

# SIMULACIJA VUČNIH SVOJSTAVA LOKOMOTIVE HŽ 185 NA TERETNOM VLAKU U PROGRAMSKOME PAKETU MATLAB/SIMULINK

Simulacija se može koristiti za bilo koje željezničko vozilo, a iz članka je vidljivo da postoje vrlo mala odstupanja od stvarnih vrijednosti.



**Mario Mišić**  
dipl. ing. stroj.

Strojarski fakultet SB  
mario.misic@yahoo.com

UDK: 528.4+625.1

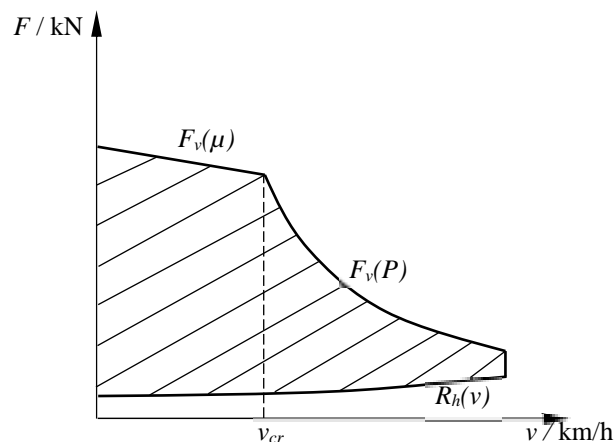
## 1. Uvod

Širenjem informacijsko-komunikacijske tehnologije (ICT) otvaraju se nove mogućnosti njezine primjene u području željeznice. Prilikom projektiranja željezničkih vozila, posebno vučnih, otvara se prostor kako bi se olakšao i pojednostavio pristup tijekom razvoja. Svako željezničko vozilo ima svoju namjenu, ali za vučna vozila mora biti poznato vučno područje djelovanja. Kako bi se olakšalo projektiranje radnog prostora za vuču, u ovome radu bit će prikazana simulacija pogonskog sustava željezničkih vozila koja se može primijeniti za svako željezničko vozilo.

U radu opisani su modeli vuče lokomotive. Vuča je aproksimirana simulacijama programskim paketom MATLAB/Simulink. Bombardierova lokomotiva TRAXX AC2 (HŽ 185) korištena je za simulaciju. Simulacija pokazuje rezultate ubrzanja i brzina vlakova te ovisnost između brzina, nagiba željezničke pruge i mase vučenog vlaka. Treba napomenuti da način kretanja lokomotive uvelike ovisi o odnosu između ukupnog otpora vlaka i vučne sile lokomotive. Simulacijski model može se primijeniti na svako željezničko vozilo i može olakšati proračun brzine vlaka s obzirom na nagib željezničke pruge i masu vučenog vlaka.

## 2. Vučno svojstvo lokomotive

Valja utvrditi svojstva pogona vozila kako bi se dobio opis vučnih svojstava i otpora kretanja vozila. Određivanjem svojstava dobiva se raspon radnog područja vučnoga željezničkog vozila koji je određen krivuljama sila (slika 1.).



Slika 1. Vučno svojstvo lokomotive.

Prvi dio krivulje vučne sile  $F_v(\mu)$ ,  $0 < v < v_{cr}$ , određen je trenjem i računalnom potporom računala lokomotive te se može izraziti matematičkim modelom prema katalogu proizvođača lokomotive [1]:

$$F_v(\mu) = -0,35 \cdot v + F_{v,max}, \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

gdje su:

$v$  - brzina lokomotive u km/h

$F_{v,max} = 300 \text{ kN}$  - najveća moguća vučna sila.

Drugi dio krivulje vučne sile  $F_v(P)$ ,  $v_{cr} < v < v_{max}$ , određen je omjerom snage i brzine vozila:

$$F_v(P) = \frac{P_{ad}}{v_{ms}}, \quad [\text{kN}] \quad (2)$$

gdje su:

$P_{ad}$  - snaga lokomotive koja se može prenijeti prijanjanjem u kW

$v_{ms}$  - brzina lokomotive u m/s.

Donja krivulja predstavlja otpore gibanja vozila  $R_h(v)$ , koja nastaju zbog djelovanja raznih čimbenika, a najvažniji su trenje u ležajevima osovina, otpor zraka i otpor tračnice pri kotrljanju kotača po njoj. Otpori gibanja poznati su kao Davisova jednadžba vučnog vozila te proizvođači vozila mjere otpor na pruzi koji se može opisati matematičkim modelom [1] [2]:

$$R_h(v) = 11,7 \cdot m_{tot} + 0,02 \cdot m_{tot} \cdot v + 2,3 \cdot v^2, \quad [N], \quad (3)$$

gdje je:

$v$  - brzina vlaka u km/h.

