

UDK: 631.372

## TEORIJA VUČE I KOEFICIJENT KORISNOSTI GUMENE GUSENICE

**Ratko Nikolić, Lazar Savin, Timofej Furman, Milan Tomić,  
Mirko Simikić, Radojka Gligorić**

*Poljoprivredni fakultet - Novi Sad*

**Sadržaj:** U radu je prikazana teorija vuče gumene gusenice. Dat je matematički model za analizu vučnog bilansa i bilansa snage traktora guseničara, predviđanje vučnih pokazatelja traktora, vučni bilans i bilans snage gumene gusenice i koeficijent korisnosti traktora guseničara i gumene gusenice.

**Ključne reči:** teorija vuče, stepen korisnosti, gumena gusenica

### UVOD

U Srbiji koristi se uglavnom dva tipa gumenih gusenica. Frikciona gusenica "Caterpillar" sa pozitivnom vučom primenjena je kod traktora kojih u Srbiji ima do deset komada. Drugi tip gusenice je pogonska gusenica sa zupčastim pogonskim točkom "Bridgestone" koja je uglavnom u primeni kod komunalnih i građevinskih mašina i mini traktora. U poljoprivredi je u primeni uglavnom prvi tip gusenice i to kod traktora guseničara većih snaga, preko 150 kW. Broj guseničara u poljoprivredi je sveden na minimum i tek poslednjih godina pojavom gumene gusenice njihov broj polako se povećava zahvaljujući njihovim ogromnim prednostima u odnosu na traktore i druge samohodne mašine sa točkovima. O prednostima traktora guseničara sa gumenim gusenicama bilo je više reči u radovima Nikolić et al. (1991, 1992, 2002).

Velike prednosti traktora guseničara sa gumenim gusenicama u oblasti vučnih sposobnosti nalažu potrebu da se prouči bilans snage i koeficijent korisnosti gumene gusenice, koja omogućava ostvarenje većih sila za 30-60 % u odnosu na traktore točkaše istih snaga i težina, Nikolić (2002).

Stoga su u ovom radu istraživanja usmerena na:

- bilans snage traktora guseničara,
- predviđanje vučnih pokazatelja guseničara,
- vučni bilans i bilans snage gumene gusenice,
- koeficijent korisnosti traktora guseničara i gumene gusenice.

## REZULTATI ISTRAŽIVANJA

### *Bilans snage traktora guseničara*

Jednačina bilansa snage traktora guseničara u najopštijem slučaju ima oblik:

$$P_e = P_o + P_{trg} + P_{trpv} + P_{trh} + P_{mg} + P_f + P_\delta \pm P_i \pm P_n \pm P_w + P_{pv} + P_h + P_{pot} \quad (1)$$

gde je:

$P_e$ (kW)	- efektivna snaga motora	$P_\delta$ (kW)	- gubitak snage na klizanje
$P_o$ (kW)	- gubitak snage na opsluživanje sistema traktora i uslova rukovaoca	$P_i$ (kW)	- gubitak snage na savlađivanje inercije
$P_{trg}$ (kW)	- gubitak snage u transmisiji do gusenica	$P_n$ (kW)	- gubitak snage na savlađivanje nagiba
$P_{trpv}$ (kW)	- gubitak snage u transmisiji do priključnog vratila	$P_w$ (kW)	- gubitak snage na savlađivanje otpora vazduha
$P_{trh}$ (kW)	- gubitak snage u transmisiji do hidrauličkih izvoda	$P_{pv}$ (kW)	- snaga predata preko priključnog vratila
$P_{mg}$ (kW)	- gubitak snage u gusenici	$P_h$ (kW)	- snaga predata preko hidrauličnih izvoda
$P_f$ (kW)	- gubitak snage na sopstveno kretanje	$P_{pot}$ (kW)	- snaga predata preko pteznice

Pri ravnomernom kretanju traktora ( $P_i = 0$ ) na ravnoj podlozi ( $P_n = 0$ ) i brzinama kretanja do 30 km/h ( $P_w = 0$ ), jednačina 1 se svodi na oblik:

$$P_e = P_o + P_{trg} + P_{trpv} + P_{trh} + P_{mg} + P_f + P_\delta + P_{pv} + P_h + P_{pot} \quad (2)$$

