

PROJEKTOVANJE ARTILJERIJSKIH ORUĐA

ODREĐIVANJE ELEMENATA KRETANJA TRZAJUĆIH DELOVA

Razmatranjem uslova stabilnosti i nepokretnosti vučnog artiljerijskog oruđa utvrđeno je da je neophodan elastični lafet, odnosno ugradnja protivtrzajućeg uređaja. Da bi se obezbedila potrebna stabilnost oruđa neophodna je određena promena sile kočenja pri trzanju i pri vraćanju. Pri tome je potrebno odrediti zavisnost brzine i puta kretanja trzajućih delova od sile trzanja (F_{trz}) i rezultatne sile otpora (R) pri trzanju, odnosno od rezultante sile (r) koja deluje na trzajuće delove pri vraćanju. Pošto ne postoji analitička zavisnost $F_{trz}(t)$, elementi kretanja trzajućih delova ne mogu se dobiti integraljenjem diferencijalne jednačine kretanja trzajućih delova. Zato se analiza kretanja trzajućih delova vrši u tri faze:

1. Određivanje elemenata slobodnog trzanja, odnosno kretanja pod dejstvom sile F_{trz} bez ikakvog kočenja.
2. Određivanje elemenata kočenog trzanja, odnosno kretanja pod dejstvom sile kočenja R .
3. Određivanje elemenata vraćanja, odnosno kretanja pod dejstvom sile r .

ODREĐIVANJE ELEMENATA KRETANJA PRI TRZANJU

Slobodno trzanje

Kretanje trzajućih delova pri slobodnom trzanju počinje pod dejstvom sile barutnih gasova (sile trzanja - F_{trz}) istovremeno sa kretanjem projektila u cevi. Elementi slobodnog trzanja su brzina W i put L .

U prvom periodu (kretanje projektila u cevi) i u drugom periodu (isticanje barutnih gasova iz cevi) slobodnog trzanja diferencijalna jednačina kretanja trzajućih delova je:

$$M_0 \frac{dW}{dt} = F_{trz} \quad (1)$$

Diferencijalna jednačina kretanja trzajućih delova u trećem periodu slobodnog trzanja (kretanje po inerciji) je:

$$M_0 \frac{dW}{dt} = 0 \quad (2)$$

Pošto ne postoji analitička zavisnost sile F_{trz} od vremena, elementi kretanja se u prvom periodu određuju primenom zakona o održanju količine kretanja sistema trzajući delovi – projektil – barutno punjenje. Usvajaju se sledeće pretpostavke:

- masa barutnog punjenja je ravnomerno raspoređena između dna barutne komore i dna projektila.
- brzina kretanja barutnih gasova i nesagorelih barutnih zrna menja se linearno - od brzine slobodnog trzanja (koju imaju barut i gasovi na dnu barutne komore), do brzine projektila (koju imaju gasovi i nesagoreli barut na dnu projektila). Tako se polovina barutnog punjenja kreće brzinom projektila, a druga polovina brzinom trzajućih delova.

Pošto je pre opaljenja količina kretanja sistema bila jednaka nuli, a pri opaljenju nema spoljašnjih sila (sila F_{trz} je u razmatranom sistemu unutrašnja sila) dobija se:

$$(M_0 + 0.5 m_b) W = (m_p + 0.5 m_b) \cdot (V_p - W) \quad (3)$$

- M_0** - masa trzajućih delova
 m_b - masa barutnog punjenja
 m_p - masa projektila
 V_p - brzina projektila u odnosu na cev

Brzina slobodnog trzanja u prvom periodu je:

$$W = \frac{m_p + 0.5 m_b}{M_0 + m_p + m_b} V_p \quad (4)$$

Put slobodnog trzanja u prvom periodu je:

$$L = \frac{m_p + 0.5 m_b}{M_0 + m_p + m_b} l \quad (5)$$

- l** - put projektila u cevi

Zavisnosti **$V_p(t)$** i **$l(t)$** dobijaju se iz unutrašnjebalističkog proračuna.

Brzina i put slobodnog trzanja u drugom periodu dobijaju se integracijom izraza (1), pri čemu se usvaja sledeći zakon promene sile **F_{trz}** tokom pražnjenja cevi:

$$F_{trz} = A_s p = A_s p_u e^{-t/b} \quad (6)$$

- A_s** - površina poprečnog preseka cevi na koju deluju barutni gasovi
 p_u - pritisak barutnih gasova u trenutku izlaska projektila iz cevi
 b - parametar isticanja barutnih gasova

Integracijom jednačine (1) dobijaju se brzina i put slobodnog trzanja u drugom periodu:

$$W = W_u + \frac{b}{M_0} (A_s p_u - F_{trz}) \quad (7)$$

$$L = L_u + W_u t + \frac{b}{M_0} [A_s p_u t - b (A_s p_u - F_{trz})] \quad (8)$$

gde se indeks **u** odnosi na trenutak izlaska projektila iz cevi. Veličine **W_u** i **l_u** dobijaju se iz jednačina (4) i (5) kada se u njima **V_p** zameni početnom brzinom projektila **V_0** , odnosno **l** zameni ukupnim putem projektila u cevi **l_u** .

Parametar isticanja **b** određuje se iz izraza:

$$b = \frac{(\beta - 0.5) m_b}{A_s p_u} V_0 \quad (9)$$

- β** - koeficijent dejstva barutnih gasova na trzajuće delove

Koeficijent **β** predstavlja odnos između srednje brzine isticanja barutnih gasova i početne brzine projektila. Ova zavisnost se dobija iz unutrašnjebalističkih razmatranja:

$$\beta = \frac{2}{\kappa(k+1)} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \frac{p_u}{p_{sr}} \cdot \frac{\sqrt{\kappa p_u \frac{W_0 + A_s l_u}{m_b}}}{V_0} \quad (10)$$

gde su:

- κ - odnos specifičnih toplota barutnih gasova (c_p/c_v)
- W_0 - početna zapremina barutne komore
- p_{sr} - srednji pritisak barutnih gasova tokom pražnjenja cevi

Za $\kappa = 1.25$ odnos $\frac{p_u}{p_{sr}} \sim 1.225$, pa se dobija izraz za približan proračun:

$$\beta = 1.48 \frac{\sqrt{1.25 p_u \frac{W_0 + A_s l_u}{m_b}}}{V_0} \quad (11)$$

Vreme trajanja isticanja barutnih gasova određuje se iz jednačine (6), pri čemu se za kraj procesa uzima trenutak kada je pritisak u cevi 2 bar. Tada je (sa p_u u barima):

$$t_{ist} = b \ln \frac{p_u}{2} \quad (12)$$

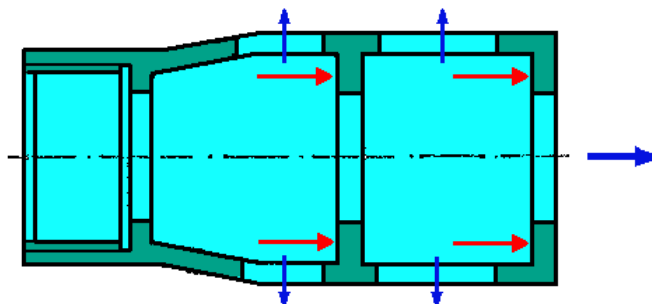
Prikazani postupak određivanja elemenata slobodnog trzanja izveden je za slučaj kada oruđe nema gasnu kočnicu. U narednom poglavlju se razmatra uticaj gasne kočnice na slobodno trzanje.

