, i iznosi:

$$m_s = 0,130 + m_k \equiv \text{const} \quad (17)$$

Analiitičko definisanje ugiba  $x_n$  opruga ventila

Da bi se obezbedilo stabilno strujanje vazduha kroz ventile, potrebno je da sila u opruzi ventila bude jednaka ili veća od sile koja deluje na pokretni sklop ventila, pri brzini strujanja vazduha kroz ventil  $v = 30$  m/s, odnosno:

$$Cx_n \geq \rho_v Qv \quad (18)$$

odakle je:

$$x_n \geq \frac{\rho_v Qv}{C} \quad (19)$$

gde su:  $x_n$ - veličina ugiba opruge ventila usled sile u struji vazduha;  $F_v = \rho_v Qv$ - sila u struji vazduha;  $v$ - brzina vazduha neposredno ispred ventila;  $C$ - krutost opruge;  $\rho_v$ - gustina vazduha ( $\rho_v = 1,23$  kg/m<sup>3</sup>) i  $Q$ - protok vazduha kroz ventil.

Protok vazduha se izračunava po izrazu:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_m^2 - d_c^2) v \quad (20)$$

Nakon uvođenja  $Q$  u izraz za  $x_n$  i dimenzionalnog sređivanja, dobija se analitički izraz ugiba  $x_n$  opruge ventila, kojim se obezbeđuje stabilno strujanje vazduha kroz ventil:

$$x_n \geq \frac{\rho_v \pi}{4000C} (D_m^2 - d_c^2) v^2 \quad (21)$$

gde su:  $\rho_v$  [kg/m<sup>3</sup>]- gustina vazduha ( $\rho_v = 1,23$  kg/m<sup>3</sup>),  $C$  [N/mm]- krutost opruge ventila,  $D_m$  [m]- prečnik membrane ventila,  $d_c$  [m]- prečnik cilindra ventila i  $v$  [m/s]- brzina strujanja vazduha neposredno ispred membrane ventila ( $v=30$  m/s).

Analiitički izrazi kojima je definisano vreme zatvaranja sličnih ventila

Analiitički izrazi, kojima je definisan problem određivanja vremena zatvaranja pneumatskih protivudarnih ventila, su:

$$T_z = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2) - 4000C(x_0 + x_n)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

odnosno:

$$t_z = \left( \frac{m}{1000C} \right)^{1/2} \arccos \left[ 1 - \frac{4000C(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right] \quad (13)$$

$$m = m_m + m_s + \frac{2}{3} m_{opr} \quad (14)$$

$$m_m = \rho_m \left[ \frac{\pi \delta}{4000} (D_m^2 - d^2) - \frac{a_0^2 \pi}{4} (D_m - a_0) \right] \quad (15)$$

$m_s \Rightarrow$  vidi tabelu 4

$$x_n \geq \frac{\rho_v \pi}{4000C} (D_m^2 - d_c^2) v^2 \quad (21)$$

Analiza analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila

Analiza analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila sprovede se analizom jednačine (12) napisane u obliku:

$$T_z = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2} \left[ 1 - \frac{4000C(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right] \quad (22)$$

Lako je dokazati da je izraz  $\frac{4000C(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \ll 1$ , pa se može zanemariti. Izraz za  $T_z$  dobija oblik:

$$T_z = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2} \quad (23)$$

Lako je dokazati da se čini zanemarljivo mala greška kada se vreme zatvaranja računa po jednačini (23) u odnosu na vreme zatvaranja ventila po jednačini (12). Greška koja se pri ovome čini je oblika:

$$\Delta = \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{4000C(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2} \right\} \cdot 100\% \quad (24)$$

i funkcija je nazivnog prečnika ventila, ugiba opruge u početnom položaju pokretnog sklopa ventila i pritiska u frontu direktnog VUT-a pri kojem se vrši zatvaranje ventila. Greška, koja se čini kada se zanemari član  $4000C(x_0 + x_n)$  u izrazu za vreme zatvaranja ventila za razmatrane nivoe otpornosti ventila i nazivne prečnike ventila je manja od 1%.

