

Mr Milić Ivošević,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

VUČNI PRORAČUN TENKA PRI PODVODNOJ VOŽNJI

UDC: 623.438.324 : 531.553

Rezime:

U radu je prikazana teorijska analiza kretanja tenka po dnu vodene prepreke, kao i dejstvo sila koje se suprotstavljaju tom kretanju, formiranje jednačina kretanja tenka, proračun vučne sile i dijagram vučne sile za jedan savremeni tenk.

Ključne reči: tenk, gusenica, koncepcija, podvodna vožnja.

TRACTIVE CALCULATION OF MAIN BATTLE TANK DURING ITS MOTION UNDER WATER

Summary:

The theoretical analysis of tank motion under water during its overcoming of water obstacle, the action of resistance forces during that motion, the determination of the tractive effort and the tractive effort diagram of one modern battle tank are presented in the paper.

Key words: tank, track, layout, under water motion.

Uvod:

Uporedo sa razvojem borbenih vozila razvijali su se i sistemi koji omogućavaju savlađivanje vodenih prepreka. Prva borbena vozila mogla su da savlađuju samo manje vodene prepreke, i to gazom čija veličina nije mogla da ugrozi bezbednost vozila i posade.

Osposobljavanje tenkova za podvodnu vožnju imalo je za cilj da se ostvari visoki tempo izvođenja borbenih dejstava u savremenim uslovima, što podrazumeva brzo forsiranje reka i drugih vodenih prepreka, bez posebnih i velikih priprema.

Omogućavanjem srednjim tenkovima da podvodnom vožnjom savlađuju vodene prepreke oni su se po nekim tehničkim karakteristikama približili lakim tenkovima, koji savlađuju vodene prepreke plovljenjem.

U operativnoj upotrebi laki tenkovi mogu plovljenjem da savlađuju vodenu prepreku i obezbeđuju obalu do trenutka dok srednji tenkovi, čija je vatrena moć mnogo veća i operativna upotreba raznovrsnija, ne savladaju vodenu prepreku podvodnom vožnjom. Zauzimanjem suprotne obale vodene prepreke, i učvršćivanjem fronta na tom delu, omogućuje se nesmetano postavljanje pontonskih mostova i izvođenje borbenih dejstava.

Današnji sistemi za podvodnu vožnju tenkova omogućavaju savlađivanje vodenih prepreka dubine do pet metara i dužine hiljadu metara.

Da bi tenk mogao savlađivati vodenu prepreku, njegova konstrukciona rešenja moraju da obezbede hermetizaciju oklopnog tela, rad motora i ostalih uređaja kao i mogućnost borbene upotrebe nakon savlađivanja vodene prepreke, bez posebnih dodatnih radnji na samom tenku.

Za proračun vučne sile potrebno je analizirati dejstvo sile koje deluju na tenk pod vodom, i formirati jednačine kretanja za uslove podvodne vožnje. Dobijeni obrazac za određivanje vučne sile pri kretanju tenka pod vodom služi za formiranje dijagrama vuče.

Analiza sile koje deluju na tenk pri kretanju pod vodom

U uslovima kada se tenk kreće po dnu vodene prepreke (slika 1) na njega deluju sile: R_w – sila otpora vode, D' – sila potiska vode, R_f – sila otpora kotrljanja, Z_f – sila normalne reakcije podloge.

Sila otpora vode, prema [1] i [2] može se napisati u obliku:

$$R_w = \frac{c' \cdot \rho_v \cdot v_m^2}{2} \cdot A \quad (1)$$

gde je:

c' – bezdimenzioni koeficijent otpora, određen eksperimentalnim putem, zavisi od Frudovog i Rejnoldsovog broja, oblika površina i nekih drugih faktora;

ρ_v – gustina vode;

v_m – brzina kretanja tenka u odnosu na kretanje vode;

A – površina projekcije tenka na ravan normalnu na pravac kretanja.