Određivanje uticaja gasne kočnice na elemente slobodnog trzanja

Gasna kočnica (GK) je uređaj koji se montira na usta cevi sa zadatkom da smanji ukupni impuls sile barutnih gasova, odnosno silu trzanja u toku isticanja barutnih gasova iz cevi. Ukupna sila trzanja smanjuje se odvođenjem dela barutnih gasova kroz bočne otvore na gasnoj kočnici.

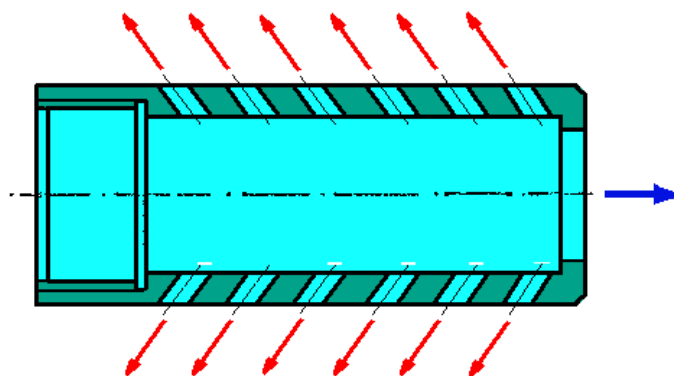
Prema principu dejstva, odnosno koncepciji konstrukcionog rešenja, postoje tri tipa gasnih kočnica.

1. GASNA KOČNICA AKTIVNOG TIPA ima u svojoj šupljini prstenaste pregrade normalne na osu kanala cevi, Deo barutnih gasova udara u ove pregrade, čime se stvara sila koja deluje u smeru suprotnom od smera sile trzanja. Nakon udara u pregradu barutni gasovi se izbacuju kroz bočne otvore, čija osa je normalna na osu cevi.



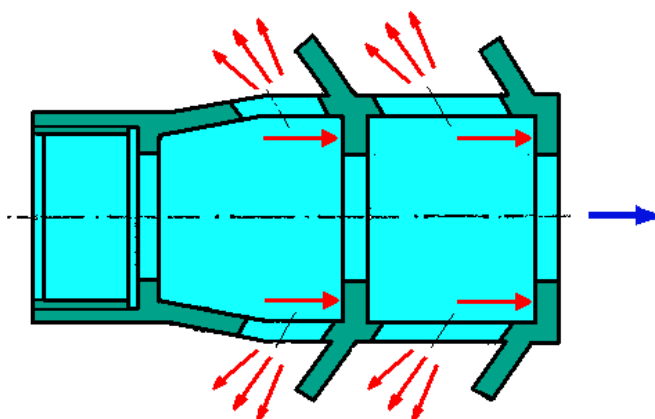
Slika 1. Gasna kočnica aktivnog tipa

2. GASNA KOČNICA REAKTIVNOG TIPA nema unutrašnje pregrade. Deo barutnih gasova ističe kroz bočne otvore okrenute unazad pod izvesnim uglom u odnosu na osu kanala cevi. Budući da su bočni otvori gasne kočnice simetrični u odnosu na osu kanala cevi, horizontalne komponente reaktivne sile, koja nastaje usled skretanja struje barutnih gasova, uravnotežuju se, a komponente u pravcu ose cevi deluju u smeru suprotnom od smeru trzanja. Ova reaktivna sila se pojačava ako se bočni kanali šire prema izlaznom otvoru (ekspanzija gasova u divergentnom otvoru).



Slika 2. Reaktivna gasna kočnica

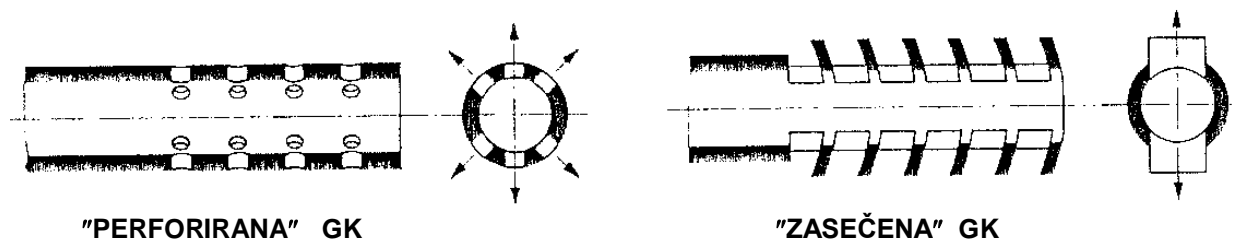
1. GASNA KOČNICA AKTIVNO-REAKTIVNOG TIPA objedinjuje dobre osobine prethodna dva tipa kočnica.



Slika 3. Aktivno-reaktivna gasna kočnica

Zbog jednostavne konstrukcije i zadovoljavajuće efikasnosti najširu primenu u praksi imaju jednokomorne i dvokomorne gasne kočnice aktivno-reaktivnog tipa. Višekomorne gasne kočnice se retko primenjuju, jer se u prve dve komore apsorbira oko 90 % ukupne energije koju apsorbira gasna kočnica.

Pored klasičnih kočnica sa komorama kod savremenih sistema primenjuju se i gasne kočnice specijalnog oblika (Sl. 4), koje veoma malo povećavaju masu cevi..



Slika 4. Gasne kočnice specijalnog oblika

Osnovni nedostatak gasnih kočnica je pojava udarnih talasa na pravcu isticanja barutnih gasova iz bočnih otvora, odnosno pojava nadpritiska i izražene buke oko oruđa na mestima gde je smeštena posluga. Zato je pri upotrebi gasnih kočnica visoke efikasnosti neophodno da posluga bude opremljena odgovarajućim zaštitnim sredstvima.

Gasna kočnica ne utiče na vreme trajanja procesa isticanja barutnih gasova, bez obzira na svoje karakteristike, pa sila trzanja u ovom periodu ima ranije navedeni oblik:

$$F_{tr,z,gk} = A_s p_{u,gk} e^{-t/b} \quad (13)$$

$p_{u,gk}$ - pritisak barutnih gasova u cevi u trenutku izlaska projektila, kada postoji GK

Osnovne karakteristike gasnih kočnica su:

- koeficijent efikasnosti ξ
- impulsna karakteristika χ
- konstrukciona karakteristika α

Pri projektovanju gasne kočnice njene konstrukcione dimenzije se određuju tako da se ostvari zahtevani **koeficijent efikasnosti** ξ , koji predstavlja relativnu količinu energije trzajućih delova koju apsorbuje gasna kočnica:

$$\xi = \frac{M_0 \frac{W_\tau^2}{2} - M_0 \frac{W_{\tau,gk}^2}{2}}{M_0 \frac{W_\tau^2}{2}} = 1 - \left(\frac{W_{\tau,gk}}{W_\tau} \right)^2 \quad (14)$$