Iz ove analize sledi zaključak da krutost opruge nema bitnog uticaja na vreme zatvaranja ventila pod dejstvom impulsa pritiska VUT-a za razmatrane nivoe nazivnih prečnika ventila i otpornosti sličnih ventila.

#### Određivanje odnosa vremena zatvaranja ventila i pritiska u frontu direktnog VUT-a

Odnos vremena zatvaranja ventila i pritiska u frontu direktnog VUT-a naći će se ako se ista konstrukcija ventila izlaže dejstvu pritiska  $p_{f1}, \dots, p_{fn}$  pri konstantnom hodu pokretnog sklopa ventila i ugiba opruge u uslovima normalne ventilacije. Cilj analize je da se uspostavi analitička zavisnost, iz koje će se videti u kom odnosu stoje vremena zatvaranja iste konstrukcije ventila pri dejstvu pritiska u frontu direktnog VUT-a. Analitički izrazi vremena zatvaranja ventila  $T_{z1}, \dots, T_{zn}$ , a na osnovu opšteg oblika analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila (23), pri dejstvu pritiska  $p_{f1}, \dots, p_{fn}$  glase:

$$T_{z1} = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_n)}{p_{f1} \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2} \quad (25)$$

$$T_{zn} = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_n)}{p_{fn} \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2}$$

Ako se potraže odnosi kvadrata vremena zatvaranja ventila, dobija se:

$$\left( \frac{T_{z1}}{T_{zn}} \right)^2 = \frac{p_{fn}}{p_{f1}} \quad (26)$$

Analizom analitičkog izraza (26) dolazi se do zaključka da su odnosi kvadrata vremena zatvaranja ventila obrnuto proporcionalni pritiscima u frontu direktnog VUT-a, odnosno prinudnim silama pri čijem se dejstvu vrši zatvaranje ventila.

#### Određivanje odnosa vremena zatvaranja sličnih ventila i masa pokretnog sklopa ventila

Odnos vremena zatvaranja ventila i masa pokretnog sklopa ventila nalazi se ako se slična konstrukcija ventila različite mase membrane, istog hoda pokretnog sklopa ventila i ugiba opruge u uslovima normalne ventilacije, izloži dejstvu pritiska  $p_f$  fronta direktnog VUT-a. Cilj analize je da se uspostavi analitička zavisnost iz koje će se videti u kom odnosu stoje vremena zatvaranja ventila različite mase (membrane) pokretnog sklopa ventila pri dejstvu pritiska u frontu direktnog VUT-a. Analitički izrazi vremena zatvaranja ventila  $T_{z1}, \dots, T_{zi}$ , mase  $m_1, \dots, m_i$  pokretnog sklopa ven-

tila pri dejstvu pritiska u frontu direktnog VUT-a glase:

$$T_{z1} = 2 \left[ \frac{2m_1(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2} \quad (27)$$

$$T_{zi} = 2 \left[ \frac{2m_i(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2}$$

Odnos kvadrata vremena zatvaranja ventila različite mase (membrane) pokretnog sklopa ventila ima oblik:

$$\left( \frac{T_{z1}}{T_{zi}} \right)^2 = \frac{m_1}{m_i} \quad (28)$$

Analizom analitičkog izraza (28) dolazi se do zaključka da su odnosi kvadrata vremena zatvaranja ventila pri dejstvu pritiska u frontu direktnog VUT-a proporcionalni odnosu masa pokretnih sklopova ventila.

