Mr Zoran Ristić,
potpukovnik, dipl. inž.

Inverzni postupak proračuna veličina kretanja trzajuće mase artiljerijskog oruđa pomoću računara

Uvod

Protivtrzajući uređaj obezbeđuje elastičnu vezu između cevi i lafeta artiljerijskog oruđa.

Projektovanjem protivtrzajućeg uređaja (PTU) definišu se brojni parametri i karakteristike, pre svega hidraulične kočnice i povratnika. Ako je konstrukciono rešenje glavnih delova PTU poznato, jedan od važnih problema u praksi jeste — kako izvršiti identifikaciju njegovog ponašanja pri opaljenju metka. U tu svrhu se primenjuje tzv. inverzni postupak proračuna trzanja i vraćanja. On je posebno važan kada se menjaju uslovi gađanja ili proveravaju konstruktivni oblici regulirajućih otvora za proticanje tečnosti i drugi elementi hidraulične kočnice.

U literaturi postoji nekoliko metoda za dobijanje rešenja inverznim postupkom [1], [2], [3], [4]. Zajedničko za sve metode jeste što se do rešenja traženih veličina dolazi iterativnim postupkom i što među njima nema bitnih razlika.

U prvom delu ovog rada izložena je suština matematičkog modela inverznog postupka trzanja i vraćanja i navedeni su potrebni polazni podaci za proračun. U drugom delu dat je prikaz predložene

nog načina rešenja pomoću programskog modela na računaru i kraći komentar dobijenih rezultata.

Inverzni postupak proračuna kretanja pri trzanju

Proračun kretanja trzajuće mase inverznim postupkom trzanja [2] obuhvata dva perioda:

1. period od početka trzanja do kraja perioda naknadnog dejstva barutnih gasova na trzajuću masu,

2. period od kraja prvog perioda do zaustavljanja trzajuće mase.

Prvi period trzanja (metoda prof.

I. I. Ivanova)

Ceo period od početka trzanja do kraja naknadnog dejstva barutnih gasova na trzajuću masu deli se na vremenske intervale Δt . Vreme (Δt) intervala je malo, pa se usvaja da je sila ukupnog otpora trzanju (R) u okviru intervala konstanta i jednaka njenoj srednjoj vrednosti, slika 1.

Neka su u nekom trenutku vremena t_{i-1} poznate veličine puta trzanja X_{i-1} , brzine trzanja V_{i-1} i sile otpora trzanju R_{i-1} . Da bi se odredile njihove vrednosti u trenutku t_i , polazi se od jednačine kretanja trzajuće mase:

$$M_t \frac{dV}{dX} = P_c - R_{\text{otr}} \quad (1)$$

Sl. 1 Promena sile, puta i brzine kočenog trzanja

odnosno u integralnom obliku:

$$\int_{V_{i-1}}^V dV = -\frac{1}{M_t} \left[\int_0^t P_c dt - R_{isr} \int_0^t dt \right] \quad (2)$$

gde su:

M_t — masa trzajućih delova;

P_c — sila pritiska barutnih gasova na dno cevi;

R_{isr} — srednja vrednost sile otpora trzanju u toku intervala.

Kako je prvi integralni član na desnoj strani relacije:

$$\frac{1}{M_t} \int_0^t P_c dt = W - W_{i-1}$$

gde su:

W — brzina slobodnog trzanja u toku intervala Δt ;

W_{i-1} — brzina slobodnog trzanja na početku intervala,

dobija se tekuća vrednost brzine kočenog trzanja u intervalu:

$$V = W - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{R_{isr}}{M_t} t \quad (3)$$

Na kraju intervala je:

$$V_i = W_i - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{R_{isr}}{M_t} \Delta t \quad (4)$$

Integriranjem (3) dobija se izraz za put kočenog trzanja na kraju intervala:

$$X_i = X_{i-1} + (L_i - L_{i-1}) - (W_{i-1} - V_{i-1}) \Delta t - \frac{R_{isr}}{2M_t} (\Delta t)^2 \quad (5)$$