W_τ - brzina slobodnog trzanja na kraju perioda isticanja barutnih gasova, kada nema GK

$W_{\tau,gk}$ - brzina slobodnog trzanja na kraju perioda isticanja barutnih gasova, sa ugrađenom GK

Iz jednačine (14) dobija se odnos maksimalnih brzina slobodnog trzanja sa i bez GK:

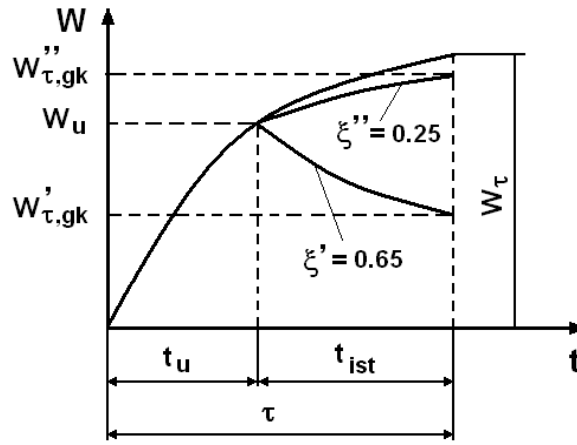
$$W_{\tau,gk} = W_\tau \sqrt{1 - \xi} \quad (15)$$

Jednačina (14) dobijena je uz zanemarivanje povećanja mase trzajućih delova usled ugradnje gasne kočnice (masa GK je daleko manja od mase trzajućih delova).

Primenom gasnih kočnica različite efikasnosti u manjoj ili većoj meri se smanjuje brzina slobodnog trzanja tokom pražnjenja cevi. Ovo je prikazano na slici 5.

Impulsna karakteristika χ predstavlja odnos impulsa sile trzanja oruđa sa gasnom kočnicom i impuls sile trzanja oruđa bez gasne kočnice:

$$\chi = \frac{M_0 (W_{\tau,gk} - W_u)}{M_0 (W_\tau - W_u)} = \frac{W_\tau \sqrt{1 - \xi} - W_u}{W_\tau - W_u} \quad (16)$$



Slika 5. Promena brzine slobodnog trzanja za različite vrednosti koeficijenta efikasnosti GK

Znajući vrednost impulsne karakteristike može se odrediti sila trzanja kod oruđa sa GK:

$$\chi = \frac{\int_{t_u}^{\tau} F_{\text{trz,gk}} dt}{\int_{t_u}^{\tau} F_{\text{trz}} dt} = \frac{p_{u,\text{gk}}}{p_u} \rightarrow F_{\text{trz,gk}} = \chi A_s p_u e^{-t/b} \quad (17)$$

Impulsna karakteristika se može izraziti preko koeficijenta efikasnosti na sledeći način:

$$\chi = \frac{\sqrt{1-\xi}(m_p + \beta m_b) - (m_p + 0.5 m_b)}{(\beta - 0.5)m_b} \quad (18)$$

Pošto impulsna karakteristika može biti veća od nule, manja od nule ili jednaka nuli, brzina trzajućih delova u periodu isticanja može da se smanjuje, povećava ili da ostane nepromenjena.

Na osnovu prethodnih razmatranja, za određivanje promene brzine i puta slobodnog trzanja u periodu isticanja barutnih gasova, u slučaju kada je ugrađena GK, primenjuju se izrazi:

$$W = W_u + \chi \frac{b}{M_0} A_s p_u \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \quad (19)$$

$$L = L_u + W_u t + \chi \frac{b}{M_0} A_s p_u \left[t - b \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \right] \quad (20)$$

Konstrukciona karakteristika α gasne kočnice predstavlja odnos:

$$\alpha = \frac{\beta_{\text{gk}}}{\beta} \quad (21)$$

gde je:

$$\beta_{\text{gk}} = \frac{\sqrt{1-\xi}(m_p + \beta m_b) - m_p}{m_b} \quad (22)$$

koeficijent dejstva barutnih gasova na trzajuće delove kada postoji gasna kočnica.

Jednačine (18) i (22) dobijene su korišćenjem uprošćenja izraza (4), odnosno:

$$W_u = \frac{m_p + 0.5 m_b}{M_0} V_0, \quad W_\tau = \frac{m_p + \beta m_b}{M_0} V_0$$

Sada se impulsna karakteristika χ može predstaviti prostijim izrazom:

$$\chi = \frac{\alpha \beta - 0.5}{\beta - 0.5} \quad (23)$$

Na osnovu vrednosti konstrukcione karakteristike α može se odrediti potrebna površina bočnih otvora gasne kočnice. Relativna količina barutnih gasova koja prolazi kroz centralni otvor i-te komore gasne kočnice je:

$$\eta_i = \frac{S_{oi}}{S_{oi} + \varsigma S_{bi}} \quad (24)$$

gde su:

S_{oi} - površina centralnog otvora i-te komore

S_{bi} - površina najmanjeg preseka bočnog otvora i-te komore

$\varsigma = 0.467 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{8} \right)^{4.5}$ - koeficijent gubitaka barutnih gasova kroz bočne otvore

θ - ugao nagiba ose bočnih otvora u odnosu na normalu na osu kanala cevi

Za višekomornu gasnu kočnicu sa istim uglom θ u komorama moguće je izraz za α napisati u obliku koji omogućava određivanje potrebne površine bočnih otvora:

$$\alpha = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n - (1 - \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n) \sin \theta \quad (25)$$

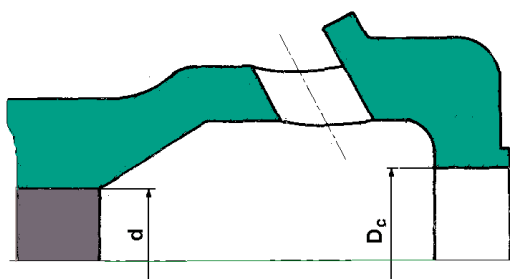
U slučaju da je $\eta_1 = \eta_2 = \cdots = \eta_n = \eta$ jednačina (25) postaje:

$$\alpha = \eta^n - (1 - \eta^n) \sin \theta \quad (26)$$

Projektovanje gasne kočnice

Pri projektovanju gasne kočnice treba se pridržavati sledećih preporuka:

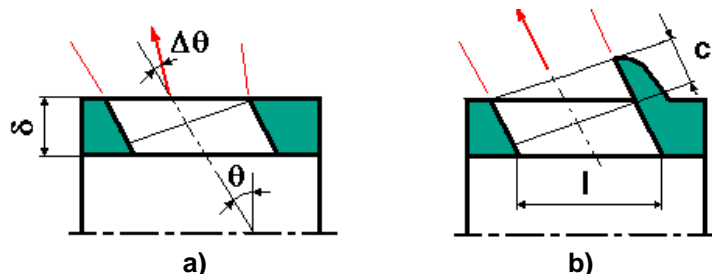
1. Neophodno je da se prvi red bočnih otvora na gasnoj kočnici nalazi na udaljenosti od najmanje jednog kalibra od usta cevi, da se ne bi smanjila efikasnost. Prečnik centralnih otvora u pregradama između komora treba da bude $D_c \geq (1.1 \div 1.15) \cdot d$, kako bi se omogućio bezbedan prolazak projektila (Sl.6). Ose bočnih otvora moraju da se nalaze u horizontalnoj ravni, da bi se smanjila pojava prašine na vatrenom položaju pri isticanju barutnih gasova.