#### Analitički izrazi pritiska u frontu direktnog VUT-a pri kojem nastupa trenutak pokretanja, odnosno zatvaranja pokretnog sklopa ventila

Analitički izraz pritiska u frontu direktnog VUT-a, pri kojem nastupa trenutak pokretanja pokretnog sklopa ventila, glasi:

$$p_f > \frac{4000C x_n}{\pi (D_m^2 - d_c^2)} \text{ [Pa]} \quad (29)$$

Analitički izraz pritiska u frontu direktnog VUT-a, pri kojem nastupa trenutak zatvaranja ventila, glasi:

$$p_f > \frac{4000C(x_0 + x_n)}{\pi (D_m^2 - d_c^2)} \text{ [Pa]} \quad (30)$$

#### Analitički izrazi pritiska u cilindru ventila pri kojem nastupa trenutak pokretanja pokretnog sklopa ventila, odnosno zatvaranje ventila

Analitički izraz pritiska  $p_1$  u cilindru ventila, pri kojem nastupa trenutak pokretanja pokretnog sklopa ventila, glasi:

$$p_1 > \frac{4000C x_n}{\pi (D_1^2 - d_1^2)} \text{ [Pa]} \quad (31)$$

Analitički izraz pritiska  $p_2$  u cilindru ventila, pri kojem nastupa trenutak zatvaranja ventila, glasi:

$$p_2 > \frac{4000C(x_0 + x_n)}{\pi (D_1^2 - d_1^2)} \text{ [Pa]} \quad (32)$$

gde je:  $D_1$  [m]- spoljni prečnik klipa ventila;  $d_1$  [m]- unutrašnji prečnik klipa ventila,  $C$  [N/mm]- krutost opruge i  $(x_0 + x_n)$  [mm]- ukupan ugib opruge ventila.

#### Analiza uticaja nivoa osetljivosti pneumatskih ventila na vreme zatvaranja ventila pri dejstvu VUT-a

Mera nivoa osetljivosti pneumatskih ventila je veličina ugiba  $x_n$  opruga ventila koja potiče od sile u struji vazduha u uslovima ventilacije objekta, definisana izrazom:

$$x_n \geq \frac{\rho_v \pi}{4000C} (C_m^2 - d_c^2) v^2$$

Ugib  $x_n$  je proporcionalan kvadratu brzine strujanja vazduha neposredno ispred membrane ventila, napadnoj površini pokretnog sklopa ventila i gustini vazduha, a obrnuto

proporcionalan krutosti opruge. Za ventile nazivnih prečnika 300 mm; 350 mm; 400 mm; 500 mm i 600 mm izračunate su veličine ugiba  $x_n$  opruga ventila, koje obezbeđuju stabilno strujanje vazduha kroz ventile pri brzinama strujanja od 20 m/s; 25 m/s i 30 m/s i prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3. Zavisnost ugiba opruga ventila od nazivnog prečnika i brzine vazduha ispred ventila

Nazivni prečnik ventila [mm]	Prečnik membrane $D_m$ [m]	Prečnik cilindra $d_c$ [m]	Brzina vazduha ispred ventila $v$ [m/s]	Ugib opruge $x_n$ [m]	Hod pokretnog sklopa ventila $x_0 \equiv h$ [m]	$(x_0 + x_n)$ [m]
300	0,320	0,090	20	0,0104	0,045	0,0554
			25	0,0163		0,0613
			30	0,0234		0,0684
350	0,370	0,090	20	0,0142	0,057	0,0712
			25	0,0222		0,079
			30	0,032		0,089
400	0,420	0,090	20	0,0186	0,070	0,0886
			25	0,029		0,099
			30	0,042		0,112
500	0,520	0,090	20	0,029	0,095	0,124
			25	0,045		0,140
			30	0,065		0,160
600	0,620	0,090	20	0,042	0,120	0,162
			25	0,065		0,185
			30	0,093		0,213

Analiza uticaja nivoa osetljivosti pneumatskih ventila na zatvaranja sličnih ventila pri dejstvu impulsa pritiska u frontu direktnog VUT-a sprovede se analizom analitičkih izraza vremena zatvaranja ventila:

$$T_{z1} = \left( \frac{m}{1000C} \right)^{1/2} \arccos \left[ 1 - \frac{4000C(x_0 + x_{n1})}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]$$

$$T_{z3} = \left( \frac{m}{1000C} \right)^{1/2} \arccos \left[ 1 - \frac{4000C(x_0 + x_{n3})}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]$$

odnosno, analizom aproksimativnog analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila oblika:

$$T_{z1} = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_{n1})}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2}$$

$$T_{z3} = 2 \left[ \frac{2m(x_0 + x_{n3})}{p_f \pi (D_m^2 - d_c^2)} \right]^{1/2}$$