Pri tome je: $\int_0^t W dt = L - L_{i-1}$

Brzina i put slobodnog trzanja trzajuće mase (W , L), za vreme dok se projektil nalazi u cevi, određuje se [8] prema izrazima:

$$W = \frac{m + 0,5 \omega}{M_t + m + \omega} \cdot v \quad (6)$$

$$L = \frac{m + 0,5 \omega}{M_t + m + \omega} \cdot l \quad (7)$$

gde su:

v , l — relativna brzina i put projektila koji se dobijaju unutrašnjim balističkim proračunom (UBP).

U periodu dejstva barutnih gasova, brzina i put slobodnog trzanja dobijaju se na osnovu relacije (za zakon isticanja po Bravinu), ako je oruđe bez gasne kočnice:

$$W = W_u + \frac{b P_{cu}}{M_t} \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) i$$

$$L = L_u + W_u t + \frac{P_{cu}}{M_t} b \left[t - b \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \right],$$

gde je:

$$b = \frac{(\beta - 0,5) \omega}{P_{cu}} v_0 \text{ — parametar eksponencijalne funkcije;}$$

t — vreme u toku perioda isticanja barutnih gasova;

$\tau = b \cdot \ln(0,5 p_v)$ — trajanje perioda naknadnog dejstva (isticanja) barutnih gasova;

β — koeficijent naknadnog dejstva barutnih gasova.

Kako jednačine (4 i 5) sadrže tri promenljive: X_i , V_i i R_{isr} , rešavaju se postupkom iteracije (uzastopnim približavanjem).

Za prvu iteraciju uzima se da je: $R_{isr}^{(1)} = R_{i-1}$. Za prvi interval važi da je $R_{isr}^{(0)} = R_0$, a početna vrednost sile određuje se po izrazu:

$$R_0 = \Pi_0 + T_k - Q_t \sin \varphi;$$

$\Pi_0 = p_0 A$ — početna sila povratnika;

$T_k = Q_t (\mu \cos \varphi_g + v)$ — sila trenja na klizačima kolevke i u zaptivačima PTU;

Q_t — sila težine trzajuće mase.

Na osnovu jednačine (4 i 5) preko $R_{isr}^{(1)}$ se zatim odrede veličine V_i i X_i i sa tim vrednostima računaju se sile hidraulične kočnice trzanja i povratnika.

Za kočnicu trzanja vretenastog tipa (sa kontraklipnjačom promenljivog poprečnog preseka) sila kočnice je definisana izrazom:

$$K_i = \frac{k_2 q}{2} \left[\left(\frac{A}{a_i} + 1 \right)^2 A + \frac{k_3}{k_2} \frac{A_M^3}{\Omega^2} \right] V_i^2 \quad (8)$$

$$K_i = f(a_i) V_i^2 \quad (9)$$

Oznake za konstantne površine elemenata kočnice u (8) su:

$A = A_k - A_p$; $A_k = (D^2 - d^2) \cdot \pi / 4$ — radna površina klipa;

$A_p = d_p^2 \cdot \pi / 4$ — površina regulirajućeg prstena;

$A_M = d_i^2 \cdot \frac{\pi}{4}$ — površina klipa kočnice vraćanja;

$\Omega = n d_M^2 \cdot \pi / 4$ — površina prstenastog zazora između zidova klipnjače i prečnika kontraklipnjače na mestu veze sa klipom kočnice vraćanja;

$a = (d_p^2 - d_i^2) \cdot \pi / 4$ — promenljiva površina prstenastog zazora između regulirajućeg prstena i kontraklipnjače.

