

Zmogljivost nove Siemensove lokomotive na Slovenskih železnica

Capacity of the New Siemens Locomotive on Slovenian Railways

Bojan Cene

Slovenske železnice so v Sloveniji največji prevoznik v tovornem in v potniškem prometu. Zaradi vse večjih zahtev sosednjih držav in notranjih podjetij v državi po prevozu tovora se je izkazalo, da v Sloveniji potrebujemo sodobnejša vlečna vozila, saj naše lokomotive niso zmožne zadovoljiti mednarodnih zahtev. Stare so že okoli 40 let, nimajo zadovoljive moči, poleg tega so njihovi stroški vzdrževanja previsoki. Zaradi tega bo pričela v letu 2006 na Slovenskem obratovati Siemensova večsistemska lokomotiva 6 MW, ki je izdelana po vseh evropskih merilih in bo lahko obratovala v različnih sistemih električne vleke. V prispevku so podrobno prikazane vse značilnosti te lokomotive z njeno zmogljivostjo, ki je pomembna predvsem za vleko tovornega vlaka na neustreznih progah s prevelikimi vzponi.

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: lokomotive, sile vlečenja, obremenitve, moč)

The Slovenian railways are considered the largest carrier of freight and passenger traffic in Slovenia. Because of permanently increasing demands of neighbouring countries and domestic companies for transporting of loads we need more modern traction vehicles in Slovenia. Slovenian locomotives are around 40 years old, they are becoming too expensive to maintain, and being too weak they are not capable of satisfying international demands. That is why in 2006 the Slovenian railways will introduce multi-voltage Siemens 6 MW locomotives. This locomotive is made to meet all European standards and will be able to work in different systems of electric traction. In addition to the obsolete locomotives, Slovenia also has unsuitable tracks with too steep climbs. That is why all the characteristics of this locomotive are shown in detail in the paper and this locomotive has a large capacity for the traction of goods trains.

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: locomotives, traction force, locomotive loadings, locomotive power)

0UVOD

Slovenske železnice imajo namen kupiti 20 Siemensovih večsistemskih lokomotiv v skupni vrednosti 77,8 milijonov evrov. Gre za štiriosne večsistemske lokomotive z maso 87 ton (sl. 1). Nove lokomotive bodo lahko vozile v naslednjih sistemih električne vleke:

- enosmerni sistem 3 kV,
- enofazni sistem 25 kV, 50 Hz,
- enofazni sistem 15 kV, 16 2/3 Hz.

Njihova moč bo 6 MW z vlečno silo 300 kN in oznako SŽ 541. Lokomotiva bo dosegla največjo hitrost 200 km/h pri vleki potniškega vlaka.

Podobne lokomotive že vozijo tudi po progah nemških, madžarskih, avstrijskih in italijanskih železnic. Za nakup lokomotiv s podobnimi karakteristikami so se odločili tudi v Švici in na Češkem. Pred izbiro je med 19. in 23. januarjem 2004 potekalo natančno preizkušanje večsistemske lokomotive z oznako ES 64 F4 004, ki ima enake elemente kakor izbrani tip lokomotive; razlike so le v končni hitrosti in vrsti osnovnih vozičkov. Preizkusi so potekali na progi Koper - Divača. Lokomotiva je vse preizkuse odlično opravila in dosegla kar nekaj rekordov na tej progi. Obremenitev omenjene lokomotive pri preizkusih na koprski progi je bila v območju od 727 t do 1856 t. Pri tem so se testirale



Sl. 1. Siemensova večsistemska lokomotiva

speljave vlaka na največjem vzponu 26 ‰, pri čemer je ta lokomotiva zelo izpopolnjena, saj je pri masi vlaka 900 t na tem odseku dosegla hitrost 70 km/h.

Težava se je pojavila v energetskega sistema. Pri preizkusni vožnji ni smel na tem območju voziti noben drugi vlak, ker je ta lokomotiva povzročila prevelike obremenitvene toke in padce napetosti. Pomeni, da imamo v Sloveniji premalo električnih napajalnih postaj za lokomotive 6 MW.