Znači, razmatra se uticaj veličina ugiba  $x_{n1}$ ,  $x_{n2}$  i  $x_{n3}$  opruga ventila koji odgovaraju brzinama strujanja vazduha  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$  neposredno ispred ventila. Ako se potraže odnosi vremena zatvaranja ventila, dobija se:

$$\frac{T_{z1}}{T_{z3}} = \left( \frac{x_0 + x_{n1}}{x_0 + x_{n3}} \right)^{1/2}, \text{ odnosno } \frac{T_{z1}}{T_{z3}} = \left( \frac{x_0 + x_{n1}}{x_0 + x_{n3}} \right)^{1/2} \quad (33)$$

Veličina hoda  $x_0 \equiv h_n$  pokretnog sklopa ventila se određuje na osnovu jednačine kontinuiteta (uz uslov da su koeficijenti otpora sličnih ventila jednaki). Iz izraza za  $x_n$  se zaključuje da većim brzinama strujanja vazduha kroz ventile odgovara veća vrednost ugiba  $x_n$  opruge ventila radi obezbeđenja uslova stabilnog strujanja vazduha kroz ventile. Na osnovu analitičkog izraza vremena  $T_z$  zatvaranja ventila, lako se zaključuje da većem ukupnom hodu  $(x_0 + x_{ni})$  pokretnog sklopa ventila odgovara duže vreme zatvaranja. Za

konkretne podatke date u tabeli 3, analizom analitičkih izraza vremena zatvaranja dolazi se do zaključka:

- vremena zatvaranja ventila (pod dejstvom impulsa pritiska u frontu direktnog VUT-a), nazivnih prečnika 300 mm; 350 mm; 400 mm; 500 mm i 600 mm sa ugibima opruga  $x_{ni}$  koji odgovaraju brzini  $v = 20$  m/s su kraća za 11,16; 11,79; 12,18; 13,59 i 14,67 [%], respektivno, od vremena zatvaranja ventila sa ugibima opruga koja odgovaraju brzinama  $v = 30$  m/s.
- vremena zatvaranja ventila nazivnih prečnika 300 mm; 350 mm; 400 mm; 500 mm i 600 mm sa ugibima opruga  $x_{ni}$  koji odgovaraju brzini  $v = 25$  m/s su kraća za 5,63; 6,13; 6,36; 6,90 i 7,30 [%], respektivno, od vremena zatvaranja ventila sa ugibima opruga koja odgovaraju brzinama  $v = 30$  m/s.

Konstatacije date u tačkama 1. i 2. zaključka važe i za pneumatička vremena ventila pri pneumatskom zatvaranju ventila.

### Kriterijumi za izbor optimalnih rešenja ventila otpornih na dejstvo impulsa pritiska reflektovanog VUT-a

Kriterijumi za izbor optimalnih rešenja ventila bili bi:

- otpornost ventila na dejstvo impulsa reflektovanog VUT-a;
- vreme zatvaranja ventila pri dejstvu impulsa pritiska direktnog VUT-a;
- nazivni prečnik ventila i
- mehanički otpori strujanju vazduha kroz ventile u uslovima ventilacije, odnosno koeficijent otpora ventila.

Vreme zatvaranja  $T_z$  ventila je funkcija: mase pokretnog sklopa ventila, hoda pokretnog sklopa ventila, geometrijskih veličina ventila (prečnika membrane i cilindra), krutosti i ugiba opruga ventila, koje obezbeđuju stabilno strujanje vazduha u uslovima ventilacije.

Masa pokretnog sklopa ventila je funkcija prečnika ventila i debljine membrane ventila. Debljina membrane ventila je funkcija: otpornosti ventila, mehaničkih i dinamičkih karakteristika materijala otpornog na impulsa opterećenja.