Da bi se dobila ukupna masa vlaka s kojom se računa, na gravitacijsku masu treba dodati rotirajuće mase tromosti kolnih sklopova [2]:

$$m_{tot} = 1,06 \cdot (m_L + m_w) \quad (4)$$

gdje su:

$m_L$  - masa lokomotive u tonama

$m_w$  - masa vagona u tonama.

Za svaku teretnu lokomotivu treba poznavati najveću moguću brzinu kojom će povući određeni teret vlaka na određenome pružnome usponu ili to koliko tereta na vlaku može biti vučeno određenom brzinom na određenome pružnome usponu. Rješenje jest jednakost između vučne sile lokomotive i ukupnih sila otpora na pružnome usponu. U ukupne sile otpora na nagibu zbrojne su sile otpora pri gibanju na ravnoj pruzi i mjerodavni otpori:

$$R_h + R_{mj} = F_v \begin{cases} \forall 0 < v < v_{cr} \Rightarrow F_v = F_v(\mu, Q_0) \\ \forall v_{cr} \leq v < v_{max} \Rightarrow F_v = F_v(P) \end{cases} \quad (5)$$

Sila mjerodavnog otpora izražava se [3]:

$$R_{mj} = 10 \cdot m_{tot} \cdot s + m_{tot} \cdot \frac{5000}{R - 30}, \quad [N] \quad (6)$$

$$R_{mj} = 10 \cdot m_{tot} \cdot s + 2,5 \cdot m_{tot}, \quad [N] \quad (7)$$

gdje su:

$s$  - pružni uspon u ‰,

$R$  - polumjer zakrivljenosti kolosijeka u m; srednji polumjer:  
 $R \approx 2000$  m.

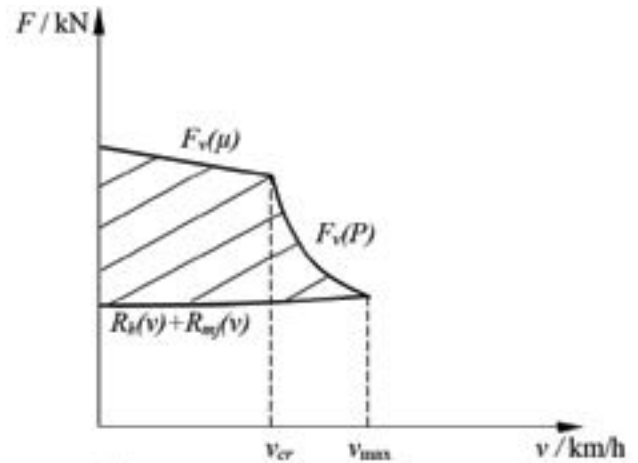
Prema tome ukupna masa vlaka koju će lokomotiva povući na zadanoj brzini i na određenome pružnome usponu jest:

$$m_{tot} = \frac{F_v - 2,3 \cdot v^2}{14,2 + 10 \cdot s + 0,02 \cdot v}, \quad [t] \quad (8)$$

U suprotnome slučaju pružni uspon koji lokomotiva može savladati pri zadanoj brzini s točno određenom masom vlaka jest:

$$s = 0,1F_v \cdot m_{tot}^{-1} - 0,23 \cdot v^2 \cdot m_{tot}^{-1} - 1,42 - 0,002 \cdot v, \quad [\%]. \quad (9)$$

Izjednačavanjem vučne sile lokomotive i sila ukupnog otpora na pružnome usponu brzina vlaka je ograničena (slika 2.).