Iz jednačine (1) sledi da otpor vode u odnosu na kretanje tenka raste proporcionalno kvadratu brzine kretanja tenka u odnosu na brzinu kretanja vode.

Sila potiska vode (D'), po Arhimedovom zakonu, iznosi:

$$D' = \gamma_v \cdot V_t = \rho_v \cdot g \cdot V_t \quad (2)$$

gde je:

γ_v – specifična težina vode,

V_t – potopljena zapremina tenka koja uključuje hodni deo i sve delove naoružanja.

Sila potiska vode D' deluje vertikalno sa napadnom tačkom u centru težišta tenkom istisnute zapremine vode. Tačka dejstva te sile naziva se centar istisnute vode ili centar pritiska.

Zbog dejstva sile potiska smanjuje se dejstvo sile težine tenka za njenu vrednost, pa izraz za normalnu reakciju podloge, pri kretanju tenka po horizontalnom putu, glasi:

$$Z_f = m_T \cdot g - D' = G - D' \quad (3)$$

gde je:

Z_f – sila normalne reakcije podloge,

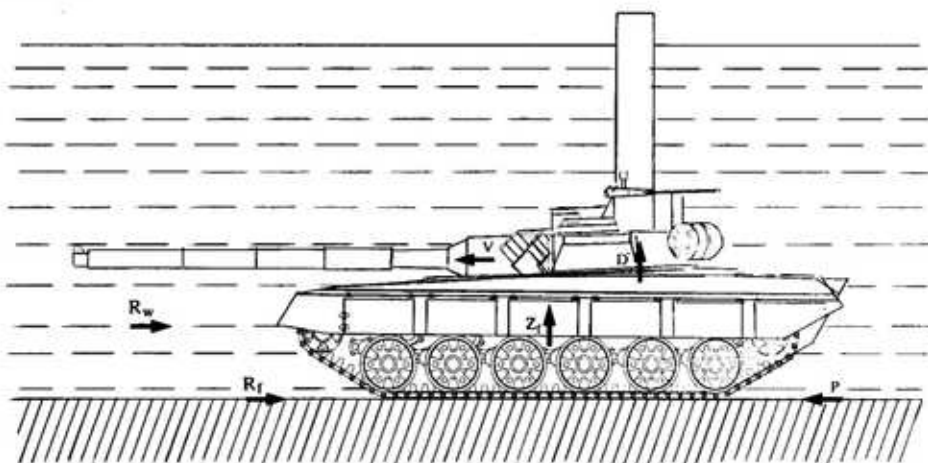
m_T – masa tenka,

$G = m_T g$ – težina tenka.

U slučaju da je ravan kretanja tenka nagnuta pod nekim uglom (α) u odnosu na horizontalnu ravan (pri ulasku i izlasku pri savlađivanju vodenih prepreka), sila normalne reakcije podloge određuje se prema izrazu:

$$Z_f = (m_T \cdot g - D') \cos \alpha = (G - D') \cos \alpha \quad (4)$$

Za srednje tenkove, pri potpunom potapanju u vodu, ispitivanjem je utvrđeno da se sila normalne reakcije podloge kreće u granicama:



Sl. 1 – Sile koje deluju na tenk pri kretanju po dnu vodene prepreke

$$Z_f = (0,55 - 0,6) G$$

Ako se spoljašnje sile, koje deluju na tenk pri podvodnoj vožnji na horizontalnoj podlozi, projektuju na pravac kretanja (slika 1) dobija se sledeći izraz:

$$F = R_f + R_w \quad (5)$$

gde je \$F\$ vučna sila potrebna za kretanje.

Sila otpora kotrljanju \$R_f\$, u opštem slučaju, kao i pri kretanju na suvom, proporcionalna je sili normalne reakcije podloge i koeficijentu otpora kotrljanja.

$$R_f = fZ_f = f(m_T g - D') \cos \alpha = f(G - D') \cos \alpha = gf(m_T - \rho_v V_t) \cos \alpha \quad (6)$$

Na osnovu ispitivanja određene su vrednosti koeficijenta otpora kotrljanja \$f\$ pri kretanju tenka po dnu vodenih prepreka [2]:

- za tvrdu podlogu 0,12
- za rastresitu podlogu 0,18
- za blatnjavu podlogu 0,25

Koeficijent \$f\$ dobijen je eksperimentalno metodom tegljenja – vuče tenka po dnu vodene prepreke.