Trenutna vrednost prečnika kontraklipnjače δ mora se odrediti za svaki položaj klipa na putu trzanja X . Za dovoljno male pomake klipa prema sli-

Sl. 2 Zavisnost δ i puta trzanja x

ci 2 može se postaviti relacija koja važi za slučaj da se prečnik δ menja linearno između preseka X_{i-1} i X_i .

$$\frac{X_i - X}{X - X_{i-1}} = \frac{\delta_i - \delta}{\delta - \delta_{i-1}} = y, \text{ odakle je:} \\ = \frac{\delta_i + y \delta_{i-1}}{1 + y} \quad (10)$$

Sila hidropneumatskog povratnika određuje se jednačinom koja vredi za bilo koju tačku trzanja:

$$\Pi_i^{(1)} = P_0 \cdot A \cdot [H_0 / (H_0 - X_i^{(1)})]^n \quad (11)$$

gde je:

$H_0 = W_0 / A$ — svedena početna visina gasnog stuba u povratniku,

W_0 — početna zapremina gasa (azota) u povratniku,

n — koeficijent politrope gasa (usvaja se $n=1, 3$).

Ukupna sila trenja za vreme trzanja može se usvojiti konstantom i određena je izrazom [4]:

$$T_k = Q_t (\mu \cos \varphi + v) \quad (12)$$

Za drugu iteraciju uzima se da je (2, 1 — oznake iteracije):

$$R_{isr}^{(2)} = K_i^{(1)} + \Pi_i^{(1)} + T_k - Q_t \sin \varphi \quad (13)$$

Na osnovu $R_{ist}^{(2)}$ ponovo se određuju parametri kretanja $V_i^{(2)}$ i $X_i^{(2)}$, a zatim na sličan način, kao kod prve iteracije, veličine: $K_i^{(2)}$, $\Pi_i^{(2)}$ i $R_{ist}^{(3)}$. Proračun se izvodi sve dok se vrednosti sile $R_{ist}^{(n)}$ ne poklope u okviru zadate tačnosti izračunavanja sa njenim vrednostima u prethodnom približenju $R_{ist}^{(n-1)}$.

Sila otpora na kraju intervala dobija se iz izraza:

$$R_{ist} = \frac{R_{i-1} + R_i}{2}, \text{ odakle je}$$

$$R_i = 2 R_{ist} - R_{i-1} \quad (14)$$

Veličina R_i predstavlja polazni podatak za prvu iteraciju na sledećem intervalu Δt . Postupak proračuna može se jednostavno prikazati shemom prema slici 3.

Sl. 3 Shema proračuna perioda trzanja

Drugi period trzanja (metoda prof. A. A. Toločkova)

U ovom periodu za promenljivu se uzima preostali put trzanja koji se deli na (i) intervala veličine $\Delta X = (5-10)$ mm. Polazni uslovi za ovaj period su proračunate veličine dobijene na kraju prvog perioda trzanja. Za svaki interval puta trzanja važi energetska relacija:

$$\frac{M_t \cdot V_i^2}{2} - \frac{M_t \cdot V_{i-1}^2}{2} = R_{ist} \Delta X \quad (15)$$

Kako je: $R_{ist} = \frac{R_{i-1} + R_i}{2}$, onda će s obzirom na (15), biti:

$$V_i^2 = V_{i-1}^2 - \frac{R_{i-1} + R_i}{M_t} \Delta X \quad (16)$$

Na kraju intervala put trzanja je:

$$X_i = X_{i-1} + \Delta X$$

Sila ukupnog otpora trzanju na kraju intervala:

$R_i = K_i + \Pi_i + T_K - Q_t \sin \varphi$, gde se komponente sile određuju: K_i prema (9), Π_i prema (11) i T_K prema (12).