Iz jednačine (2) može se izvesti jednačina za izračunavanje snage koja se predaje gusenici u obliku:

$$P_g = P_e - (P_o + P_{trg} + P_{trpv} + P_{trh} + P_{pv} + P_h) \quad (3)$$

Ukoliko se snaga motora traktora koristi za savladavanje otpora samo preko pteznice jednačina (3) ima oblik

$$P_g = P_e - (P_o + P_{trg}) \quad (4)$$

jer je u tom slučaju  $P_{trpv} = 0$ ,  $P_{trh} = 0$ ,  $P_{pv} = 0$  i  $P_h = 0$ . U ovom slučaju jednačina bilansa snage ima oblik:

$$P_e = P_o + P_{trg} + P_{mg} + P_f + P_\delta + P_{pot} \quad (5)$$

Iz jednačine (5) sledi jednačina za izračunavanje snage na poteznici:

$$P_{pot} = P_e - (P_o + P_{trg} + P_{mg} + P_f + P_\delta) \quad (6)$$

Pri radu traktora na usponu jednačina (6) dobija oblik:

$$P_{pot} = P_e - (P_o + P_{trg} + P_{mg} + P_f + P_\delta + P_n) \quad (7)$$

Ako u jednačini (6) za članove u zagradi prikažemo jednačine kako se izračunavaju kao:

$$P_{trg} = P_e(1 - \eta_{trg}) \quad (8)$$

$$P_f = G_t \cdot f \cdot v_s \quad (9)$$

$$P_\delta = (P_e - P_{trg})\delta \quad (10)$$

gde je:  $\eta_{trg}$  - koeficijent korisnosti,

$G_t$  - težina traktora,

$f$  - koeficijent otpora kretanja,

$v_s$  - stvarna brzina kretanja,  $\delta$  - koeficijent klizanja i

$P_e$  -efektivna snaga motora traktora.

Ako jednačine 8, 9 i 10 uvrstimo u jednačinu (6) i sredimo dobije se jednačina za izračunavanje raspoložive snage na poteznici u obliku:

$$P_{pot} = P_e \cdot \eta_{trg} \cdot m_{mg}(1 - \delta) - G_t \cdot f \cdot v_s - P_o \quad (11)$$

### ***Predviđanje vučnih pokazatelja***

Mnogi autori istraživali su matematički model za predviđanje vučnih karakteristika traktora točkaša i guseničara. Tako Nikolić et al. (2002) prikazuje rezultate istraživanja vučnih pokazatelja traktora različitih koncepcija na različitim zemljištima. Zavisnost koeficijenta neto vuče od klizanja za beton data je u obliku:

$$\varphi_n = 1 - e^{-25\delta} \quad (12)$$

za istu podlogu Dwyer (1987) daje jednačinu u obliku

$$\varphi_n = 1 - e^{-20\delta} \quad (13)$$

Grissa et al. (2006) prikazuje sistem jednačina za predviđanje vučnih pokazatelja na bazi mobilnog broja ( $B_n$ ) indeksa konusa (CI).

$$B_n = \left( \frac{CI \cdot B \cdot L_g}{G \cdot (1 - e^{-CI/0.698})} \right) \cdot \left( \frac{K_1}{1 + K_2 \cdot \frac{B}{L_g}} \right) \quad (14)$$

$$\varphi_b = C_1 \cdot (1 - e^{-C_2 \cdot B_n}) \cdot (1 - e^{-C_3 \cdot \delta}) + \frac{C_4}{k_d} \quad (15)$$

$$f_g = \frac{C_5}{B_n(0,7 \cdot k_d)} + \frac{C_4}{k_d} + \frac{C_6}{\sqrt{B_n}} \quad (16)$$

gde je:  $B_n$  - mobilni broj

$\varphi_b$  - koeficijent vuče bruto

$f_g$  - koeficijent otpora kretanja

$k_d$  - koeficijent dinamičke raspodele opterećenja po dužini gusenice

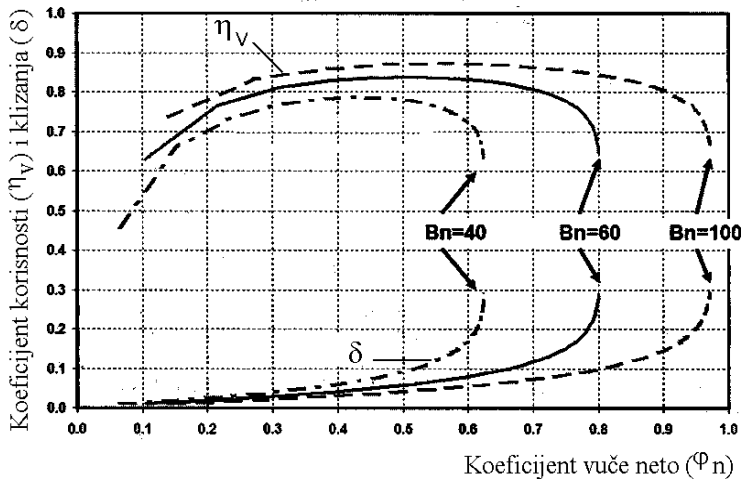
$B$  - širina gusenice

$k_1 = 5, k_2 = 6, C_1 = 1,10, C_2 = 0,025, C_3 = 17, C_4 = 0,03, C_5 = 1,75$

konstante i koeficijenti za gumenu gusenicu.