Slika 2. Vučno svojstvo lokomotive na teretnome vlaku

### 3. Brzina i ubrzanje vlaka

Iz poznate ovisnosti ubrzanja i puta:  $a = a(s)$  određuju se analitički izrazi za osnovne dijagrame brzine koji se mogu odrediti korištenjem  $a(s)ds = vdv$ . Integriranjem te jednadžbe između granica  $v = v_k$  pri  $s = s_k$  te  $v = v_{k+1}$  pri  $s = s_{k+1}$ , vrijedi [4]:

$$\frac{1}{2}(v_{k+1}^2 - v_k^2) = \int_{s_k}^{s_{k+1}} a \, ds. \quad (10)$$

Brzina u svakome sljedećem trenutku može se postići prema:

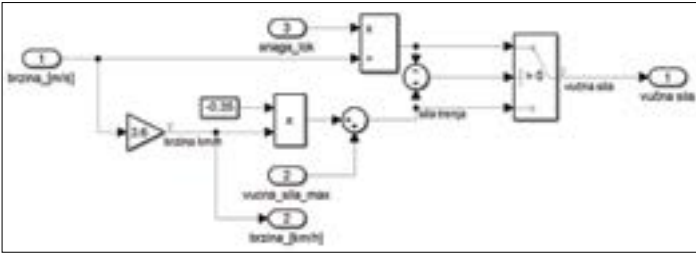
$$v_{k+1} = \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot a \cdot (s_{k+1} - s_k)}, \quad [m/s]. \quad (11)$$

Za to stanje ubrzanje je funkcija vučne sile i ukupnog otpora gibanja na pružnome usponu pri ograničenoj brzini:

$$a = \frac{F_v - (R_h + R_{rl})}{m_{tot}}, \quad [m/s^2]. \quad (12)$$

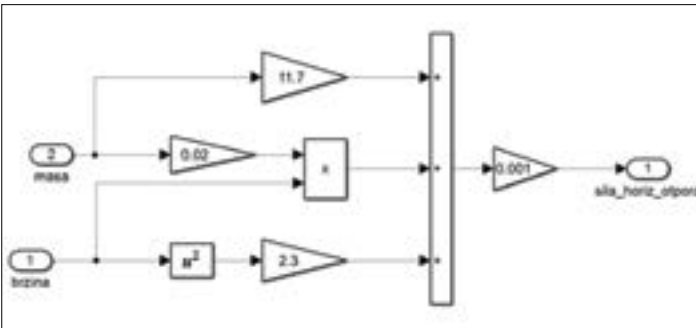
### 4. Simulacija sile

Valja poznavati ulazne varijable za simulaciju vučne sile. Ulazne varijable snaga\_lok, brzina\_[m/s] i vucna\_sila\_max unose se ručno za lokomotivu. Prema matematičkim modelima (1) i (2) simulacijski model računa vučnu silu (slika 3.). Kao rezultat simulacija daje vrijednost vučne sile ovisne o brzini.

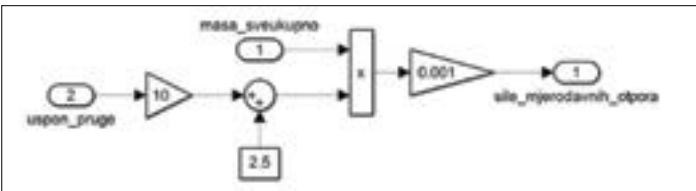


Slika 3. Simulacija vučne sile u MATLAB/Simulinku

Prema matematičkim modelima (3) i (6) mogu se postaviti simulacijski modeli za silu horizontalnih otpora i sile mjerodavnih otpora (slike 4. i 5.).



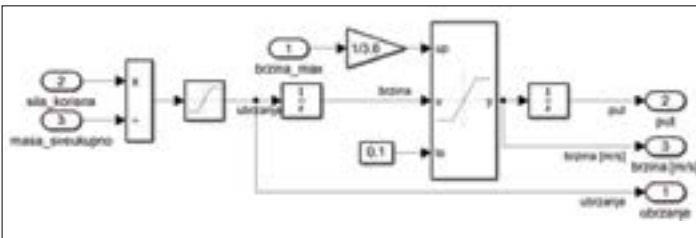
Slika 4. Simulacija sile horizontalnih otpora u MATLAB/Simulinku



Slika 5. Simulacija sile mjerodavnih otpora u MATLAB/Simulinku

### 5. Simulacija brzine

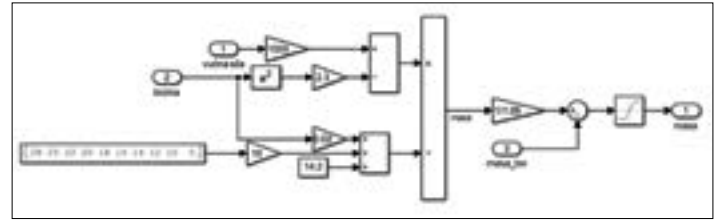
Prema matematičkim modelima (11) i (12) može se postaviti i simulacijski model za ubrzanje vlaka, željenu najveću brzinu vlaka (lokomotive) i prijedni put (slike 4. i 5).