1 VLEČNA KARAKTERISTIKA SIEMENSOVE LOKOMOTIVE 6 MW

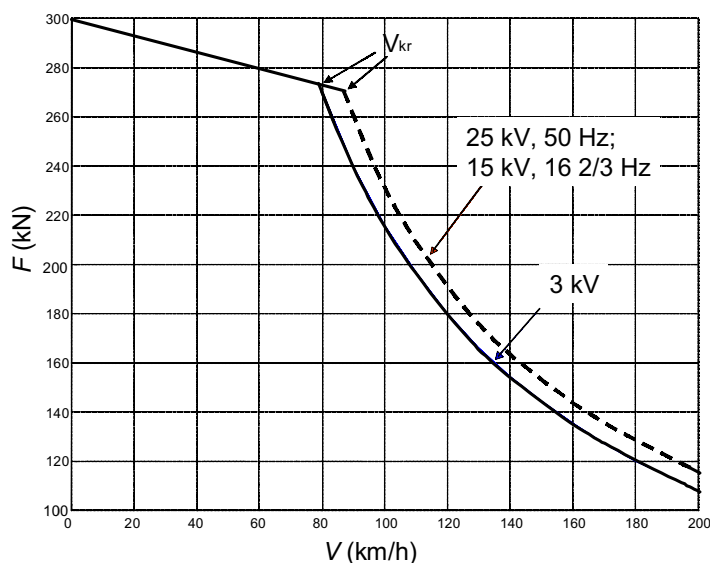
Za oceno uporabne vrednosti neke lokomotive je zelo pomembna oblika krivulje, ki prikazuje velikost vlečne sile F_v (njeno spreminjanje) na obodu pogonskih koles v odvisnosti od hitrosti:

$$F_v = f(v) \quad (1).$$

To zvezo imenujemo VLEČNA KARAKTERISTIKA LOKOMOTIVE, ki jo običajno prikazujemo grafično.

Na sliki 2 je prikazana vlečna karakteristika trisistemske Siemensove lokomotive v enosmernem delovanju 3000 V ter v enofaznem sistemu 25 kV, 50 Hz in 15 kV, 16 2/3 Hz [1].

Lokomotiva doseže pri speljavi največjo vlečno silo na obodu pogonskih koles 300 kN. Pri pospeševanju do hitrosti 80 km/h vlečna sila upade na 270 kN v enosmernem načinu delovanja, pri izmeničnem načinu delovanja pa pri 83 km/h na 265 kN. Vrednosti 80 km/h in 83 km/h pomenita kritično hitrost lokomotive pri največji vlečni sili. To pomeni, da bi trajna vožnja s polno vlečno silo s to hitrostjo povzročila pregretje električnih vlečnih motorjev.



Sl. 2. Vlečna karakteristika Siemensove trisistemske lokomotive

Vlečna sila torej pada od kritične hitrosti po hiperboli [2]:

$$F_v = \frac{P}{v} \quad (2),$$

kjer so:

- F_v vlečna sila v kN,
- P mehanska moč lokomotive na obodu pogonskih koles v kW,
- v hitrost v km/h.

Vlečna karakteristika, ki jo vidimo na sliki 2, je podana od proizvajalca vlečnega vozila, na podlagi katere je treba v vsaki železniški upravi (državi) izračunati zmogljivost lokomotive za vleko določenega vlaka.

2 IZRAČUN ZMOGLJIVOSTI SIEMENSOVE LOKOMOTIVE 6 MW

Zmogljivost lokomotive pove, kakšno maso vlaka je lokomotiva zmožna vleči na določeni progi in s kakšno hitrostjo. Obremenitev lokomotive se izračuna na podlagi največjega vzpona na določenem delu proge. Vzpon proge se izraža v promilih (‰) ali v daN/t po naslednji obliki:

- za vsako tono mase vlaka nastane na vsaki promili vzpona za 10 N upora vzpona ali strmina proge (i) = 1 ‰ = 1 daN/t.

Računska in grafična analiza zmogljivosti lokomotive je glavni pogoj, na podlagi katerega se železniška uprava odloči za nakup lokomotive. Vsi izračuni obremenitev lokomotiv se izvajajo po enotnih enačbah, ki veljajo za vso Evropo.

2.1 Izračun obremenitve trisistemske Siemensove lokomotive na koprski progi

Nova lokomotiva 6 MW je najbolj pomembna za vleko tovornih vlakov na progi Koper – Divača.