Maksimalna vrednost koeficijenta  $k_d = 1$  dobija se kada je opterećenje po dužini gusenice ravnomerno raspoređeno.

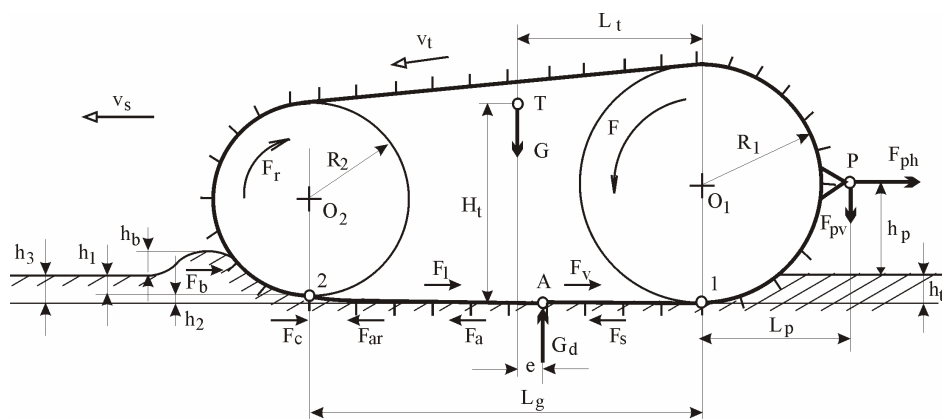
Na slici 1. prikazana je zavisnost koeficijenta korisnosti i klizanja od koeficijenta neto vuče za tri različite podloge, odnosno tri mobilna broja ( $B_n$ ).



Sl. 1. Zavisnost koeficijenta korisnosti i klizanja od koeficijenta neto vuče, Grissa (2006)

### ***Vučni bilans i bilans snage gumene gusenice***

Gumena gusenica kao elastični hodni sistem ostvaruje bolje osobine na mekoj podlozi od točka i metalne gusenice. Radovi Kogure et al. (1991) i Tatsure (1992) ukazuju na složenost ponašanja gumene gusenice u kontaktu sa mekom podlogom. Na slici 2 prikazana je gumena gusenica sa silama i drugim parametrima u zahvatu na mekom zemljištu gde su prednosti najviše izražene.



Sl. 2. Mehanika gumene gusenice na mekoj podlozi

Oznake na slici su:

$G$  - težina traktora na jednoj gusenici

$G_d$  - dinamička težina traktora na jednoj gusenici

$F_{ph}, F_{pv}$  - horizontalna i vertikalna komponenta sile na poteznici na jednoj gusenici

$F$  - motorna sila dovedena na gusenicu

$F_r$  - sila otpora rotacije gusenice, oslonih i točka zatezača

$F_b$  - sila savlađivanja otpora Buldozin efekta

$F_c$  - sila otpora sabijanja zemljišta

$F_l$  - sila otpora lepljenja zemljišta na bočnim stranama gusenice

$F_v$  - pogonska sila gusenice

$F_a$  - reakcija podloge - adhezijska sila u kontaktu traka gusenice - podloga

$F_s$  - reakcija podloge - sila smicanja

$F_{ar}$  - reakcija podloge - adhezijska sila u kontaktu rebro-podloga

Motorna sila ( $F$ ) dovedena do gumene gusenice izračunava se pomoću sledeće jednačine

$$M_g = 0,5 M_m \cdot i_{trg} \cdot \eta_{trg} = F \cdot R_l \quad (17)$$

odavde:

$$F = 0,5 \frac{M_m \cdot i_{trg} \cdot \eta_{trg}}{R_l} \quad (18)$$

Pogonska sila gusenice dobija se kada se od sile ( $F$ ) oduzmu gubici u gusenici ( $F_r$ )

$$F_v = F - F_r \quad (19)$$

Otpor kretanja gusenice ( $F_f$ ) sastoji se od više otpora kao što su:

$$F_f = F_b + F_c + F_l \quad (20)$$

ili

$$F_f = G \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad \alpha - \text{nagib podloge} \quad (21)$$