Slika 6. Simulacija ubrzanja, brzine i puta u MATLAB/Simulinku

### 6. Simulacija mase vlaka

Ako se mora izračunati masa vlaka (slika 7.), željena (najveća) brzina i uspon željezničke pruge moraju biti postavljeni kao konstanta. Simulacijom se želi pokazati koliko se tereta može izvući na najvećem usponu neke pružne dionice nekom stalnom brzinom.

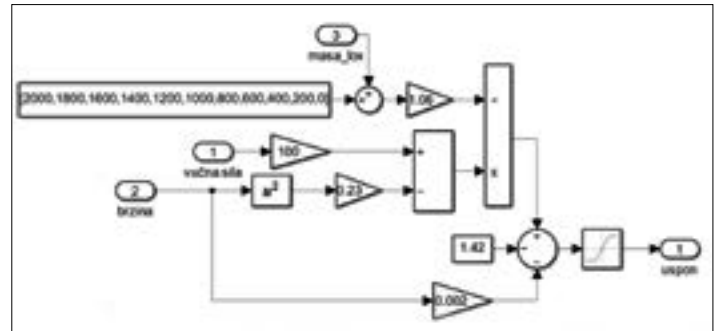


Slika 7. Simulacija mase vagona u MATLAB/Simulinku

### 7. Simulacija pružnog uspona

Posljednji slučaj prema kojemu se želi znati koju najveću vrijednost uspona željezničke pruge može svladati lokomotiva vukući teret točno određenom brzinom i točno određene mase vagona. Simulacijom se može odrediti ograničenje uspona (slika 13.).

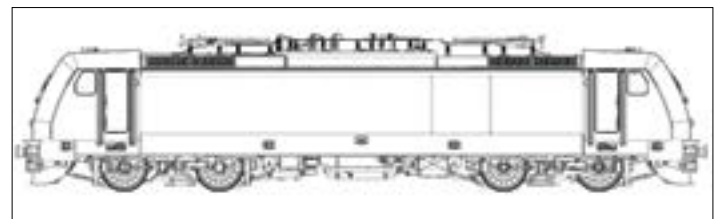
Za prijevoznike je vrlo važno da željeznicom mogu prevesti određenu masu vlaka određenom brzinom. Ako postoji željeznička pruga na usponu, uspon na željezničkoj pruzi smanjit će kapacitet teretnog prijevoza.



Slika 8. Simulacija uspona pruge u MATLAB/Simulinku

### 8. Analiza simulacije

Za analizu simulacijskog modela uzeta je najmodernija Bombardierova lokomotiva TRAXX AC2 vrhunskih svojstava (slika 9.).



Slika 9. Crtež Bombardierove lokomotive TRAXX AC2

Donji postroj lokomotive čine dva okretna postolja s pojedinačnim pogonom svih kolnih sklopova koji su uležišteni preko valjkastih ležajeva. Sile vuče i kočenja prenose se s kućišta ležaja sklopa kotača na okvir okretnoga postolja vučnim motkama. Zavojne opruge u primarnome ovjesu raspoređene su koncentrično na vodilice ležajeva kotača. Hidraulički amortizeri prigušuju ovjes kolnih sklopova.

Okretni moment prenosi se s vučnog motora preko reduktora na vratilo kolnog sklopa. Na svaki kotač pričvršćena su dva kočna diska. Vučni motor i reduktor ovješeni su na okvir okretnog postolja u tri točke. Motor je potpuno ogibljen i prigušen uspravno, vodoravno i poprečno. Snaga lokomotive je 5,6 MW i najveće vučne sile 300 kN te postiže brzinu od 160 km/h.