Slika 6.

2. Budući da se vrednost efikasnosti gasne kočnice i parametara udarnog talasa određuju korišćenjem srednje vrednosti ugla nagiba ose bočnih otvora θ , nije celishodno projektovati bočne otvore sa različitim θ .

3. Pri uglovima $\theta > 0$ na izlazu iz bočnih otvora usmerenih unazad javlja se takozvani "kosi presek" (sl. 7-a) u kome se ugao isticanja barutnih gasova smanjuje. Da bi se isključio uticaj "kosog preseka" na efikasnost gasne kočnice neophodno je na konstrukciji predvideti lopatice čiji ugao nagiba odgovara nagibu bočnog otvora (sl. 7-b). Radna dužina lopatica određuje se iz izraza:



Slika 7. Skretanje struje gasova u "kosom preseku" (a); Određivanje dužine lopatica (b)

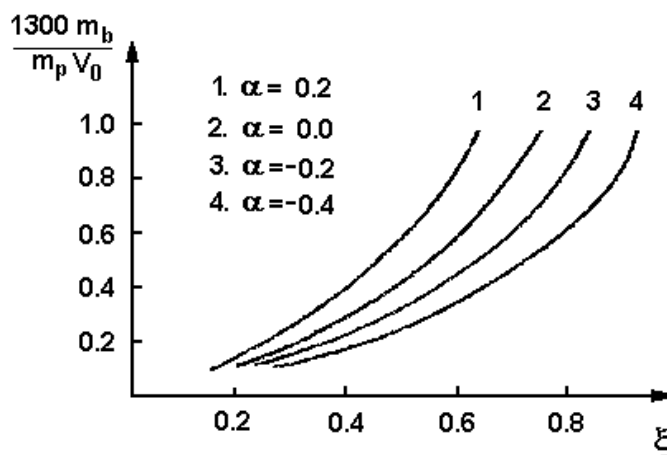
$$c = l \sin \theta \quad (27)$$

4. Širina bočnih otvora određuje se iz uslova otpornosti tela gasne kočnice u predelu otvora. Dužina bočnih otvora određuje se na osnovu potrebne površine bočnih otvora za dobijanje potrebne konstruktivne karakteristike α . Najveća dužina bočnih otvora gasne kočnice bez lopatica određena je uslovom:

$$l \leq \frac{2\delta}{\sin 2\theta} \quad (28)$$

5. Značajan uticaj na efikasnost gasne kočnice ima balistička karakteristika oruđa, koja se određuje izrazom $\frac{1300 m_b}{m_p V_0}$. Znajući vrednosti konstrukcione karakteristike GK i balističke

karakteristike oruđa može se, pre pristupanja detaljnoj razradi konstrukcije gasne kočnice, odrediti očekivana vrednost njene efikasnosti. U tu svrhu se koristi dijagram prikazan na slici 8. Uočava se da se visoka efikasnost gasne kočnice dobija samo pri velikim vrednostima balističke karakteristike.



Slika 8. Određivanje koeficijenta efikasnosti gasne kočnice

6. Prečnik šupljine komore gasne kočnice određuje se iz uslova da se sva količina gasova koja udara u prednji zid komore, odvodi u stranu, kroz bočne otvore:

$$D_p = \sqrt{\frac{4}{\pi}(S_o + \zeta S_b)} \quad (29)$$

7. Sila koja deluje na pregrade, odnosno lopatice gasne kočnice, prema kojoj se vrši proračun njene otpornosti, određuje se izrazom:

$$R_{gk,max} = (1 - \chi) A_s p_u \quad (30)$$

Napon u najmanjem poprečnom preseku gasne kočnice (u predelu navoja za vezu sa cevi), uzimajući u obzir dinamičko dejstvo opterećenja, određuje se izrazom:

$$\sigma_{z,max} = 1.25 \frac{R_{gk,max}}{A} \quad (31)$$

gde je A – površina poprečnog preseka.

Koeficijent sigurnosti (η) u odnosu na granicu razvlačenja (σ_T) materijala gasne kočnice mora da bude:

$$\eta = \frac{\sigma_T}{\sigma_{z,max}} > 1.5$$

8. Kada je potrebno odrediti koeficijent efikasnosti projektovane gasne kočnice u promenjenim radnim uslovima ili gasne kočnice poznate konstrukcije primenjuje se izraz:

$$\xi = 1 - \left(\frac{1 + \alpha \frac{\beta m_b}{m_p}}{1 + \frac{\beta m_b}{m_p}} \right)^2 \quad (32)$$

Pri korišćenju oruđa sa gasnom kočnicom neophodno je da se stalno proverava njeno stanje i ispravnost. U slučaju oštećenja ili uništenja gasne kočnice zabranjeno je gađanje zato što se znatno povećava opterećenje lafeta oruđa.

Kočeno trzanje

Kretanje trzajućih delova pri kočenom trzanju razmatra se u istim periodima kao pri analizi slobodnog trzanja:

- I period - kretanje projektila u cevi
- II period - isticanje barutnih gasova
- III period - kretanje trzajućih delova pod dejstvom sile otpora trzanju.

Diferencijalna jednačina kretanja trzajućih delova u prva dva perioda ima oblik:

$$M_0 \frac{dV}{dt} = F_{trz} - R \quad (33)$$

a u trećem periodu:

$$M_0 \frac{dV}{dt} = -R \quad (34)$$

Integracijom jednačine (33), uz odgovarajuće početne uslove za prvi period ($W_o=V_o=L_o=X_o=0$) i drugi period ($W_o=W_u$, $V_o=V_u$, $L_o=L_u$, $X_o=X_u$) i budući da je:

$$\frac{1}{M_0} \int_0^t F_{trz} dt = W - W_o \quad (35)$$

Dobijaju se brzina i put kočenog trzanja:

Prvi period
$$V = W - \frac{1}{M_0} \int_0^t R(t) dt \quad (36)$$

$$X = L - \frac{1}{M_0} \int_0^t \int_0^t R(t) dt dt \quad (37)$$

Drugi period
$$V = W - (W_u - V_u) - \frac{1}{M_0} \int_0^t R(t) dt \quad (38)$$

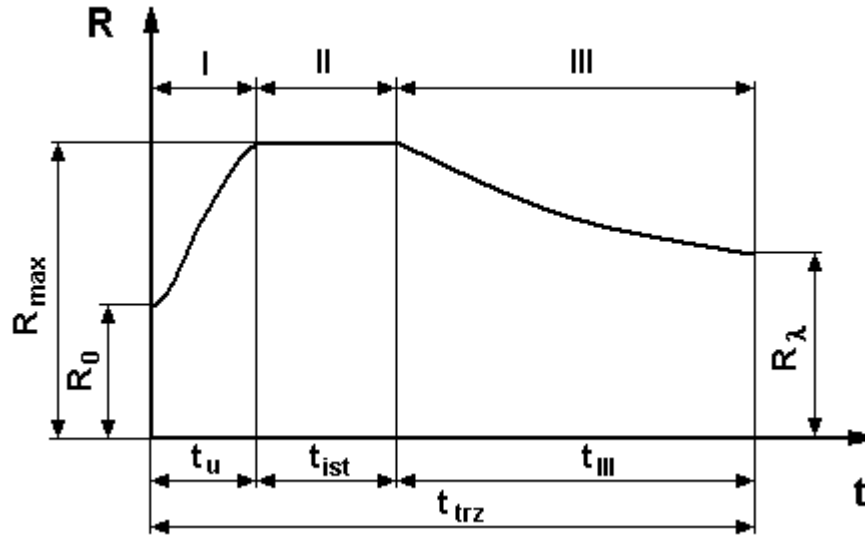
$$X = L - (L_u - X_u) - (W_u - V_u)t - \frac{1}{M_0} \int_0^t \int_0^t R(t) dt dt \quad (39)$$

Navedeni izrazi pokazuju da je pri određivanju elemenata kočenog trzanja neophodno poznavati odgovarajuće elemente slobodnog trzanja i zakon promene sile otpora trzanju. Elementi slobodnog trzanja određuju se iz jednačine kretanja trzajuće mase pod dejstvom sile F_{trz} . Pri projektovanju se zakon promene sile $R(t)$ unapred zadaje i treba da zadovolji sledeće zahteve:

- Najveća vrednost sile otpora trzanju ne sme biti veća od njene najveće dozvoljene vrednosti, dobijene iz uslova stabilnosti oruđa pri trzanju.
- Kočenje kretanja trzajućih delova mora da bude ravnomerno, a njihova kinetička energija mora potpuno da se amortizuje na zadatoj dužini trzanja i u određenom vremenu.
- Opterećenje lafeta pri opaljenju mora da bude najmanje moguće.

Navedeni zahtevi su međusobno povezani, pa nivo njihovog ispunjavanja zavisi od projektovanog oruđa.

Na slici 9 prikazana je promena sile $R(t)$ za vučno artiljerijsko oruđe. R_0 , R_{max} i R_k su početna, maksimalna i krajnja (na kraju trzanja) vrednost sile otpora trzanju.



Slika 9. Promena sile otpora trzanju

Stvarnoj promeni sile otpora trzanju u toku prvog perioda najviše odgovara zakonitost:

$$R = R_0 + (R_{\max} - R_0) \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{t_u} \right) \quad (40)$$

Uvođenjem zakonitosti (40) u jednačine (36) i (37) i odgovarajućim integracijama dobijaju se brzina i put kočenog trzanja u prvom periodu:

$$V = W - \frac{1}{M_0} \left(A t - \frac{B}{k} \sin k t \right) \quad (41)$$

$$X = L - \frac{1}{M_0} \left[A t^2 - \frac{B}{k^2} (1 - \cos k t) \right] \quad (42)$$

gde su:

$$A = \frac{R_{\max} + R_0}{2} \quad ; \quad B = \frac{R_{\max} - R_0}{2} \quad ; \quad k = \frac{\pi}{t_u}$$

Koeficijent k karakteriše porast sile R (ako je k manje porast sile je ravnomerniji). Pošto je u drugom periodu trzanja $R = R_{\max} = \text{const}$, na osnovu izraza (38) i (39) dobijaju se brzina i put kočenog trzanja u drugom periodu:

$$V = W - (W_u - V_u) \frac{R_{\max} t}{M_0} \quad (43)$$

$$X = L - (L_u - X_u) - (W_u - V_u) t - \frac{R_{\max} t^2}{2 M_0} \quad (44)$$

Najveća brzina kočenog trzanja javlja se najčešće u toku drugog perioda, u trenutku kada je $R_{\max} = F_{\text{trz}}$, odnosno kada je $M_0 \frac{dV}{dt} = 0$, i određuje se izrazom:

$$V_{\max} = W_R - (W_u - V_u) \frac{R_{\max}}{M_0} t_R \quad (45)$$

gde su:

$t_R = b \ln \frac{A_s p_u}{R_{\max}}$ - vreme (u okviru drugog perioda) postizanja najveće brzine trzanja

$W_R = W_u + \frac{b}{M_0} (A_s p_u - R_{\max})$ - brzina slobodnog trzanja u trenutku t_R

Odgovarajući put kočenog trzanja određuje se izrazom:

$$X_R = L_R - (L_u - X_u) - (W_u - V_u) t_R - \frac{R_{\max} t_R^2}{2 M_0} \quad (46)$$

gde je:

$L_R = L_u + W_u t_R + \frac{b}{M_0} [A_s p_u t_R - b (A_s p_u - R_{\max})]$ - put slobodnog trzanja u trenutku t_R

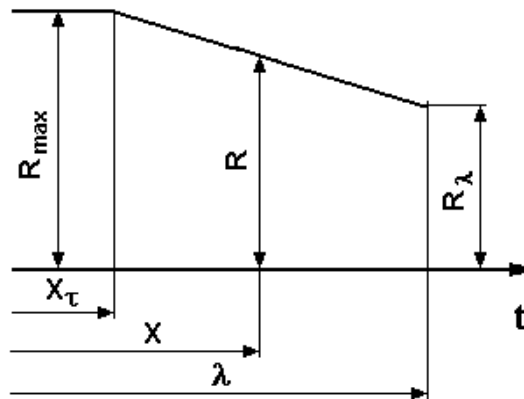
Nakon odgovarajućih transformacija dobija se:

$$V_{\max} = V_u + \frac{b A_s p_u}{M_0} - \frac{R_{\max}}{M_0} (t_R + b) \quad (47)$$

$$X_R = X_u + V_u t_R + \frac{b A_s p_u}{M_0} (t_R - b) - \frac{R_{\max}}{M_0} \left(\frac{t_R^2}{2} - b^2 \right) \quad (48)$$

Elementi kretanja trzajućih delova u trećem periodu kočenog trzanja određuju se u zavisnosti od izabranog zakona njihovog kočenja. Na slici 10 prikazan je zakon promene sile $R(X)$ za vučno artiljerijsko oruđe. Tekuća vrednost sile R (linearna zavisnost $R(X)$) određuje se izrazom:

$$R = R_{\lambda} + \frac{R_{\max} - R_{\lambda}}{\lambda - X_{\tau}} (\lambda - X) \quad (49)$$



Slika 10. Promena sile R u trećem periodu trzanja

Kinetička energija trzajućih delova na kraju II perioda mora u III periodu da se utroši na rad sile otpora do kraja trzanja: $\frac{M_0 V_\tau^2}{2} = \int_{X_\tau}^{\lambda} R(X) dX$. U trenutku kada su trzajući delovi prešli put X , za linearnu zavisnost $R(X)$ je: $\frac{M_0 V^2}{2} = \int_X^{\lambda} R(X) dX = \frac{R + R_\lambda}{2}(\lambda - X)$, odnosno

$$V^2 = \frac{1}{M_0} (R + R_\lambda)(\lambda - X) \quad (50)$$

Posle uvođenja izraza (49) u jednačinu (50) dobija se brzina trzanja u III periodu:

$$V^2 = \frac{1}{M_0} \left[2R_\lambda + \frac{R_{\max} - R_\lambda}{\lambda - X_\tau} (\lambda - X) \right] (\lambda - X) \quad (51)$$

Iz jednačine koja daje promenu količine kretanja trzajućih delova u III periodu dobija se vreme njegovog trzanja:

$$t_{III} = \sqrt{\frac{M_0 (\lambda - X_\tau)}{R_{\max} - R_\lambda}} \ln \frac{R_\lambda}{R_{\max} - \sqrt{R_{\max}^2 - R_\lambda^2}} \quad (52)$$

U postupku projektovanja artiljerijskih oruđa potrebno je da se obezbedi zahtevani zakon kočenja kretanja trzajućih delova. Da bi se sagledale mogućnosti ostvarivanja traženog zakona promene sile otpora trzanju R potrebno je izvršiti analizu njenih komponenti.