Obremenitev lokomotive izračunamo po naslednji enačbi [3]:

$$Q = \frac{F_v - W_l - i \cdot L}{W_v + i} \quad (t) \quad (3),$$

kjer so:

- Q masa vlaka (vagonov) v t,
- W_l upor lokomotive v daN,
- i strmina proge v ‰,
- L masa lokomotive v t,
- W_v upor vagonov v daN/t.

Vlečno silo preberemo iz karakteristike (sl. 2), ki znaša v enosmernem sistemu 3 kV pri kritični hitrosti 270 kN (27000 daN).

Upor lokomotive izračunamo po naslednji enačbi [4]:

$$W_l = 0,65 + \frac{13 \cdot n_{po}}{L} + 0,01 \cdot v + \frac{0,03 \cdot v^2}{L} \quad (\text{daN}) \quad (4),$$

kjer sta:

- n_{po} število pogonskih osi lokomotive,
- v hitrost v km/h.

Osnovni upor posameznih vrst vagonov izračunamo po naslednji enačbi [3]:

$$W_v = 2,2 - \frac{80}{v + 38} + (k + 0,007) \cdot \left(\frac{v}{10}\right)^2 \quad (\text{daN/t}) \quad (5),$$

kjer je:

- k koeficient vrste vagona (0,107 – prazni tovorni vagoni, 0,057 – mešani tovorni vagoni, 0,032 – težki tovorni zaprti vagoni, 0,033 – dvoosni in triosni potniški vagoni, 0,025 – štiriosni potniški vagoni) [4].

Pri hitrosti 80 km/h izračunamo po enačbi (4) osnovni upor lokomotive 4,287 daN in po enačbi (5) glavni upor mešanega tovornega vagona 6,096 daN/t. Podatke vstavimo v enačbo (3) in dobimo naslednji izsledek:

Na progi z vzponom 25 ‰ zmore Siemensova trisistemska lokomotiva 6 MW vleči vlak z maso 800 t s hitrostjo 80 km/h. Pri tej hitrosti že doseže lokomotiva kritično hitrost. Hitrost tovornih vlakov v Sloveniji je največ 75 km/h, pri kateri bo lokomotiva potrebovala manjšo silo od 270 kN.

2.2 Obremenitev Siemensove lokomotive 6 MW na določenih vzponih

V preglednici 1 so prikazane obremenitve Siemensove 6 MW lokomotive na različnih vzponih na Slovenskih železnicah. Obremenitve veljajo za hitrost 80 km/h.

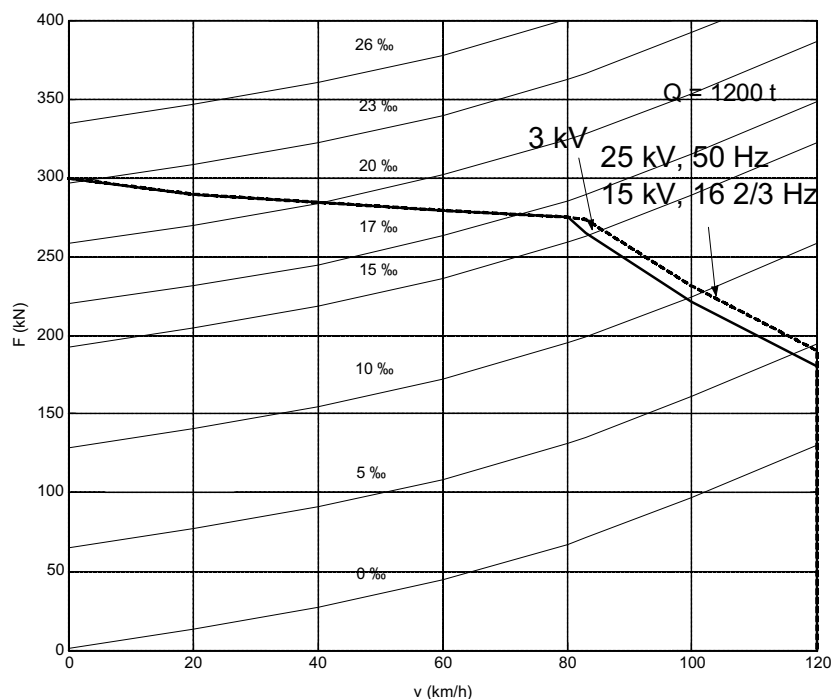
2.3 Zmogljivost Siemensove lokomotive 6 MW pri vleki vlaka z maso 1200 t

Ker je pogoj Evropske zveze vleka tovornega vlaka z maso 1200 t [5], je treba na diagram vlečne karakteristike vrisati vse upore vlaka z maso 1200 t, kar prikazuje slika 3 [1].