Nakon uvođenja relacije za R_i u (14) i sređivanja izraza dobija se konačan izraz za brzinu trzanja u drugom periodu.

$$V_i^2 = V_{i-1}^2 - \frac{R_{i-1} + \Pi_i + T_K - Q_t \sin \varphi + f(a_i) \cdot V_{i-1}^2}{\frac{M_t}{\Delta X} + f(a_i)} \quad (17)$$

Proračun se izvodi dok ne bude zadovoljen uslov da je $V_i = 0$. U slučaju da je $V_i^2 < 0$, pristupa se izračunavanju dužine puta trzanja za koji je $V_i^2 = 0$, slika 4.

Sl. 4 Određivanje veličine K_x za uslov $V_i = 0$

Prema slici 4 iz odnosa trougla može se postaviti relacija:

$$K_x = \frac{\Delta X V_{i-1}^2}{|V_i^2| + V_{i-1}^2}, \text{ odakle je}$$

ukupna dužina trzanja: $\lambda = X_{i-1} + K_x$,

Kako je vreme trzanja na svakom intervalu:

$$\Delta t_i = \frac{M_t |V_i - V_{i-1}|}{R_{ist}} \quad (18)$$

to je ukupno vreme trzanja (n je broj intervala u oba perioda)

$$T_t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (19)$$

Inverzni postupak proračuna elemenata kretanja pri vraćanju

Za određivanje elemenata kretanja trzajuće mase pri vraćanju primjenjen je metod prof. Toločkova [4]. U suštini, metoda je analogna rešavanju drugog perioda trzanja.

Za promenljivu se uzima put vraćanja y . Celi put vraćanja podeli se na (i) intervala veličine Δy i na svakom od njih se usvaja da je vrednost r jednaka srednjoj vrednosti rezultante sile vraćanja $r = r_{\text{isr}}$ u okviru intervala. Polazni podaci za proračun su veličine na kraju drugog perioda trzanja, pa praktično proračun vraćanja trzajuće mase u prednji položaj nadovezuje na proračun trzanja.

Za svaki interval puta važi jednačina:

$$\frac{M_t \cdot U_i^2}{2} - \frac{M_t \cdot U_{i-1}^2}{2} = r_{\text{isr}} \cdot \Delta y \quad (20)$$

Kako je: $r_{\text{isr}} = \frac{r_{i-1} + r_i}{2}$, izraz za brzinu vraćanja trzajuće mase na kraju intervala je:

$$U_i^2 = U_{i-1}^2 + \frac{r_{i-1} + r_i}{M_t} \Delta y \quad (21)$$

U opštem obliku rezultatna sila vraćanja je:

$$r_i = \Pi'_i - K_v - M_i \quad (22)$$

gde je:

$\Pi'_i = \Pi_i - (Q_t \sin \varphi + T_K)$ — »višak« sile u povratniku,

$$K_v = \frac{k_2 \cdot \varrho}{2} \cdot \frac{A_{kv}^3}{a_i^2} U^2 = f(a_i) \cdot U^2$$

— sila kočnice trzanja pri vraćanju,

$A_{kv} = (D^2 - d_p^2) \cdot \pi/4$ — radna površina klipa kočnice trzanja pri vraćanju,

$$M = \frac{K_M \cdot \varrho}{2} \cdot \frac{A_M^3}{a_M^2} U^2 = f(a_M) \cdot U^2$$

— sila kočnice vraćanja,

a_M — ukupna površina poprečnog preseka kanala kočnice vraćanja.

Površina poprečnog preseka kanala kočnice vraćanja a_M računa se tako da se odredi jednačina pravca koju čini dno kanala, a koja glasi:

$$d_k(y) = l_{kn} - y d_k / l_{kn}$$

(važi samo za delove sa linearnom promenom dubine).

Na osnovu nje se za svaku tačku vraćanja (y) može jednostavno odrediti površina poprečnog preseka kanala $a_{Mi}(y)$.