A reakcija podloge ( $F_{rp}$ ) koja mora biti najmanje jednaka sili ( $F_v$ ) izračunava se:

$$F_{rp} = F_v = F_s + F_a + F_{ar} \quad (22)$$

ili

$$F_{rp} = G \cdot \varphi_b \quad (23)$$

Sila u kontaktu hodni sistem - podloga može se izračunati prema jednačini Coulomb-a:

$$F_{rp} = A \cdot c + G_d \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (24)$$

gde je:

$A = (B \cdot L_g)$  - kontaktna površina gusenice sa podlogom

$c$  - koeficijent kohezije - unutrašnja prionljivost

$G_d$  - dinamička težina na gusenici

$\varphi$  - ugao unutrašnjeg trenja

Pogonska sila  $F_v = F_{rp}$  mora da savlada otpore kretanja i otpor na poteznici

$$F_v = F_{rp} = F_f + F_{ph} \quad (25)$$

Vučni bilans jedne gusenice se svodi na:

$$F = F_r + F_f + F_{ph} = F_r + F_b + F_c + F_l + F_{ph} \quad (26)$$

a bilans snage gusenice je:

$$P_g = P_r + P_f + P_{ph} + P_\delta \quad (27)$$

Gubitak snage na klizanje na gusenici dobija se:

$$P_\delta = [0,5(P_e - P_{trg}) - P_r] \cdot \delta = (P_g - P_r) \cdot \delta \quad (28)$$

gde je:

$P_g$  - snaga dovedena na jednu gusenicu,  $P_g = F \cdot v_t$

$P_r$  - snaga unutrašnjih gubitaka u gusenici,  $P_r = F_r \cdot v_t$

$P_f$  - snaga otpora kretanja,  $P_f = F_f \cdot v_s$

$P_{ph}$  - snaga na poteznici,  $P_{ph} = F_{ph} \cdot v_s$

$P_\delta$  - snaga izgubljena na klizanje,  $P_\delta = (P_g - P_r) \cdot \delta$

Vučna snaga gusenice je:

$$P_v = P_{rp} = P_f + P_{ph} + P_\delta \quad (29)$$

Ako u jednačini (28) izvršimo zamenu i sredimo, dobijamo jednačinu za izračunavanje raspoložive sile na poteznici za jednu gusenicu u oblik:

$$F_{ph} = \frac{I}{v_s} \left( 0,5 \frac{M_m \cdot i_{trg} \cdot \eta_{trg}}{R_l} - F_r \cdot v_t \right) (1 - \delta) - G \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (30)$$

a vučna sila za ceo traktor je:

$$F_{pot} = 2 \cdot F_{ph} \quad (31)$$

### **Koeficijent korisnosti traktora i gumene gusenice**

Opšti koeficijent korisnosti traktora guseničara može se odrediti pomoću jednačine:

$$\eta_o = \frac{P_{pot} + P_{pv} + P_h}{P_e} \quad (32)$$

a vučni koeficijent korisnosti traktora je:

$$\eta_v = \frac{P_{pot}}{P_e - (P_{pv} + P_{trpv} + P_h + P_{trh})} \quad (33)$$

a pri radu traktora bez korišćenja  $P_{pv}$  i  $P_h$ :

$$\eta_v = \frac{P_{pot}}{P_e} \quad (34)$$

Vučni koeficijent korisnosti može se prikazati i na sledeći način:

$$\eta_v = \eta_{tr} \cdot \eta_{mg} \cdot \eta_{\delta} \cdot \eta_f \quad (35)$$

ili

$$\eta_v = \eta_{tr} \cdot \eta_{mg} \cdot (1 - \delta) \left( 1 - \frac{F_f}{F_{pot} + F_f} \right) \quad (36)$$

Ako se traktor koristi u stacionarnim uslovima koristeći snagu preko priključnog vratila onda je koeficijent korisnosti  $\eta_o = \eta_{pv}$ .

