



## METODE SMANJENJA HABANJA ŠINA LAKIH ŠINSKIH VOZILA

Jovan Tepić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, jot@nspoint.net

**Apstrakt:** Habanje šina ima značajan uticaj na troškove održavanja i vek trajanja koloseka lakih šinskih vozila. Pored poznatih metoda zamene i postupka nanošenja metala navarivanjem pozitivni efekti se mogu ostvariti primenom direktnih pogona. Karakteristike koje imaju sinhroni visokomomentni motori sa uzbuđenjem trajnim magnetima su daleko povoljnije od pogona elektromotora sa prenosnikom. Značajno se ističe visoki moment pri malom broju obrtaja, veliko preopterećenje momentom, visok stepen korisnog delovanja, manja masa i prostor ugradnje, brz dinamički odziv sa velikim ubrzanjima i usporenjima, smanjen broj ugradbenih mehaničkih delova, smanjen intenzitet buke, visoka pouzdanost i sigurnost pogona.

**Ključne reči:** laka šinska vozila, habanje šina, direktni pogon, visokomomentni motor, karakteristike pogona

### 1. UVOD

Habanje šina lakih šinskih vozila na pravcu, usponima i padovima, te krivinama, skretnicama i staničnim stajalištima je negativna prateća pojava tokom eksploatacije. Ova neželjena pojava ima značajan uticaj na troškove održavanja i određuje vek trajanja koloseka lakih šinskih vozila. Svaka zamena ili popravka oštećenih šina pored troškova održavanja uzrokuje i troškove usporenja ili zastoja saobraćaja. Zato se kod konstruisanja novih vozila mora pokloniti maksimalna pažnja projektovanju i izgradnji novih koloseka uz uvažavanje svih zahteva da bi se smanjilo habanje.

Pored poznatih metoda saniranja oštećenja šina moguće je primeniti savremene konstrukcione metode koje su u praksi poznate i proverene, ali nisu našle širu praktičnu primenu u transportnim sistemima. Nova konstrukciona rešenja su se pojavila i razvila sa razvojem računarske tehnike, upotrebom novih materijala i pooštavanjem kriterijuma od strane potencijalnih kupaca.

### 2. OSNOVE KONSTRUKCIJE KOLOSEKA

Često se susrećemo sa situacijom da se opterećenje koloseka lakih šinskih vozila podcenjuje pa je sličan i pristup konstrukciji, rekonstrukciji i održavanju koloseka.

To je pogrešan pristup kod analiziranja problema i rešavanja istih. Stoga je neophodno za procenu konstrukcije koloseka poznavati godišnje opterećenje  $Gt$ , tj. količinu tereta koja se u jednoj godini preveze kolosekom.

Na osnovu toga kriterijuma koloseci lakih šinskih vozila dele se u četiri kategorije. Ovo je važno zato jer će nam to odrediti u kojem najdužem vremenskom periodu moramo na koloseku obaviti neku od operacija rekonstrukcije ili zamene delova.

U tabeli 1. date su okvirne vrednosti trajanja šina u zavisnosti od kategorije koloseka lakih šinskih vozila [1].

**Tabela 1.** Prikaz vrednosti trajanja šina u zavisnosti od kategorije koloseka lakih šinskih vozila

Kategorija	Promet	Opterećenje $Gt$ [ $10^6 t/godina$ ]	Trajnost šine na pravcu [godina]	Trajnost šine u krivini $R < 50$ m [godina]
1	Laki	$Gt < 2$	30 – 40	10
2	Srednji	$2 < Gt < 5$	20 – 30	5 – 10
3	Teški	$5 < Gt < 10$	20	3 – 5
4	Ekstremni	$Gt > 10$	< 20	2 – 3

Deo koji će se sigurno potrošiti i koji moramo pre ili posle zameniti je šina i periodičnost njene zamene zavisi od kategorije koloseka.

Kod lakih šinskih vozila po pitanju šina postoji još jedna od poteškoća, a to su krivine malih poluprečnika u kojima je trošenje šine veliko i njena trajnost često vrlo kratka.

Zamena istrošene šine je neminovnost, ali nije svejedno u kakvim uslovima i koliko često će se ona obavljati, te da li postoji verovatnoća da se i pre zamene šina mora intervenisati na kolosečnoj konstrukciji. U novije vreme eksploatacije lakih šinskih vozila, šine su izložene sve većim brzinama i osovinskim opterećenjima, usled čega se javljaju i sve veća eksploataciona oštećenja.

Habanje šina značajno je smanjeno upotrebom čelika odgovarajućeg kvaliteta i sredstava za podmazivanje, greške nastale usled kontaktnog zamora, postaju sve veći problem na visoko opterećenim prugama.