Trzajući delovi se vraćaju i drže u prednjem položaju dejstvom sile u povratniku. Energija za vraćanje akumulira se u povratniku u toku trzanja (radno telo je gas ili opruga). Veličina početne sile u povratniku određuje se iz uslova da je obezbeđeno pouzdano vraćanje i držanje trzajućih delova u prednjem položaju pri svim elevacijama:

$$\Pi_0 \geq M_0 g \sin \varphi_{\max} + M_0 g f \cos \varphi_{\max} + v M_0 g \quad (53)$$

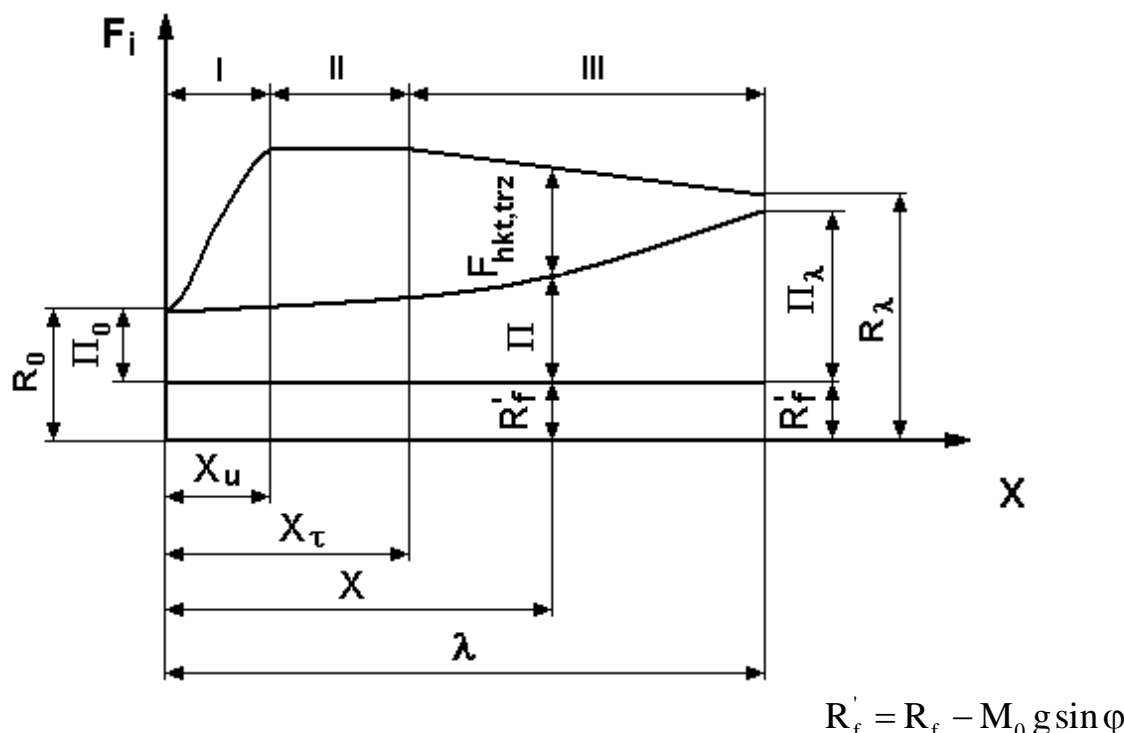
- φ_{\max} - maksimalni ugao elevacije oruđa
- $M_0 g \sin \varphi_{\max}$ - komponenta sile težine trzajućih delova u pravcu trzanja
- $f M_0 g \cos \varphi_{\max}$ - sila trenja na klizačima kolevke ($f = 0.16 - 0.20$)
- $v M_0 g$ - sila trenja na kliznim površinama i u zaptivačima protivtrzajućeg uređaja ($v = 0.2 - 0.4$)

Opšti izraz za određivanje vrednosti sile R u toku trzanja ima oblik:

$$R = \Pi + F_{\text{hkt, trz}} + R_f - M_0 g \sin \varphi \quad (54)$$

- Π - sila u povratniku
- $F_{\text{hkt, trz}}$ - sila hidrauličnog otpora kočnice trzanja pri trzanju
- $R_f = M_0 g (f \cos \varphi + v)$ - sila trenja na klizačima kolevke i u zaptivačima protivtrzajućeg uređaja
- $M_0 g \sin \varphi$ - komponenta sile težine trzajućih delova u pravcu trzanja (znak "-" odgovara slučaju ($\varphi > 0$))

Na dijagramu promene sila koje deluju na trzajuće delove pri trzanju (sl.11) uočava se da je traženi zakon kočenja moguće obezbediti samo odgovarajućim izborom sile hidrauličnog otpora u kočnici trzanja $F_{hkt,trz}$. Zbog toga je jedan od osnovnih zahteva pri projektovanju hidraulične kočnice trzanja ostvarivanje tražene sile $F_{hkt,trz}$.



Slika 11. Sile koje deluju na trzajuće delove pri trzanju

Početna vrednost sile R određuje se izrazom:

$$R_0 = \Pi_0 + R_f - M_0 g \sin \varphi = \Pi_0 + R'_f \quad (55)$$

Najveća vrednost sile R određuje se iz uslova uzdužne stabilnosti oruđa pri opaljenju:

$$R_{\max} = n_t \frac{M_b g D_0 - M_0 g X_\tau \cos \varphi_{gr}}{h_{gr}} \quad (56)$$

- n_t - koeficijent sigurnosti za stabilnost pri trzanju ($n_t=0.85-0.95$)
- M_b - masa oruđa u borbenom položaju
- D_0 - horizontalno rastojanje od središta mase oruđa pre opaljenja do projekcije oslonca krakova lafeta na vertikalnu ravan koja sadrži osu cevi
- φ_{gr} - granični ugao elevacije cevi u pogledu stabilnosti oruđa (najčešće $\varphi_{gr}=0$)
- h_{gr} - visina vatrene linije oruđa (pri $\varphi_{gr}=0$)
- X_τ - put kočenog trzanja na kraju II perioda (na kraju dejstva sile F_{trz})

Za određivanje vrednosti sile R_{\max} koristi se metod postepenog približavanja. Umesto nepoznate vrednosti X_τ , u prvoj aproksimaciji se uzima poznata vrednost L_τ određena iz jednačine (20) sa vremenom $t=t_{ist}$ (jednačina (12)). Na osnovu ovako usvojene sile R_{\max} izračunavaju se svi parametri kočenog trzanja u I i II periodu, pa prema tome i X_τ prema jednačini (44) sa vremenom $t=t_{ist}$ (jednačina (12)). Ova vrednost se uvodi u jednačinu (56), čime

se dobija nova vrednost R_{\max} , veća od prve. Postupak se ponavlja sve dok se nova vrednost sile R_{\max} ne razlikuje od prethodne za manje od 1 %. Tek tada se određuju konačne vrednosti za V_{τ} i X_{τ} .