Na sliki vidimo, da pri polni vlečni sili prekoračimo kritično hitrost 80 km/h na vzponu proge

Preglednica 1. Največje obremenitve lokomotive 6 MW na različnih vzponih

VLEČNA SILA LOKOMOTIVE $F_v = 270 \text{ kN}$	$v = 80 \text{ km/h}$	VZPON PROGE V ‰	MASA VLAKA V t
		0	4428
		5	2394
		10	1624
		15	1219
		20	969
		25	800



Sl. 3. Vlečna karakteristika lokomotive 6 MW in upori vlaka z maso 1200 t

17 ‰. To je dopustno le kratek čas, sicer bi poškodovali vlečne motorje. Presečišče med vlečno karakteristiko in določeno krivuljo uporov določa največjo hitrost na tem vzponu. To pomeni, da lahko vlak z maso 1200 t na vzponu 17 ‰ vozi 70 km/h, kar je v primerjavi z dosedanjo najmočnejšo lokomotivo na SŽ izjemen napredek.

Na večjem vzponu od 17 ‰ lokomotiva ni več sposobna vleči vlaka z maso 1200 t. S tem smo računsko in grafično potrdili zahtevo Evropske zveze [3], ki določa gradnjo novih prog z največjim vzponom 17 ‰.

Na sliki 4 je prikazana za primerjavo najmočnejša električna lokomotiva na SŽ z oznako 363. Lokomotiva je francoske izvedbe in ima največjo moč na kolesih 2750 kW.

Lokomotiva serije 363 se na SŽ uporablja pretežno za vleko težkih tovornih vlakov na koprski progi. Na sliki 5 sta prikazani njena vlečna karakteristika in zmogljivost.

Lokomotiva serije 363 ima v primerjavi z večsistemsko Siemensovo lokomotivo precej manjšo vlečno silo, ki znaša pri speljavi 260 kN. Njena kritična hitrost 37,5 km/h je precej manjša od Siemensove lokomotive, kar pomeni slabo prepustnost proge. S slike 5 vidimo, da zmora lokomotiva serije 363 na vzponu 16 ‰ vleči vlak z maso 800 t s hitrostjo 70 km/h. Če primerjamo zmogljivost Siemensove lokomotive na vzponu 16 ‰ (sl. 3), vidimo da zmora na tem vzponu vleči vlak z maso 1200 t pri isti hitrosti.

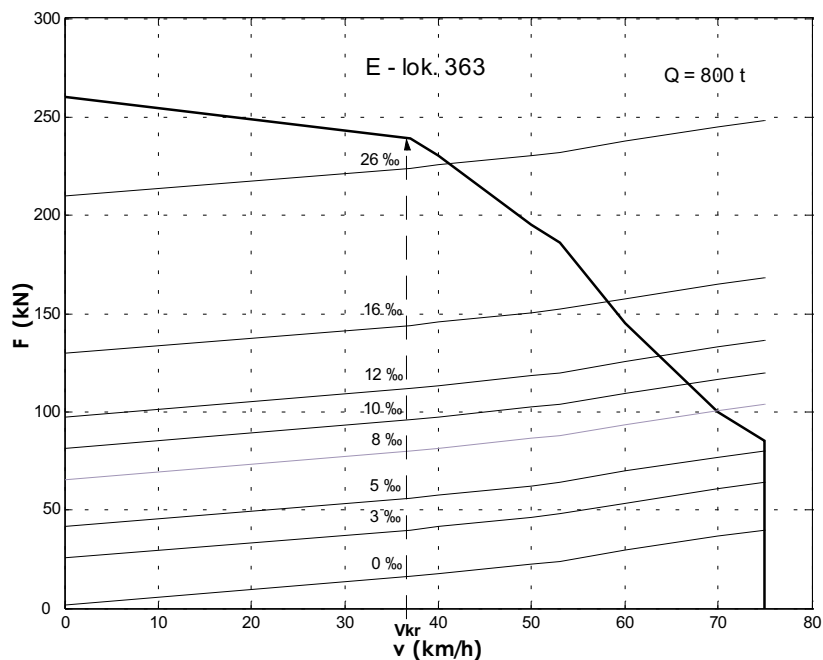
3 ADHEZIJSKA VLEČNA SILA LOKOMOTIVE SIEMENS 6 MW