Hod pokretnog sklopa je funkcija protočnih karakteristika ventila (vidi [1]).

Kod izbora optimalne debljine membrane ventila potrebno je imati u vidu zakonitosti: manja debljina membrane, manja masa, kraće vreme zatvaranja ventila i niža otpornost konstrukcija ventila na dejstvo impulsa pritiska reflektovanog VUT-a, i obrnuto.

Pri izboru optimalnih rešenja sličnih ventila otpornih na dejstvo impulsa pritiska reflektovanog VUT-a potrebno je poštovati zahtev: izabrati materijal membrane ventila male zapreminske mase, visokih mehaničkih i dinamičkih svojstava s aspekta otpornosti na dejstva impulsa pritiska reflektovanog VUT-a kako bi vreme zatvaranja ventila bilo što kraće, a da se ne naruše optimalne protočne karakteristike sličnih ventila.

Analiza uticaja nivoa osetljivosti pneumatskih ventila na vreme zatvaranja pri dejstvu VUT-a na pneumatska vremena zatvaranja ventila data je u prethodnom odeljku.

Problem izbora optimalnih rešenja ventila otpornih na dejstvo impulsa reflektovanog pritiska VUT-a svodi se na izbor optimalne debljine membrane ventila izrađene od materijala otpornog na dejstvo impulsa pritiska reflektovanog VUT-a. Kod izbora optimalnih rešenja ventila moguća

Tabela 4. Ulazni podaci za pneumatske protivudarne ventile

Veličina, oznaka i dimenzije		Nazivni prečnik ventila				
		300	350	400	500	600
spoljni prečnik membrane ventila	$D_m$ [m]	0,320	0,370	0,420	0,520	0,620
prečnik otvora membrane	$d$ [m]	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
prečnik cilindra membrane	$d_c$ [m]	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
spoljni prečnik klipa ventila	$D_1$ [m]	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
unutrašnji prečnik klipa ventila	$d_1$ [m]	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
krutost opruga ventila	$C$ [N/mm]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
zapreminska masa materijala membrane	$\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650	2650	2650	2650	2650
zapreminska masa materijala klipa	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2600	2600	2600	2600	2600
zapreminska masa materijala čaura klipa	$\rho_z$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8800	8800	8800	8800	8800
hod pokretnog sklopa ventila	$x_0$ [m]	0,045	0,057	0,070	0,095	0,120
masa opruge koja učestvuje u kretanju pokretnog sklopa $2/3 m_{opr}$	$m$ [kg]	0,110	0,120	0,180	0,190	0,200
masa steznog sklopa ventila	$m_s$ [kg]	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760
minimalna vrednost pritiska u frontu direktnog VUT-a	$p_f$ [N/m <sup>2</sup> ]	186000	186000	186000	186000	186000
maksimalna vrednost pritiska u frontu direktnog VUT-a	$p_f$ [N/m <sup>2</sup> ]	545195,8	545195,8	545195,8	545195,8	545195,8
debljina membrane ventila	$\delta$ [mm]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
		...	...	...	...	...
		7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
veličina za koju se obara oštra ivica membrane	$a_0$ [m]	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
ugibi opruga ventila koji obezbeđuju stabilno strujanje vazduha pri ventilaciji	$x_n$ [m]	0,0104	0,0142	0,0186	0,029	0,042
		0,0163	0,0222	0,029	0,045	0,065
		0,0234	0,032	0,042	0,065	0,093
ukupan hod pokretnog sklopa ventila	$(x_0 + x_n)$ [m]	0,0554	0,0712	0,0886	0,124	0,162
		0,0613	0,079	0,099	0,140	0,185
		0,0684	0,089	1,112	0,160	0,213

su dva pristupa: teorijski i teorijsko-eksperimentalni. Problem definisanja optimalnih rešenja ventila se svodi na problem izbora materijala membrane, otpornog na dejstvo impulsa pritiska reflektovanog VUT-a, kome se dozvoljavaju male trajne deformacije, takve da se funkcija ventila ne naruši a da vreme zatvaranja ventila bude minimalno.