Pošto je na početku intervala vraćanja sila vraćanja:

$$r_{i-1} = \Pi'_{i-1} - [f(a_i)_{i-1} + f(a_M)_{i-1}] U_{i-1}^2,$$

to se nakon jednostavnih transformacija i sređivanja u relaciji (21) konačno dobija jednačina za izračunavanje brzine vraćanja na svakom intervalu, odnosno ukupnom putu vraćanja $y = \lambda$.

$$U_i^2 = \frac{B_i U_{i-1}^2 + C_i}{A_i} \quad (23)$$

gde je:

$$A_i = 1 + \left[f(a_i)_i + f(a_M)_i \right] \frac{\Delta y}{M_t}$$

$$B_i = 1 - \left[f(a_i)_{i-1} + f(a_M)_{i-1} \right] \frac{\Delta y}{M_t}$$

$$C_i = (\Pi'_i + \Pi'_{i-1}) \cdot \frac{\Delta y}{M_t}$$

Za proračun vremena vraćanja trzajuće mase, polazna jednačina je:

$$M_t U_i - M_t U_{i-1} = r_{\text{isr}} \cdot \Delta t_i,$$

odnosno:

$$\Delta t_i = \frac{|M_t \cdot U_i - U_{i-1}|}{r_{\text{isr}}} \quad (24)$$

Ukupno vreme vraćanja je:

$$t_v = \sum_{i=1}^i \Delta t_i \quad (25)$$

U programu za elektronski računar, izrađenom na osnovu matematičkog modela, veličina intervala $\Delta y = 0,05$ m, osim na početku vraćanja na dužini od 0,1 m i na kraju vraćanja na dužini 0,05 m, gde je $\Delta y = 0,002$ m. Razlog za to je nagla promena sila K_v i M na tim dužinama vraćanja, pa bi veće vrednosti intervala Δy smanjile tačnost proračuna.

Polazni podaci za proračun

Za određivanje veličina kretanja inverznim postupkom, prema poglavljima 2 i 3 pomoću računara, treba da se definišu tri grupe početnih podataka:

- a) početni podaci za rešavanje unutrašnjeg balističkog (UB) proračuna;
- b) početni podaci za proračun veličina trzanja i vraćanja;
- c) početni podaci za određivanje prečnika kontraklipnjače (δ_x) kočnice trzanja i dubine kanala (d_k) kočnice vraćanja.

Sl. 5

Osnovna objašnjenja za ove grupe podataka su sledeća:

- a) Ova grupa obuhvata sve potrebne podatke za projektil, barutno punjenje i cev koji su neophodni za UB proračun koji se izvodi po metodi Drozdova (kako je usvojena u radu). U slučaju kombinovanog barutnog punjenja može se primeniti metoda Opokova.

b) Potrebni podaci za proračun veličina trzanja i vraćanja određuju se na osnovu raspoložive konstruktivne dokumentacije ili mera konstrukcije. Obuhvataju geometrijske i težinske parametre elemenata protivtrzajućeg uređaja i karakteristike tečnosti i oruđa. Na primeru artiljerijskog oruđa i rešenja PTU, za hidrauličnu kočnicu vretenastog tipa (sl. 5) i hidropneumatski povratnik (sl. 6) šematski su prikazani neki od podataka [10].

Sl. 6

Ostali parametri su:

- l_{kn} — dužina kanala kočnice vraćanja u šupljini klipnjače;
- d_k — širina kanala kočnice vraćanja;
- k_2, k_M — koeficijenti otpora proticanja tečnosti u kočnici;
- μ — koeficijent trenja na kliznim površinama kolevke;

- v — koeficijent trenja na zaptivačima;
- φ — ugao elevacije cevi;
- ρ — specifična masa hidraulične tečnosti;
- M_t — masa trzajućih delova;
- P_0 — početni pritisak gasa u povratniku.

c) Ovim podacima treba da se odredi kakva je promena prečnika kontraklipnjače i dubine kanala kočnice vraćanja na celoj dužini. Do podataka se dolazi merenjem na što je moguće

pomoću programa IPT dobijeni su rezultati prikazani dijagramima: na slici 8 data je promena brzine trzanja $V(X)$, na slici 9 promena sile povratnika $\Pi(X)$, na slici 10 promena sile hidraulične ko-

Sl. 7 Promena prečnika kontraklipnjače

manjim intervalima ukupne dužine. Na primeru razmatranog tipa hidraulične kočnice, promena $\delta(x)$ grafički je prikazana na slici 7.