3.1 Splošno o adhezijski vlečni sili lokomotive

Pri speljavi in pri vleki vlaka moramo upoštevati še silo trenja med kolesom in tirnico. Iz



Sl. 4. Francoska lokomotiva enosmernega sistema 3000 V, serije 363



Sl. 5. Vlečna karakteristika lokomotive 363 in upori vlaka z maso 800 t

fizikalnih zakonov sledi, da lahko vlak speljemo oziroma vlečemo na določenem delu proge, če je vlečna sila lokomotive manjša ali enaka adhezijski masi lokomotive, kar ponazarja naslednja enačba [6]:

$$F_a \geq F_v \quad (6),$$

kjer je:

- F_a adhezijska vlečna sila lokomotive v kN.

Adhezijsko vlečno silo lokomotive F_a izračunamo po naslednji enačbi [6]:

$$F_a = \psi \cdot G_a \quad (7),$$

kjer sta:

- ψ adhezijski koeficient trenja med kolesom lokomotive in tirnico,

- G_a adhezijska masa lokomotive v kN.

Adhezijsko maso lokomotive izračunamo po drugem Newtonovem zakonu:

$$G_a = m \cdot g \quad (8),$$

kjer sta:

- m masa lokomotive v t,

- g pospešek ($9,8 \text{ m/s}^2$).

Adhezijski koeficient izračunamo po enačbi [6]:

$$\psi = 0,25 + \frac{8}{160 + 20 \cdot v} \quad (9).$$

3.2 Posebnost adhezijske vlečne sile pri Siemensovi lokomotivi 6 MW

Pri hitrosti 80 km/h Siemensove večsistemske lokomotive znaša po enačbi (7) adhezijska vlečna sila lokomotive 217,5 kN. Vlečna sila na oboju pogonskih koles (sl. 2) pa znaša 270 kN. To pomeni, da niso izpolnjeni adhezijski pogoji (en. 6) za takšno hitrost in bo lokomotiva zadržala. Šele pri manjši hitrosti oziroma manjši vlečni sili bo adhezijska vlečna sila večja od vlečne sile lokomotive na oboju pogonskih koles.

Omenjene težave imamo v Sloveniji na progah z velikimi vzponi, zaradi česar lahko želeno maso vlaka vozimo z zelo majhnimi hitrostmi (okoli 40 km/h).

Nova Siemensova lokomotiva 6 MW ima elektronsko krmiljenje adhezijskega koeficienta, ki zaradi tega znaša nespremenljivo 0,36 pri speljavi in pri velikih hitrostih [2]. Po izračunih znaša adhezijska vlečna sila Siemensove lokomotive pri hitrosti 80 km/h 313,2 kN, kar je precej nad vlečno silo lokomotive na oboju pogonskih koles (270 kN). Pomeni, da bomo z novo Siemensovo lokomotivo 6 MW zaradi krmiljenja na koprski progi brez težav obvladali maso vlaka 800 t pri hitrosti 75 km/h.

4 MOČ SIEMENSOVE LOKOMOTIVE 6 MW

4.1 Mehanska moč lokomotive

Mehanska moč lokomotive je moč na oboju pogonskih koles lokomotive in jo izračunamo po enačbi [7]:

$$P_m = \frac{F_v \cdot v}{360} \quad (\text{kW}) \quad (10).$$

Pri trisistemski Siemensovi lokomotivi znaša mehanska moč pri hitrosti 80 km/h in pri vlečni sili 270 kN točno 6000 kW.