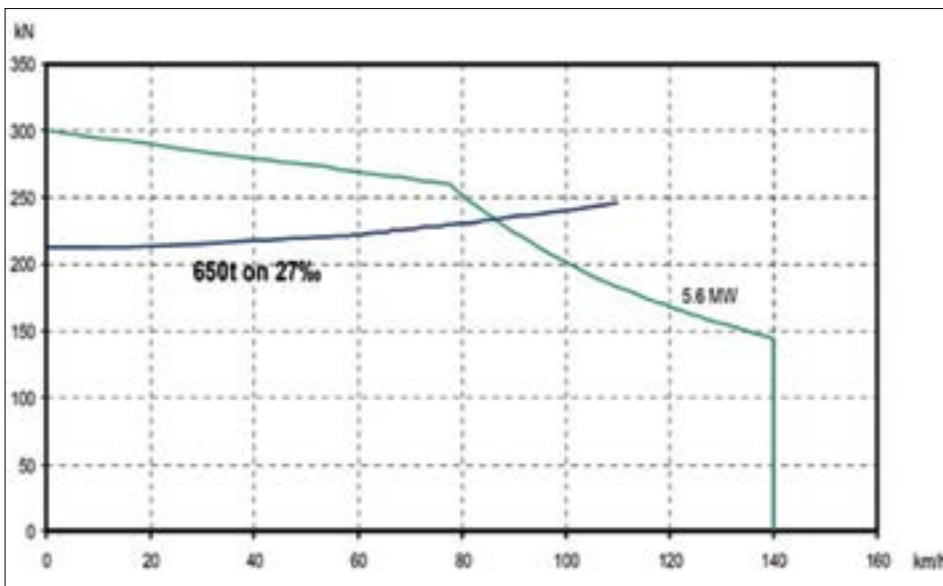
Lokomotiva pomoću IGBT tehnologije može vući snagu preko napona kontaktne mreže 25 kV na 50 Hz i 15 kV na 16⅔ Hz. Transformator izmjeničnog napona hlađen uljem nalazi se ispod glavnog okvira lokomotive. Ispravljač ravna napon i šalje ga u istosmjerni pretvarač

glavnog pogona. Pretvarač glavnog pogona pretvara istosmjerni napon u trofazni, izmjenični.

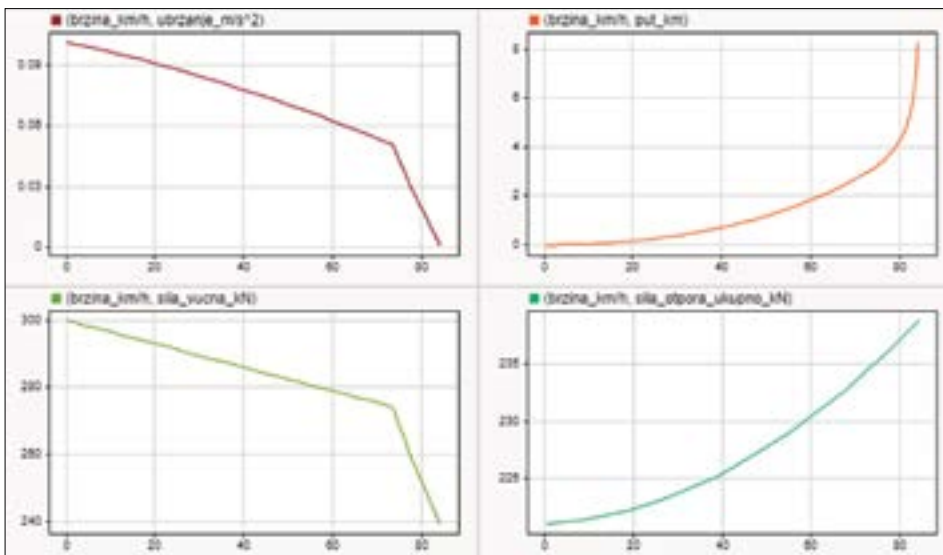
Četiri vučna motora snage 1,4 MW hladi rashlađeni zrak koji upuhuju ventilatori vučnog motora.

**Tablica 1.** Svojstva lokomotive TRAXX AC2

Broj pogonskih kolnih sklopova	4
Raspored kolnih sklopova	B0' - B0'
Najveća brzina	160 km/h
Snaga	5600 kW
Najveća vučna sila	300 kN
Masa	84 t



**Slika 10.** Vučni dijagram Bombardierove lokomotive TRAXX AC2 [5]



**Slika 11.** Prikaz simuliranih rezultata ubrzanja, puta i sile vlaka od 650 t na 27 %

### 8.1. Analiza simulacije

U slučaju simulacije vuče najveće moguće mase vlaka od 650 tona na najvećemu mogućem usponu željezničke pruge od 27 % vlak će moći ostvariti brzinu koju dopušta vučna sila. Kao što je prikazano na dijagramu koji je odredio proizvođač, najveća brzina iznosit će 84 km/h (slika 10.), što pokazuje i simulacija (slika 11.).

U drugome slučaju, odnosno ako se zada najveća brzina vlaka od 107 km/h na usponu 10 %, prijevozniku je važno znati koja se najveća ukupna masa vlaka može prevući u skladu sa zadanim parametrima. Simulacija daje ukupnu masu vlaka od 1232 tona. Svakako, simulacija je proširena pa za razne brzine i na raznim usponima daje rezultate svih ograničenja masa vlaka (slika 12.).