Rezultati proračuna i zaključak

Za rešavanje razmatranog problema pomoću računara izrađeno je odgovarajuće programsko rešenje. Strukturu programskog rešenja čini: glavni program IPT (Inverzni Postupak Trzanja) i programi UBP (za UB proračun) i FDELTA (za određivanje prečnika kontraklipnjače).

Na osnovu podataka za odabrani primer oruđa i izvedeno rešenje glavnih delova PTU, prema slikama 5 i 6,

Sl. 8

Sl. 9

Sl. 11

Sl. 10

Sl. 12

čnice trzanja $K(X)$, a na slici 11 promena ukupne sile otpora trzanja $R(X)$ na putu trzanja X za period vraćanja trzajuće mase, na slici 12 prikazana je promena brzine vraćanja $U(y)$, na slici 13 promena sile kočnice trzanja pri vraćanju $K_v(y)$, a na slici 14 promena sile kočnice vraćanja $M(y)$ na putu vraćanja y .

Kvalitativni tok promena prikazanih veličina za period trzanja i vraćanja

ukazuje na veliku sličnost sa odgovarajućim podacima u literaturi [4], [5]. To dalje upućuje na zaključak da je prikazani model dovoljno korektan.

Izložena metoda je jednostavna i omogućuje brzu identifikaciju svih veličina pri analizi PTU oruđa, a posebno potrebne korekcije izmenom uticajnih parametara (npr. pritiska u povratniku, specifične mase tečnosti, koeficijentata otpora proticanju, ugla elevacije), i sl.

Sl. 13

Sl. 14

U razmatranoj metodi inverznog postupka moguće je uzeti u obzir uticaj stišljivosti tečnosti, promenu trenja na klizačima i zaptivačima elemenata PTU, veličine tolerancija delova u kočnici, povratniku, i dr.

Izloženi model može se koristiti pri analizi konkretnih sistema, jer je metoda dovoljno tačna i pouzdana. Verifikovana je na većem broju praktičnih primera u raznim uslovima upotrebe protivtrzajućeg uređaja.

Literatura:

- [1] N. Gordienko i dr.: »Teorija i rasčot artiljerijskih oruđij«, Penza, 1987.
- [2] F. Samusenko i dr.: »Osnovi projektovanja artiljerijskoga vooruženja i tankov i samohodnih artiljerijskih ustanovok«, Moskva, 1958.
- [3] K. Greten i dr.: »Projektovanje i proizvodstvo artiljerijskih sistema«, voeno izdateljstvo, Moskva, 1949.
- [4] A. Toločkov: »Teorija lafetov artiljerijskih ustanovok«, VIM obroni, Moskva, 1960.
- [5] A. Rodin i dr.: »Dinamičeskie izmerenija v artiljerijskoj praktike«, Penza, 1968.

- [6] A. Paligorić: »Prilog teoriji vraćanja artiljerijskih sistema«, NTP 3/1969.
- [7] A. Paligorić i dr.: »Projektovanje artiljerijskih oruđia«, NTP 9/1971.
- [8] M. Cvetković: »Unutrašnja balistika I i II«, TŠC Zagreb, 1981.
- [9] Z. Ristić: »Proračun protivtrzajućeg sistema«, TŠC, Zagreb, 1982.
- [10] I. Bukvić: Diplomski rad, CVTS, Zagreb, 1985.
- [11] R. Obrenović: »Artiljerijska oruđia«, II deo, TŠC, Zagreb, 1975.