Ako se uporedi sila otpora kotrljanju \$R_f\$ pri kretanju na suvom sa silom otpora kotrljanju pri podvodnoj vožnji, može se konstatovati da se ona usled dejstva potiska smanjuje, a raste zbog povećanja otpora podloge, prethodnog zatezanja guseničnih lanaca i otpora vode premotavanju gusenica, što znači da se povećava.

Na osnovu izraza (5) i prethodne analize može se zaključiti da je sila vuče \$F\$ potrebna za kretanje tenka pod vodom veća od sile koja je potrebna za kretanje na suvom.

Pri kretanju po dnu vodene prepreke maksimalna vučna sila ograničena je silom prijanjanja (\$F_\phi\$), koja se određuje prema izrazu:

$$F_\phi = Z_f \phi$$

gde je \$\phi\$ koeficijent prijanjanja.

Do smanjenja maksimalne vučne sile dolazi zbog smanjenja uticaja težine tenka usled dejstva sile potiska vode

i zbog smanjenja koeficijenta prijanjanja [4].

Koeficijent prijanjanja dobija se eksperimentalnim putem i, zavisno od vrste terena, ima sledeće vrednosti [2]:

- za tvrdo dno 0,7
- za rastresito dno 0,5
- za blatnjavo dno 0,3-0,4

Može se zaključiti da za ravnomerno kretanje tenka po dnu vodene prepreke mora biti ostvaren uslov $F_{\varphi} > F_M > F$. Ovde je F_M sila vuče koja se može obezbediti motorom.

U praksi su česti slučajevi da je maksimalna sila prijanjanja (F_{φ}) manja od potrebne vučne sile za savlađivanje otpora podvodnog kretanja, što izaziva proklizavanje i onemogućava kretanje.

Pri većim dubinama vode sile talasanja vode su relativno male, pa se ne uzimaju u razmatranje.

Jednačina kretanja tenka pri savlađivanju vodene prepreke podvodnom vožnjom može se napisati u obliku [6]:

$$m_T \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = F - R_f - R_w - (m_T \cdot g - D') \sin \alpha \quad (7)$$

gde je ϑ brzina tenka.

Relativna brzina tenka (ϑ_m) u odnosu na brzinu vode kroz koju se kreće, jednaka je razlici brzine kretanja tenka ϑ i brzine kretanja vode ϑ_v :

$$\vartheta_m = \vartheta - \vartheta_v$$

Ako je $\vartheta_v = \text{const.}$ onda se može napisati sledeći izraz:

$$\frac{d\vartheta_m}{dt} = \frac{d\vartheta}{dt} \quad (8)$$

Kada se izrazi (1-5) i (6) uvrste u izraz (7), i kada se pretpostavi da je $\alpha = 0$,

dobija se diferencijalna jednačina kretanja tenka po ravnoj podlozi u sledećem obliku:

$$m_T \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} = F - g \cdot f \cdot (m_T - \rho_v \cdot V_t) - \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho_v \cdot A \cdot \vartheta_m^2 \quad (9)$$

Ako je u toku podvodne vožnje vučna sila F konstantna, jednačina (9) može se rešiti.