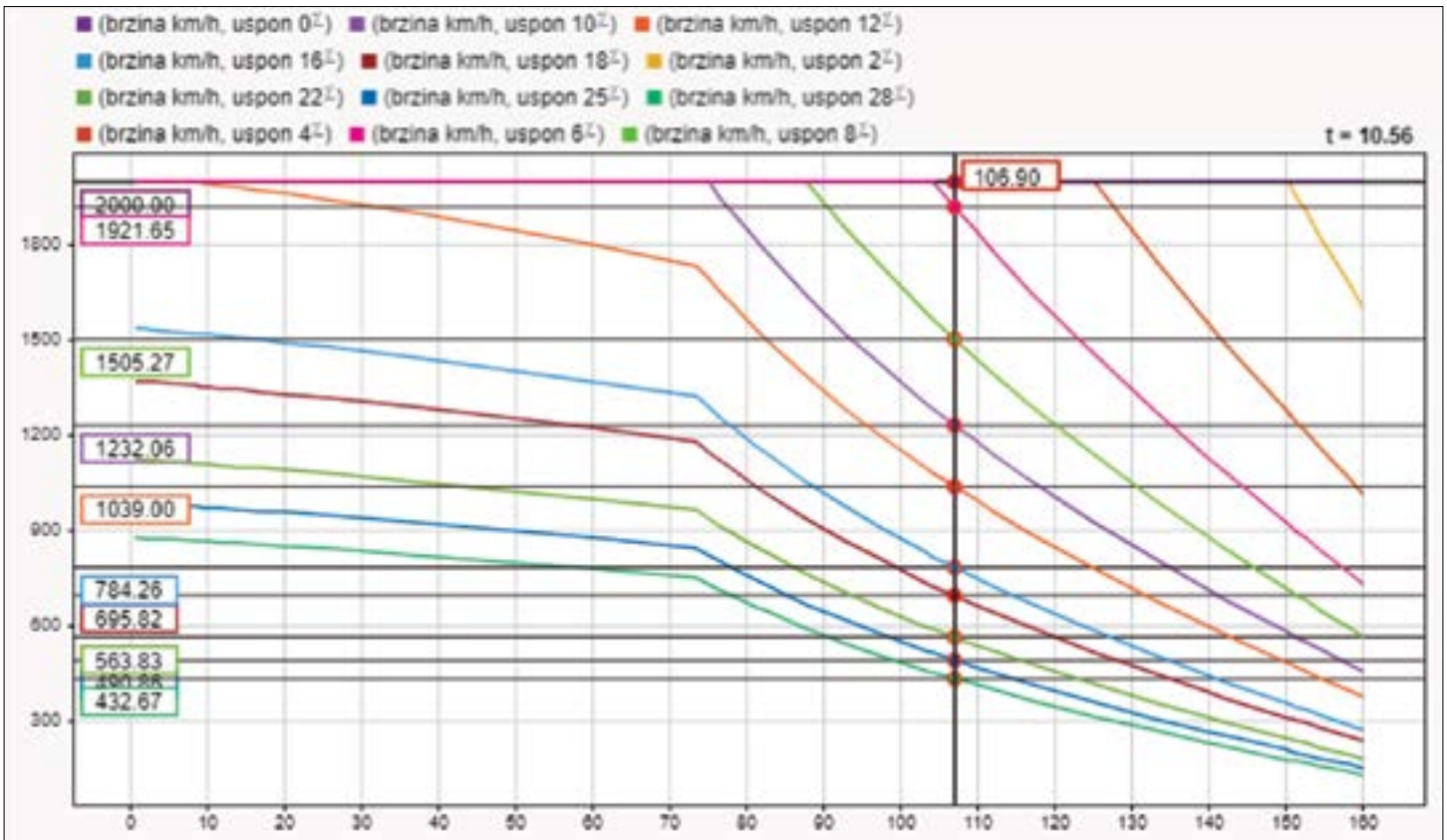
U trećem slučaju, odnosno ako se za vlak mase 800 tona zada najveća brzina vlaka od 82 km/h, prijevozniku je važno znati preko kojeg uspona željezničke pruge može ukupnu masu vlaka prevući sa zadanim parametrima. Simulacija daje najveći uspon željezničke pruge od 23 %. Simulacija je proširena pa za razne brzine i za razne mase vlakova daje rezultate svih ograničenja za pružne uspone (slika 13.).