Izbor optimalnih i po otpornosti univerzalnih rešenja ventila, na dejstvo reflektovanog VUT-a funkcija je postavljenih kriterijuma, odnosno zahteva (nivo otpornosti, vreme zatvaranja i protočne karakteristike) koji se želi ispuniti. Preciznije, ovde se radi o familiji optimalnih rešenja sličnih ventila.

Oblik i dimenzije ventila su odabrani tako da koeficijent otpora ventila, odnosno otpori ventila budu minimalni.

Iz uslova minimalnih otpora ventila, a na osnovu analitičkih izraza (12-15,21), kojima su definisani slični ventili konkretnih geometrijskih veličina ventila, nazivnih prečnika 300 mm; 350 mm; 400 mm; 500 mm i 600 mm, datih u tabeli 4, izračunate su i prikazane karakteristike familije sličnih ventila za određene nivoe otpornosti na dejstvo reflektovanog VUT-a i određene pragove osetljivosti  $x_n$  ventila u uslovima normalne ventilacije.

Plan eksperimenta vremena zatvaranja familije sličnih ventila otpornosti do 2500 kPa, pod dejstvom pritiska u frontu direktnog VUT-a u funkciji geometrijskih i radnih karakteristika, je dat u tabeli 5.

Tabela 5. Plan eksperimenta vremena zatvaranja ventila u funkciji otpornosti ventila na dejstvo VUT-a, geometrijskih i radnih karakteristika ventila

Prečnik membrane $D_m$ [mm]	Hod pokretnog sklopa ventila $x_n$ [mm]	Ugib opruge $x_p$ [mm]	Debljina membrane ventila $\delta$ [mm]	Pritisak $p_f$ [N/m <sup>2</sup> ] u frontu direktnog VUT-a				
				185736	252849	371192,6	460705	545195,8
				vreme zatvaranja ventila $T_z$ [ms]				
320	45	10,4	5,0					
			6,0					
			7,5					
		16,3	5,0					
			6,0					
			7,5					
	23,4	5,0						
		6,0						
		7,5						
	370	57	14,2	5,0				
				6,0				
				7,5				
22,2			5,0					
			6,0					
			7,5					
32		5,0						
		6,0						
		7,5						

Tabela 5 (nastavak)

420	70	18,6	5,0					
			6,0					
			7,5					
		29	5,0					
			6,0					
			7,5					
		42	5,0					
			6,0					
			7,5					
520	95	29	5,0					
			6,0					
			7,5					
		45	5,0					
			6,0					
			7,5					
		65	5,0					
			6,0					
			7,5					
620	120	42	5,0					
			6,0					
			7,5					
		65	5,0					
			6,0					
			7,5					
		93	5,0					
			6,0					
			7,5					

Analizom analitičkih izraza (12 i 13) dolazi se do zaključka:

- ventilima većih nazivnih prečnika odgovaraju duža vremena zatvaranja pri dejstvu impulsa pritiska direktnog VUT-a;
- ventilima višeg praga osetljivosti odgovaraju kraća vremena zatvaranja.

Izbor optimalnih i univerzalnih rešenja ventila po otpornosti na dejstvo reflektovanog VUT-a vrši se na osnovu postavljenih kriterijuma:

- nivoa otpornosti,
- vremena zatvaranja ventila usled dejstva impulsa pritiska direktnog VUT-a,
- nazivnih prečnika ventila i
- mehaničkih otpora strujanju vazduha kroz ventile (otpori ventila) u uslovima ventilacije.

### Zaključak

Na originalan način su definisane dinamičke karakteristike ventila s aspekta zatvaranja ventila pod dejstvom direktnog VUT-a nastalog pri nuklearnoj eksploziji, zavisno od otpornosti, geometrijskih karakteristika i karakteristika elastičnih elemenata sličnih ventila i nivoa osetljivosti na zatvaranje pod dejstvom direktnog VUT-a.