Vrednost sile R na kraju trzanja određuje se takođe iz uslova uzdužne stabilnosti oruđa:

$$R_{\lambda} = n_t \frac{M_b g D_0 - M_0 g \lambda \cos \varphi_{gr}}{h_{gr}} \quad (57)$$

Iz jednačine (50) napisane za kraj II perioda dobija se ukupna dužina trzanja:

$$\lambda = \frac{M_0 V_{\tau}^2}{R_{\max} + R_{\lambda}} + X_{\tau} \quad (58)$$

Kada se u jednačini (58) zamene veličine R_{\max} i R_{λ} izrazima (56) i (57), nakon transformacija se dobija ukupna dužina trzanja u sledećem obliku:

$$\lambda = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (59)$$

gde su:

$$A = M_0 g \cos \varphi_{gr} \quad ; \quad B = 2 M_b g D_0 \quad ; \quad C = \frac{h_{gr}}{n_t} M_0 V_{\tau}^2 - A X_{\tau}^2 + B X_{\tau}$$

Dužina trzanja dobijena proračunom mora da bude manja od dozvoljene dužine trzanja koja proizilazi iz uslova da zadnjak pri trzanju, pri najvećoj elevaciji, ne udara u tlo.

Izračunate vrednosti X , V i $F_{hkt,trz}$ koriste se u postupku određivanja protočnih otvora u kočnici trzanja koji treba da obezbede zahtevanu promenu sile $F_{hkt,trz}$, odnosno zakon kočenja kretanja trzajućih delova.

ODREĐIVENJE ELEMENATA KRETANJA PRI VRAĆANJU

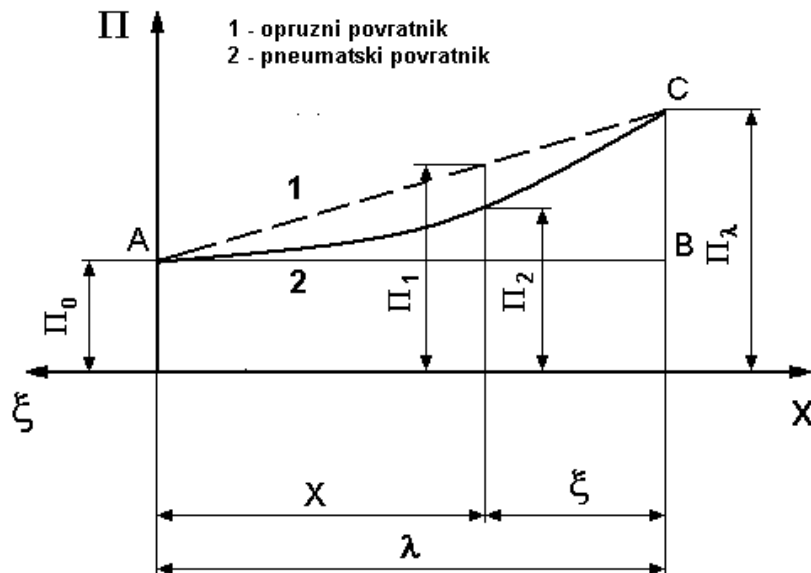
Vraćanje je kretanje trzajućih delova, nakon završetka trzanja, u položaj koji su u odnosu na nepokretni lafet imali pre opaljenja. Kretanje pri vraćanju je posledica dejstva sile u povratniku, u kome se u toku trzanja akumulira deo kinetičke energije trzajućih delova.

Na slici 12 prikazana je promena sile u opružnom (1) i pneumatskom (2) povratniku na putu trzanja λ .

Pošto se u toku trzanja u povratniku akumulira više energije nego što je potrebno za vraćanje trzajućih delova pri najvećem uglu elevacije φ (potrebna energija jednaka je $\Pi_0 \cdot \lambda$), preostala energija povratnika (površina ABC) mora da se absorbuje pri vraćanju. Zbog toga se na oruđe ugrađuje hidraulična kočnica vraćanja.

Preostala sila u povratniku Π' određuje se izrazom:

$$\Pi' = \Pi - M_0 g (f \cos \varphi + \sin \varphi + v) \quad (60)$$



Slika 12. Promena sile u povratniku u toku trzanja

Ova sila je najveća pri najmanjem elevacionom uglu. Obično se elementi kretanja trzajućih delova pri vraćanju određuju pri $\varphi_{\min}=0$ rad. Teorija i eksperimenti su pokazali da se, ako je kočnica vraćanja proračunata za $\varphi>0$, pri gađanju sa $\varphi=0$ rad javlja veoma izražena nestabilnost pri vraćanju u vidu pomeranja celog oruđa napred i obrtanja cevi naniže oko tačke prednjeg oslonca.

Sila u povratniku na kraju trzanja ne može biti veća od sile otpora na kraju trzanja R_λ , pa se najčešće usvaja da je:

$$\Pi_\lambda \leq R_\lambda - R_f + M_0 g \sin \varphi_{gr} \quad (61)$$

Proračunom elemenata kretanja pri vraćanju određuju se brzina vraćanja U (u zavisnosti od veličine rezultante sile pri vraćanju r), promena sile hidrauličnog otpora kočnice vraćanja F_{hkv} na putu vraćanja ξ i vreme vraćanja t_{vra} .

U toku vraćanja mora da se obezbedi:

- potpuno amortizovanje energije trzajućih delova,
- najmanje moguće vreme vraćanja,
- stabilnost oruđa uz zahtevanu otpornost njegovih delova.

Vrednost rezultante sile u toku vraćanja određuje se izrazom:

$$r = \Pi' - F_{hkv} - F_{hkt,vra} \quad (62)$$

F_{hkv} - sila hidrauličnog otpora kočnice vraćanja

$F_{hkt,vra}$ - sila hidrauličnog otpora kočnice trzanja pri vraćanju

Iz uslova stabilnosti oruđa pri vraćanju dobija se za rezultantu sila:

$$r \leq r_{gr} = n_v \frac{M_b g (L - D_0) + M_0 g (\lambda - \xi) \cos \varphi}{h'_{gr}} \quad (63)$$

$$r_2 = \Pi' - F_{hkv} = 0 \quad (64)$$

Treći period počinje u trenutku poništavanja vakuuma koji se javlja u hidrauličnoj kočnici na kraju trzanja. Zapremina vakuuma jednaka je zapremini dela klipnjače koji se izvuče iz cilindra hidraulične kočnice pri trzanju. Put koji trzajući delovi pređu do poništavanja vakuuma je:

$$\xi_v = \lambda \frac{d^2}{D^2} \quad (65)$$

- d** - spoljašnji prečnik klipnjače
- D** - unutrašnji prečnik cilindra kočnice
- λ** - dužina trzanja

U tom trenutku na trzajuće delove deluje, pored sile F_{hkv} , i sila u kočnici trzanja pri vraćanju $F_{hkt,vra}$. Da bi promena sile pri prelazu iz drugog u treći period bila kontinualna, neophodno je da bude ispunjen sledeći uslov (koji je obavezan u slučaju primene vraćanja sa pet perioda):

$$r_v = F_{hkt,vra(v)} \leq r_{gr} \quad (66)$$

Kretanje trzajućih delova u ovom periodu je usporeno.