### 9. Zaključak

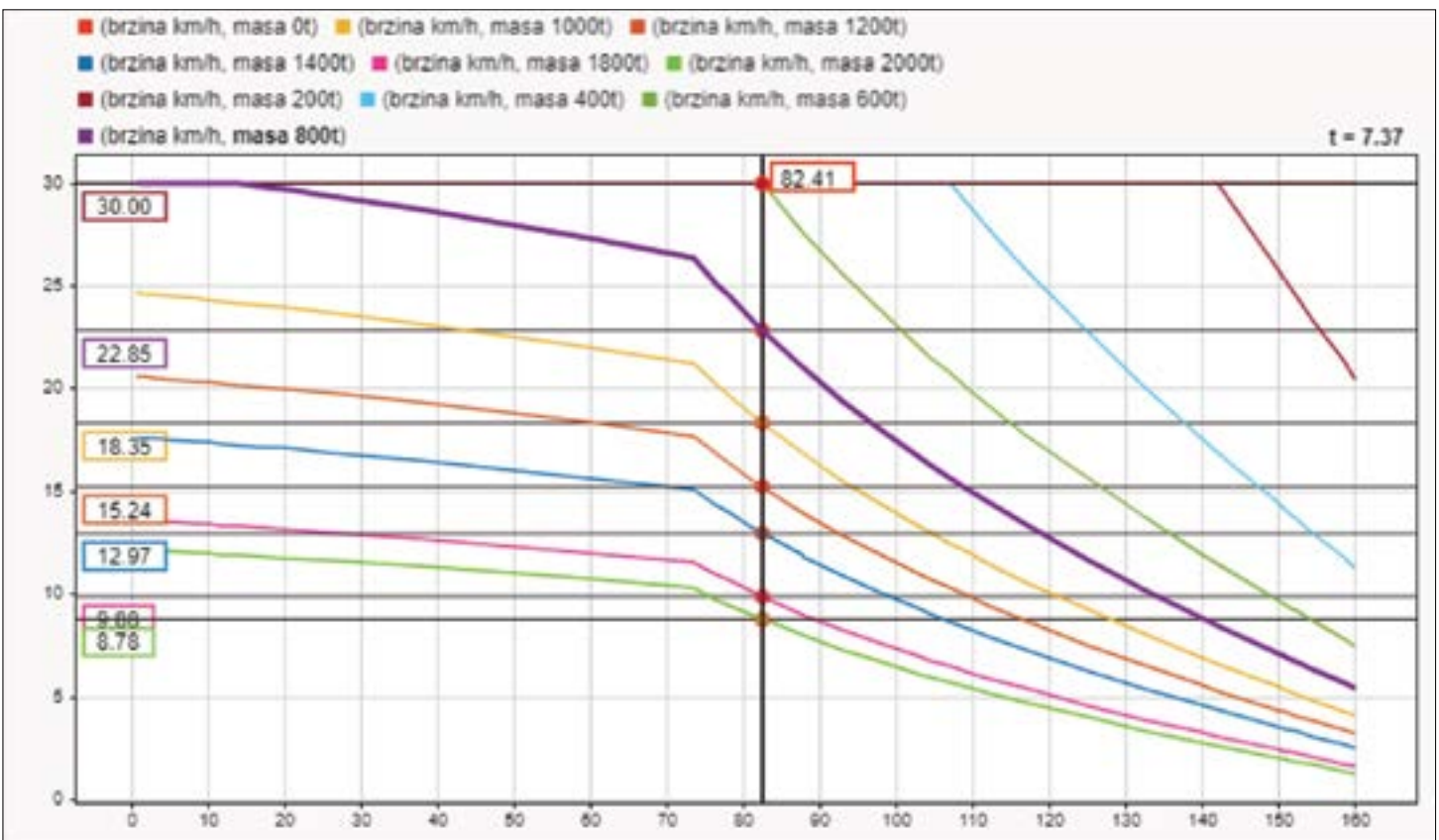
U MATLAB/Simulinku razvijen je simulacijski model lokomotive. Model simulira sva tri slučaja vuče lokomotive. Simulacija daje točnije rezultate od čitanja dijagrama. U prvome slučaju postavljaju se masa vlaka i nagib željezničke pruge, a simulacija aproksimira voznu brzinu.