Koeficijent korisnosti gumene gusenice svodi se na jednačinu:

$$\eta_g = \eta_{mg} \cdot \eta_{\delta g} \cdot \eta_{fg} \quad (37)$$

gde je:

$\eta_{mg}$  - koeficijent korisnosti gusenice u odnosu na gubitke u gusenici

$$\eta_{mg} = \frac{M_g - M_r}{M_g}$$

$\eta_{\delta g}$  - koeficijent korisnosti u odnosu na klizanje  $\eta_{\delta g} = 1 - \delta_g$

$\eta_{fg}$  - koeficijent korisnosti u odnosu na otpor kretanja,

$$\eta_{fg} = \left( 1 - \frac{F_{fg}}{(F_{ph} + F_{fg})} \right)$$

Otuda je konačna jednačina za koeficijent korisnosti gumene gusenice:

$$\eta_g = \left( \frac{M_g - M_r}{M_g} \right) \cdot (1 - \delta_g) \cdot \left( 1 - \frac{F_{fg}}{(F_{ph} + F_{fg})} \right) \quad (38)$$

## ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih istraživanja mogu se izvesti sledeći zaključci:

- vučni bilans i bilans snage traktora guseničara zavisi od brojnih faktora datih u sistemu jednačina od 1 do 11.
- za predviđanje vučnih pokazatelja uspešno se mogu koristiti jednačine date na bazi mobilnog broja ( $B_n$ ) i sistema jednačina od 14 do 16.
- vučni bilans i bilans snage gumene gusenice definisan je sistemom jednačina od 17 do 31.
- koeficijent korisnosti traktora i gumene gusenice definisan je sistemom jednačina od 32 do 37.

## LITERATURA

- [1] Dwyer J.M.: Prediction of Dramber test Performance, journal of terramechanics, vol. 24, No.2, str. 165-177. 1987.
- [2] Fekete A.: The maximum efficiency of the tractor and implement combination. ISTVS. 5th European conference badepest, Hungary, 4-6 IX 1991. Proceedings, vol.1 str. 215-221.
- [3] Kogure k, Ohiva Y.: Basic cnergy analgsis in soil-crawler interaction. ISTVS, 5th European conference, Budapest, Hungary, 1991.
- [4] Muramatsy T.: History and Future development of the Rubber Track, Istvs, proceedings of the 4th regional north american meeting, sacramento, 1992.
- [5] Nikolić R.: Determining soil compaction of tractors wheeled and crawler with rubber tacks. Istvs, proceedings of the 4th, egional north american meeting, sacramento, 1992.
- [6] Nikiolić R., Furman T., Gligorić R., Popović Z., Savin L.: Uzroci i posledice prekomernog sabijanja i posledice, časopis Savremena poljoprivredna tehnika br 7/1996 str. 396-405.
- [7] Nikolić R., Kližnar M., Popović Z., Gligorić Radojka: Hodni sistemi poljoprivrednih traktora Časopis Savremena poljoprivredna tehnika, br 5/1994, str. 313-322.
- [8] Nikolić R. i saradnici: Monografija, Istraživanje uzroka, posledica i mera za smanjenje i kontrolu sabijanja zemljišta, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2002.
- [9] Nikolić R., Počuča P.: Istraživanje mogućnosti šireg korišćenja traktora guseničara sa gumenim gusenicama XV simpozijum naučno ehnički progres u poljoprivrednoj proizvodnji (1991-2000), zbornik radova, Opatija, 1991, str. 95-106.



- [10] Nikolić R.: Determining of drawbar parameters of agricultural wheeled tractors ISTVS. 5th European conference badepest, Hungary, 4-6 IX 1991. Proceedings, vol.1 str. 79-186.
- [11] Robert Grisso, John Perumpral, Frank Zoz: An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils journal of Terramechanics Vol. 43. 2, April 2006, str. 225-236.
- [12] Tatsuro Muro: Grousev Shape effect on tractive performance of a flexible, tracked vehicle carrying up slope terrain. Istvs, proceedings of the 4th regional north american meeting, sacramento, 1992.
- [13] Tatsuro Muro Geusev shape effect on tractive performance of a flexible tracked vehicle carrying up slope terrain. ISTVS, 4th Regional North American Meeting, Sacramento CA. 25-27. III 1992, str. 9-16.
- [14] Wong J.J. Wei Huang: "Wheels vs. Tracks" - a fundamental evaluation from the traction perspective. Journal of terramechanics vol.43. 1. January 2006, str. 26.42.

## PULL THEORY AND RUBBER TRACK EFFICIENCY COEFFICIENT

**Ratko Nikolić, Lazar Savin, Timofej Furman, Milan Tomić,  
Mirko Simikić, Radojka Gligorić**

*Faculty of Agriculture - Novi Sad*

**Abstract:** The pull theory of rubber track was shown in this paper. The mathematics model for analyzing a pull balance and balance of tractive power of crawler tractor, anticipating draw bar pull characteristics of tractor, tractive balance and power balance of rubber track and tractor crawler and rubber track efficiency coefficient were given.

**Key words:** *pull theory, efficiency coefficient, rubber track.*