Nakon uvođenja izraza za

$$C_1 = \frac{1}{m_T} \cdot [F - g \cdot f \cdot (m_T - \rho_v \cdot V_t)] \quad \text{i}$$

$$C_2 = \frac{c \cdot \rho_v \cdot A}{2m_T}$$

dobija se rešenje integrala u opštem obliku:

$$I = \frac{1}{2v} \ln \frac{1 + \frac{\vartheta_s}{\vartheta_m}}{1 - \frac{\vartheta_s}{\vartheta_m}} \quad (10)$$

Rešenje određenog integrala, u granicama $\vartheta_0 - \vartheta_m$, je:

$$I = \frac{1}{v} \operatorname{arth} \left(\frac{\vartheta_s}{\vartheta_m} \right) - \frac{1}{v} I_0 \quad (11)$$

gde je:

ϑ_0 - relativna brzina tenka u početnom trenutku $t_0 = 0$,

ϑ_s - konačna relativna brzina.

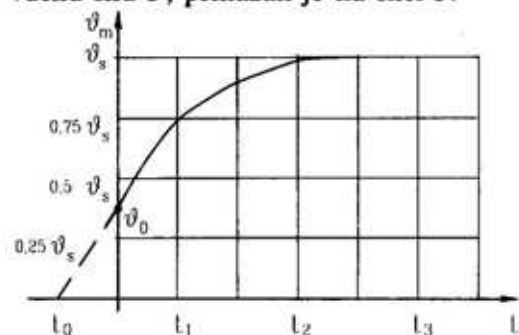
Rešenje diferencijalne jednačine (9) može se napisati u obliku:

$$\vartheta_m(t) = \vartheta_s \operatorname{ctgh}(vt + I_0) \quad (12)$$

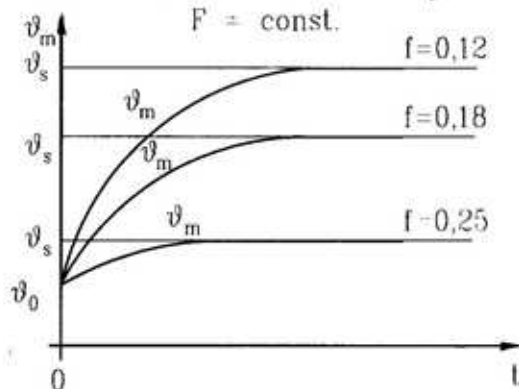
Zavisnost ϑ_m od t prikazana je na slici 2.

U trenutku $t_1 = (1 - I_0)$ relativna brzina ϑ_m dostiže 76% vrednosti konačne brzine ϑ_s , dok je posle vremena $t_2 = (2 - I_0)$ praktično dostignuta konačna brzina ($\vartheta_m > 0,96 \vartheta_s$).

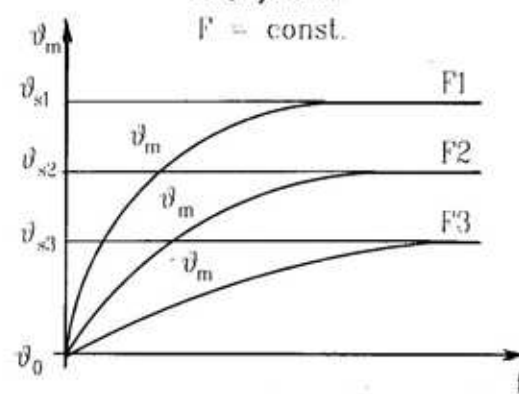
Uticao koeficijenta f iz jednačine (9) na ubrzavanje tenka, za konstantnu vučnu silu F , prikazan je na slici 3.



Sl. 2 - Promena relativne brzine kretanja tenka $F = \text{const.}$



Sl. 3 - Uticaj koeficijenta otpora kotrljanja na ubrzanje tenka $F = \text{const.}$



Sl. 4 - Uticaj vučne sile na ubrzanje tenka

Iz dijagrama se može videti da koeficijent f utiče na vreme dostizanja konačne brzine ϑ_s i na vrednost konačne brzine ϑ_s pri istoj vučnoj sili F .