Osim toga simulacija aproksimira ubrzanje, brzinu i put. U drugome slučaju zadaju se brzina vlaka i nagib željezničke pruge, a simulacija aproksimira najveću masu vlaka. U trećemu slučaju zadaju se brzina vlaka i masa vlaka, a simulacija aproksimira nagib željezničke pruge.

Simulacija se može koristiti za bilo koje željezničko vozilo, a iz priloženog je vidljivo da postoje vrlo mala odstupanja od stvarnih vrijednosti. Svakako se moraju uzeti u obzir aproksimacije ukupne sile otpora jer se razlikuju od vozila do vozila, a zakrivljenost zavoja željezničke pruge nije ista za sve dionice.



Slika 12. Prikaz simuliranih rezultata ovisnosti tereta vlaka i brzine s obzirom na pružni uspon



Slika 13. Prikaz simuliranih rezultata ovisnosti pružnih uspona i brzine s obzirom na teret vlaka

**LITERATURA:**

- [1] J. Vitins, The TRAXX Locomotive Platform, Kassel, Germany: Bombardier, 2004.
- [2] J. Ihme, Schienenfahrzeugtechnik, Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien, 2016.
- [3] J. Serdar, Lokomotive, Zagreb, Croatia: Sveučilišna naklada Liber, 1977.
- [4] J. Ihme, Schienenfahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016.
- [5] R. C. Hibbeler, Engineering mechanics: Dynamics, New Jersey, NJ, USA: Pearson Education, Inc., 2010.

**SAŽETAK**

**SIMULACIJA VUČNIH SVOJSTAVA LOKOMOTIVE HŽ 185 NA TERETNOM VLAKU U PROGRAMSKOME PAKETU MATLAB/SIMULINK**

*Cilj rada jest izraditi simulacijski model teretnog vlaka koji će olakšati proračun vučnih svojstava tijekom izvlačenja tereta. Željeznički prijevoznici trebaju izračunati ubrzanja i brzine vlakova kako bi isplanirali svoje vozne redove. Opisana su vučna svojstva lokomotive i simulacijski model vlaka. Svojstva i modeli aproksimirani su simulacijom u MATLAB/Simulinku. Bombardierova lokomotiva TRAXX AC2 korištena je u simulaciji samo za usporedbu. Istraživanje pokazuje rezultate ubrzanja i brzine vlaka te ovisnost između brzine, nagiba željezničke pruge i mase vučenog vlaka. Treba napomenuti da način kretanja lokomotive uvelike ovisi o odnosu ukupnog otpora vlaka i vučne sile lokomotive. Simulacijski model može se primijeniti na svako vučno željezničko vozilo i može olakšati proračun brzine vlaka, nagiba željezničke pruge i mase vučenog vlaka.*

**Ključne riječi:** vučna svojstva, lokomotiva, uspon, mase, brzina, Simulink

**Kategorizacija:** stručni rad

**SUMMARY**

**A SIMULATION OF TRACTION PROPERTIES OF HŽ 185 LOCOMOTIVE ON A FREIGHT TRAIN IN THE MATLAB/SIMULINK PROGRAMME PACKAGE**

*The aim of the paper is to create a simulation model of a freight train that will facilitate the calculation of traction properties during traction. Railway operators must calculate train accelerations and speeds for timetable planning. The traction properties of the locomotive and the simulation model of the train are described. Properties and models are approximated by simulation in MATLAB/Simulink. Bombardier's TRAXX AC2 locomotive was used in the simulation for comparison purposes only. The research shows the results of the acceleration and speed of the train and the dependence between the speed, the grade of the railway line and the masses of the towed train. It should be noted that the mode of movement of the locomotive largely depends on the ratio of the total resistance of the train and the traction force of the locomotive. The simulation model can be applied to any traction rail vehicle and can facilitate the calculation of train speed, track grade and the masses of the towed train.*

**Key words:** Traction properties, locomotive, grade, masses, speed, Simulink

**Categorization:** professional paper

**JELen**  
PROFESSIONAL

JELen.COM

ONE STEP FURTHER

**VRHUNSKA  
RADNO - ZAŠTITNA  
OBUĆA!**

**JELen PROFESSIONAL d.o.o.**  
Braće Radić 37A, 40319 Belica - HR • Tel: +385 (0)40 384 888  
Fax: +385 (0)40 384 316 • e-mail: jelen@jelen.hr

**PRODAJA OBUĆE /** Tel: +385 (0)40 384 868  
Fax: +385 (0)40 384 316 • e-mail: prodaja@jelen.hr