Definisan je analitički model procesa, postavljena diferencijalna jednačina kretanja pokretnog sklopa ventila pod neposrednim dejstvom VUT-a i data njena rešenja. Na osnovu ovog, posebno je obrađen analitički kriterijum za ocenu ventila s aspekta zatvaranja ventila nazivnih prečnika od

300 mm do 600 mm, otpornosti do 2000 kPa. Izvršena je kompleksna analiza uticaja karakterističnih veličina ventila na vremena zatvaranja ventila pod neposrednim dejstvom VUT-a. Iz uslova stabilnog strujanja vazduha kroz ventile minimalnih otpora ventila u uslovima normalne ventilacije, definisane su karakteristike elastičnih elemenata ventila i njihov uticaj na vremena zatvaranja ventila.

Definisani su opšti kriterijumi koji opredeljuju optimalna rešenja ventila otpornih na dejstvo reflektovanog VUT-a nuklearne eksplozije.

U narednim radovima definisaće se originalne metode pronalaženja analitičkih izraza vremena zatvaranja  $T_z$  ventila pod dejstvom pritiska direktnog VUT-a, analitičke ocene saglasnosti dobijenih analitičkih izraza sa teorijskim, odnosno eksperimentalnim podacima. Drugim rečima, biće definisane originalne analitičke metode pronalaženja analitičkih izraza vremena  $T_z$  zatvaranja familije sličnih ventila pod dejstvom pritiska direktnog VUT-a na osnovu teorijskih i eksperimentalnih podataka za  $T_z$ . Preciznije, radi se o transformaciji analitičkih izraza kojima su definisana vremena zatvaranja sličnih ventila u analitičke izraze, oblika:  $T_z = AF^b \delta^b p_f^c$ ,  $T_z = AD_m^a F^b \delta^c p_f^e$ , odnosno  $T_z = AD_m^a F_{x_0}^b F_{x_n}^c \delta^d p_f^e$ , na osnovu kojih je lakše vršiti potrebne analize. Biće definisani analitički izrazi koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije za ocenu nivoa saglasnosti izvedenih analitičkih izraza  $T_z$  sa teorijskim, odnosno eksperimentalno dobijenim podacima za  $T_z$ .

### Literatura

- [1] KNEŽEVIĆ, D. Metod analitičkog definisanja koeficijenata otpora i otpora sličnih pneumatičkih ventila. *Naučnotehnički pregled*, 1999, vol.49, no.2, p.24-37.
- [2] KNEŽEVIĆ, D. *Prilog analitičkom definisanju pneumatičkih karakteristika sistema ventila specijalne namene*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1994.
- [3] KNEŽEVIĆ, D. *Istraživanje optimalnih rešenja ventila za zaštitu od vazdušnouđarnih talasa nuklearne eksplozije u vazduhu i uporedna analiza teorijskih i eksperimentalnih rezultata*. magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1983.
- [4] RAŠKOVIĆ, D. *Teorija oscilacija*. Naučna knjiga, Beograd, 1965.
- [5] RADOSAVLJEVIĆ, L.J. *Teorija oscilacija*. III izdanje, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1872.
- [6] VUJANOVIĆ, B. *Dinamika*. Naučna knjiga, Beograd, 1976.
- [7] KNEŽEVIĆ, D. Nalaženje analitičkog izraza vremena zatvaranja protivudarnih ventila. *Naučnotehnički pregled*, 1985, vol.35, no.9, p.6-13.
- [8] KNEŽEVIĆ, D. Analitički metod definisanja hidrauličkog protivudarnog ventila. *Naučnotehnički pregled*, 1986, vol.36, no.8, p.11-22.
- [9] MANDIĆ, J. *Simulatori impulsa pritiska*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1974.
- [10] MANDIĆ, J. *Ostvarenje udarnog kratkotrajnog impulsa pritiska u udarnim cevima izjednačavajućeg pritiska*. Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1976.
- [11] SCHARDIN, H. Simulierung von Druckstossen beliebig langer Dauer in einem Stosswellenrohr. *Wehrtechnische Monatsheft*, 1966, 4.

Rad primljen: 11.3.1999.god.