Na slici 4 grafički je prikazan uticaj vučne sile F na ubrzanje tenka, pri konstantnoj vrednosti koeficijenta f . Krive $\vartheta_m(t)$ odnose se na tri različite vrednosti sile F koje se nalaze u sledećem odnosu:

$$F_1 : F_2 : F_3 = 1,5 : 1,25 : 1$$

Proračun vučne sile pri kretanju tenka pod vodom

Iz diferencijalne jednačine kretanja (7) može se izraziti vučna sila F u zavisnosti od relativne brzine tenka ϑ_m , za opšti slučaj kretanja:

$$F = m_T \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} + \frac{1}{2} \cdot c' \cdot \rho_V \cdot A \cdot \vartheta_m^2 + g \cdot f \cdot (m_T - \rho_V \cdot V_t) + g \cdot (m_T - \rho_V \cdot V_t) \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

Pri savlađivanju vodenih prepreka teži se da brzina tenka bude konstantna. Međutim, u ovom poglavlju biće razmatrani i slučajevi ubrzanja i usporavanja tenka pri podvodnoj vožnji. Radi toga se pretpostavlja željeni dijagram promene brzine tenka pod vodom, koji će obuhvatiti sve tri varijante (slika 5). Tenk se kreće konstantnom brzinom ϑ_0 (oblast I). Posle izvesnog vremenskog intervala Δt tenk se ubrzava do brzine ϑ_s (oblast II), kreće se konstantnom brzinom ϑ_s (oblast III), usporava do brzine ϑ_0 za vreme Δt (oblast IV) i kreće se ravnomerno brzinom ϑ_0 (oblast V).

Prema izrazu (13) za oblast I važi sledeća jednačina:

$$F = \frac{1}{2} \cdot c' \cdot \rho_v \cdot A \cdot \vartheta_0^2 + g \cdot f \cdot (m_T - \rho_v \cdot V_t) \quad (14)$$

Slično je i za oblast III:

$$F = \frac{1}{2} \cdot c' \cdot \rho_v \cdot A \cdot \vartheta_S^2 + g \cdot f \cdot (m_T - \rho_v \cdot V_t) \quad (15)$$

U oblasti II javlja se ubrzanje za koje se pretpostavlja da je ravnomerno:

$$a = \frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{t}$$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{\Delta t} \cdot (t - t_0) \quad (16)$$

Izraz za silu F dobija sledeći oblik:

$$F = m_T \cdot \frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{t} + \frac{1}{2} c' \cdot \rho_v \cdot A \left[V_0 + \frac{\vartheta_S + \vartheta_0}{\Delta t} (t - t_0) \right]^2 + g \cdot f (m_T - \rho_v V_t) \quad (17)$$

U oblasti IV dolazi do usporenja, što se predstavlja ubrzanjem sa negativnim predznakom:

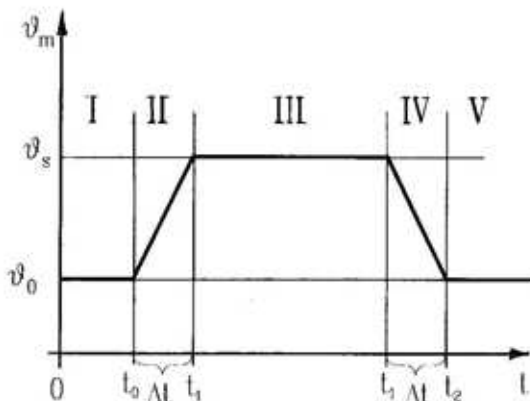
$$a = -\frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{t}$$

$$\vartheta = \vartheta_S - \frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{\Delta t} \cdot (t - t_2) \quad (18)$$