U toku **četvrtog perioda** trzajući delovi produžavaju kretanje brzinom koju su imali na kraju trećeg perioda pošto je rezultanta r jednaka nuli.

U toku **petog perioda** amortizuje se deo kinetičke energije trzajućih delova koji je preostao nakon kočenja u trećem periodu. Pri tome mora da postoji uslov:

$$r_5 \leq r_{gr} \quad (67)$$

Da bi se obezbedilo energično i pouzdano dosedanje trzajućih delova na kraju vraćanja, njihova brzina u trenutku udara u odgovarajuće odbojnice mora da bude $U_k=0.02-0.05$ m/s.

a) Elementi vraćanja u prvom periodu

Pređeni put vraćanja u toku prvog perioda određuje se iz energetske jednačine:

$$\frac{M_0 U_{\max}^2}{2} = \frac{1}{2} \Pi'_\lambda \xi_I = \Omega_I \quad (68)$$

odnosno

$$\xi_I = \frac{M_0 U_{\max}^2}{\Pi'_\lambda} = \frac{2\Omega_I}{\Pi'_\lambda} \quad (69)$$

Promena brzine trzajućih delova u toku prvog perioda vraćanja određuje se iz energetske jednačine za odgovarajući put vraćanja ξ :

$$U^2 = \frac{\Pi'_\lambda}{M_0} \left(2 - \frac{\xi}{\xi_I} \right) \xi \quad (70)$$

Sila u kočnici vraćanja menja se linearno:

$$F_{hkv} = \Pi'_I \frac{\xi}{\xi_I} \quad (71)$$

Vreme trajanja prvog perioda određuje se izrazom:

$$t_I = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi_I}{U_{\max}} \quad (72)$$

b) Elementi vraćanja u drugom periodu

Sila u kočnici vraćanja određuje se iz izraza (64): $F_{hkv} = \Pi'$

Brzina vraćanja u toku ovog perioda jednaka je brzini U_{\max}

Vreme trajanja drugog perioda određuje se izrazom:

$$\Delta t_{II} = \frac{\xi_v - \xi_I}{U_{\max}} \quad (73)$$

Veličina puta vraćanja do poništavanja vakuuma u kočnici ξ_v poznata je ukoliko su poznate konstrukcione mere hidraulične kočnice (jednačina (65)).

c) Elementi vraćanja u trećem periodu

U okviru ovog perioda obično se usvaja da se amortizuje 40-70 % kinetičke energije Ω_I koju trzajući delovi imaju na kraju drugog perioda, odnosno:

$$\Omega_{III} = k \Omega_I = (0.4 \div 0.7) \Omega_I = \frac{r_v}{2} (\xi_{III} - \xi_v) \quad (74)$$

Ako se usvoji da je promena sila r_3 i Π' linearna, rezultanta sila se u okviru ovog perioda menja po zakonu:

$$r_3 = r_v \frac{\xi_{III} - \xi}{\xi_{III} - \xi_v} \quad (75)$$

Put vraćanja na kraju trećeg perioda određuje se izrazom:

$$\xi_{III} = \xi_v + \frac{2\Omega_{III}}{r_v} \quad (76)$$

Brzina vraćanja određuje se iz energetske jednačine:

$$\frac{M_0 U^2}{2} - \frac{M_0 U_{\max}^2}{2} = -\frac{r_v + r_3}{2} (\xi - \xi_v) \quad (77)$$

odnosno

$$U^2 = U_{\max}^2 - \frac{r_v + r_3}{M_0} (\xi - \xi_v) \quad (78)$$

Sila u kočnici vraćanja određuje se izrazom:

$$F_{hkv} = \Pi' + r_3 - F_{hkt,vra} \quad (79)$$

gde je $F_{hkt,vra}$ sila u kočnici trzanja koja odgovara putu $X=\lambda-\xi$ i brzini vraćanja U .

Vreme trajanja trećeg perioda određuje se približno izrazom:

$$\Delta t_{III} = \frac{2(\xi_{III} - \xi_v)}{U_{III} + U_{max}} \quad (80)$$

gde je U_{III} - brzina vraćanja na kraju trećeg perioda.

d) Elementi vraćanja u četvrtom i petom periodu

U toku petog perioda vraćanja amortizuje se preostala kinetička energija trzajućih delova:

$$\Omega_v = (1 - k)\Omega_I \quad (81)$$

Rezultanta r se u toku petog perioda menja linearno, a njena najveća vrednost r_k mora biti manja od dopuštene vrednosti (određene iz uslova stabilnosti pri vraćanju).

Put vraćanja trzajućih delova u toku petog perioda određuje se izrazom:

$$\Delta \xi_v = \frac{2(1 - k)\Omega_I}{r_k} \quad (82)$$

U toku četvrtog perioda brzina vraćanja je jednaka brzini U_{III} . Na osnovu odgovarajuće vrednosti sile $F_{hkt,vra}$ određuje se sila u kočnici vraćanja u četvrtom periodu:

$$F_{hkv} = \Pi' - F_{hkt,vra} \quad (83)$$

Vreme trajanja četvrtog perioda određuje se izrazom:

$$\Delta t_{IV} = \frac{\xi_{IV} - \xi_{III}}{U_{III}} \quad (84)$$

gde je $\xi_{IV} = \lambda - \Delta \xi_v$ - ukupni put vraćanja trzajućih delova do kraja četvrtog perioda.

Rezultanta r menja se u petom periodu po zakonu:

$$r_5 = \frac{\xi - \xi_{IV}}{\Delta \xi_v} \quad (85)$$

Brzina vraćanja u toku petog perioda određuje se iz energetske jednačine izrazom:

$$U^2 = U_k^2 + \frac{r_5 + r_k}{M_0}(\lambda - \xi) \quad (86)$$

Na osnovu ove brzine i odgovarajućeg puta vraćanja određuje se sila $F_{hkt,vra}$, a zatim sila F_{hkv} korišćenjem izraza:

$$F_{hkv} = \Pi' + r_5 - F_{hkt,vra} \quad (87)$$

Vreme trajanja petog perioda određuje se izrazom:

$$\Delta t_v = \frac{2\Delta\xi_v}{U_{III} + U_k} \quad (88)$$

Ukupno vreme vraćanja je zbir vremena trajanja pojedinih perioda:

$$t_{vra} = \sum_{i=1}^5 \Delta t_i \quad (89)$$