4.2 Moč lokomotive na vlečnem kavljju

Moč lokomotive na vlečnem kavljju je koristna moč za vleko vlaka in je od mehanske moči lokomotive P_m manjša za osnovni upor lokomotive

(4). To moč izračunamo po enačbi [7]:

$$P_k = \frac{(F_v - w_l) \cdot v}{360} \quad (\text{kW}) \quad (11),$$

kjer je:

- P_k moč lokomotive na vlečnem kavljju.

Pri Siemensovi trisistemski lokomotivi znaša moč na vlečnem kavljju pri hitrosti 80 km/h 5998 kW.

4.3 Električna moč lokomotive

Električna moč lokomotive je tista, ki jo dobimo na odjemniku toka lokomotive in je v odvisnosti od obremenitvenega toka lokomotive in od napetosti voznega omrežja. Obremenitveni tok lokomotive v enosmernem omrežju 3000 V izračunamo po enačbi [8]:

$$I_o = \frac{F_v \cdot v}{1000} \quad (\text{A}) \quad (12),$$

kjer je:

- I_o obremenitveni tok lokomotive.

Siemensova trisistemska lokomotiva obremenjuje enosmerno vozno omrežje napetosti 3000 V pri vlečni sili 270 kN in pri hitrosti 80 km/h s tokom 2160 A.

Če to vrednost pomnožimo z imensko napetostjo voznega omrežja 3000 V dobimo vrednost električne moči lokomotive 6480 kW.

5 SKLEP

Trisistemska Siemensova lokomotiva moči 6 MW pomeni za Slovenske železnice velik napredek. Trenutno najmočnejša lokomotiva na SŽ ima moč 2,75 MW in zmore na vzponu proge 26 ‰ obremenitev vlaka z maso 700 t s hitrostjo 40 km/h. Siemensova 6 MW lokomotiva zmore na tem vzponu obremenitev 800 t s hitrostjo 80 km/h, kar pomeni precejšnji napredek v prepustnosti proge. Na sliki 3 smo videli, da je vzpon proge glavni problem obremenitve lokomotive in da je vzpon 17 ‰ mejna vrednost sodobne večsistemske lokomotive. Zato se vse nove proge v Evropi projektirajo z največjim vzponom 17 ‰. Naslednja težava Slovenskih železnic je v zastarelem in pomanjkljivem elektroenergetskem sistemu. Električna moč Siemensove lokomotive 6 MW doseže pri polni obremenitvi prek 6 MW, kar pomeni, da je lokomotiva močnejša od večine električnih napajalnih postaj na Slovenskih železnicah. Moči napajalnih postaj se pri nas gibljejo

od 4,5 MW do 7,5 MW. Povprečna medsebojna oddaljenost napajalnih postaj je v Sloveniji 30 km. Evropske države, ki imajo enosmerni sistem električne vleke 3000 V, so podvojile število električnih

napajalnih postaj z največjo medsebojno oddaljenostjo 15 km. Zato je na tej lokomotivi omogočeno s posebnim stikalom omejiti vlečno silo in se tako prilagoditi sedanjemu sistemu.

6 LITERATURA

- [1] Cene, B. (2004) Modernizacija električne vleke na SŽ, Magistrsko delo, *Univerza v Mariboru, FERI*, Maribor.
- [2] Jagodič, F. (1963) Električna vleka, *Univerzitetna založba v Ljubljani*, Ljubljana.
- [3] NAVODILO 52 NA JŽ, Poslovodni odbor Skupnosti Jugoslovanskih železnic, Beograd, 1989.
- [4] Siemens, Predstavitev trisistemske lokomotive, Sejem elektronike v Ljubljani, Ljubljana, 2001.
- [5] Direktiva 96/48/ES, Bruselj, 2002.
- [6] Dinić, D. (1984) Železnička vučna vozila, *Saobraćajni fakultet u Beogradu*, Beograd.
- [7] Cene, B. (1999) Elektromotorski pogoni sodobnih potniških vlakov, *Univerza v Mariboru, FERI*, Maribor.
- [8] Cene, B. (2004) Poraba električne energije pri vleki vlakov, *Revija ER* št. 2/2004, Ljubljana.

Avtorjev naslov: Bojan Cene
Ul. II. bataljona 10
3230 Šentjur
bojan.cene@email.si

Prejeto: 9.12.2004
Received:

Sprejeto: 24.2.2005
Accepted:

Odprto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year