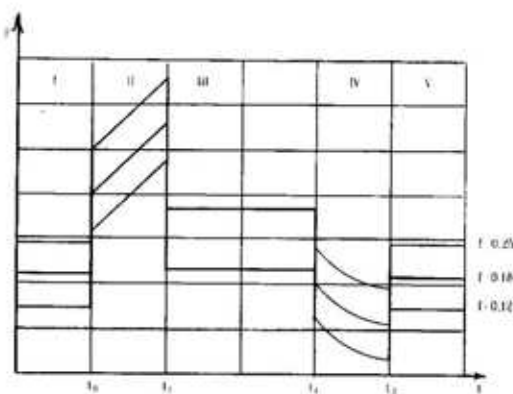
Sada izraz za silu F dobija sledeći oblik:

$$F = -m_T \cdot \frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{\Delta t} + \frac{1}{2} c' \cdot \rho_v \cdot A \left[\vartheta_S - \frac{\vartheta_S - \vartheta_0}{\Delta t} (t - t_2) \right]^2 + g \cdot f (m_T - \rho_v V_t) \quad (19)$$

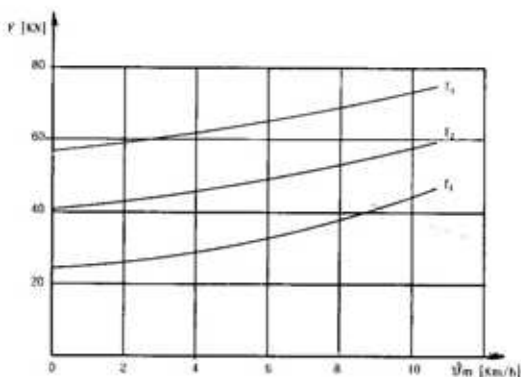
Na osnovu ovih izraza sačinjen je dijagram promene vučne sile prikazan na slici 6.



Sl. 5 - Pretpostavljeni dijagram promene brzine



Sl. 6 - Dijagram promene vučne sile



Sl. 7 - Zavisnost vučne sile od relativne brzine tenka

Dijagram vuče savremenog srednjeg tenka pri podvodnoj vožnji

U slučajevima kretanja po ravnom putu izraz za vučnu silu (13) dobija oblik:

$$F = \frac{1}{2} c' \cdot \rho_V \cdot A \mathfrak{g}_m^2 + g \cdot f \cdot (m_T - \rho_V \cdot V_t) \quad (20)$$

Zavisnost vučne sile F od relativne brzine kretanja savremenog srednjeg tenka pod vodom grafički je prikazan na slici 7 za sledeće parametre:

$$\begin{array}{lll} c' = 0,7 & g = 9,81 \text{ m/s}^2 & f_1 = 0,12 \\ \rho_V = 1000 \text{ kg/m}^3 & m_T = 44,000 \text{ kg} & f_2 = 0,18 \\ A = 6 \text{ m}^2 & V_t = 17 \text{ m}^3 & f_3 = 0,25 \end{array}$$

Zaključak

Pri kretanju tenka po dnu vodene prepreke dolazi do znatnog smanjenja

sile normalne reakcije podloge, što izaziva smanjenje pritiska gusenica na tlo i može dovesti do proklizavanja. Pri podvodnoj vožnji, i pored prividnog smanjenja težine tenka, otpori kotrljanja se uvećavaju. Pri brzinama većim od 6 do 8 km/h dolazi do znatnog uvećanja sila koje deluju na tenk, pa te brzine treba izbegavati. Analizom vučne sile za jedan savremeni srednji tenk, u uslovima blatnjavog terena i relativne brzine kretanja veće od 10 km/h, vučna sila prelazi vrednost od 75 kN.

Literatura:

- [1] Janković, D., Todorović, J.: Teorija kretanja motornih vozila
- [2] Antonov, S.A.: Gusenični kretači, Ministarstvo odbrane SSSR, Moskva, 1959.
- [3] Bonivičja, E., Grudjev, N., Ivanov, I., Prokopjev, A.A.: Teorija tankov br. 3.
- [4] Dmitijev, A.A., Leontiev, M.E.: O diferencijalnih uravnonijah.
- [5] Sergejev, L.V.: Koeficijent trenja otkritih i metjaličeskijh šarnirov guseničnijh cepej.
- [6] Ivošević, M.: Savladivanje vodenih prepreka borbenim vozilima podvodnim kretanjem - magistarski rad. Mašinski fakultet Beograd 1997.