Veći deo službi održavanja primenjuje razne oblike reparatura oštećenih mesta delova šina radi

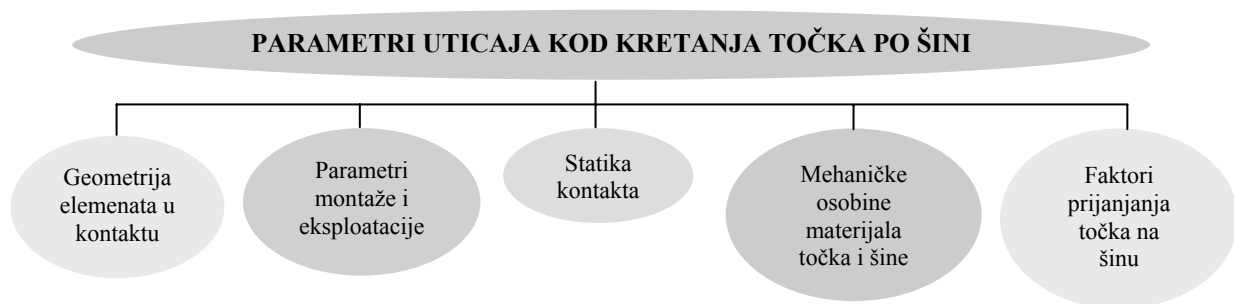
smanjenja troškova održavanja, pri čemu se pored skraćanja vremena u otkazu, povećavaju bezbednost, efikasnost i produktivnost.

Elementi neposrednog kontakta sa točkovima, šine i skretnice su izložene intenzivnom habanju i zamoru, koje često prelazi dozvoljene granice.

Prema nekim podacima, udeo troškova za šine u celokupnim troškovima za gradnju kolosečnog postrojenja iznosi oko 40 % [2].

### 3. PARAMETRI KONTAKTA TOČAK – ŠINA

Pri kontaktu točkova i šina javljaju se naponi i deformacije, te trenja i habanja koja su veoma kompleksna. Na ista utiče veći broj parametara [3]. Navedeni parametri (slika 1.) su međusobno zavisni i utiču jedni na druge, tako što se pri kretanju superponiraju svi efekti.



**Slika 1.** Parametri koji utiču na napone i deformacije u točku i šini i uslove habanja

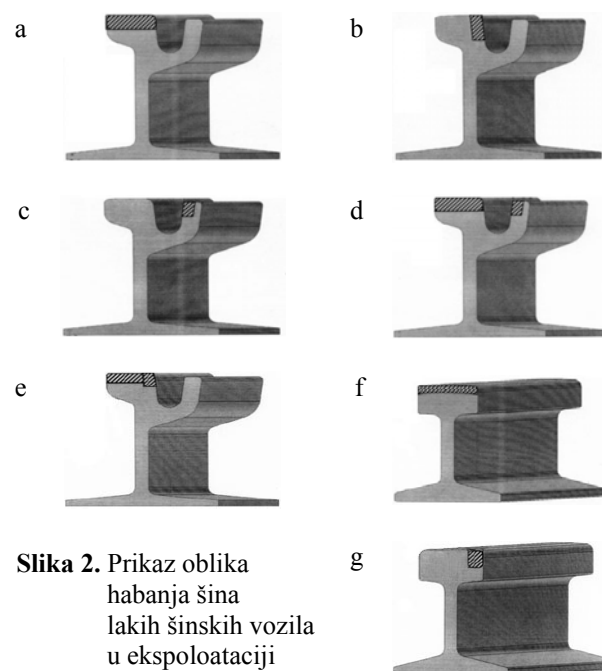
Za šine lakih šinskih vozila je karakteristična pojava habanja koja nastaje kao posledica kočenja pri ulasku u stanicu, te izlasku iz stanice usled pokretanja. Raznim ispitivanjima oblika šine ustanovljeno je da se kao posledica habanja javlja razlika u visini i širini glave, te habanja bočnih zidova unutar žljeba šine.

Na slici 2. dat je prikaz oblika habanja šina lakih šinskih vozila u eksploataciji [4]:

- po visini šireg dela glave šine sa žljebom,
- po širini šireg dela glave šine sa žljebom,
- po širini užeg dela glave šine sa žljebom,
- istovremeno habanje po visini šireg i širini užeg dela glave šine sa žljebom,
- istovremeno habanje po visini i debljini šireg dela glave šine sa žljebom,
- po visini šine bez žljeba i
- po širini šine bez žljeba.

Visoki stepen habanja šina vodi do prevremenog oštećenja točkova i samog vozila, a time utiče i na stabilnost vozila. Sve ovo može se smatrati nedozvoljenim ponašanjem sa stanovišta sigurnosti saobraćaja. Troškovi nabavke novih šina i ukupna finansijska ulaganja oko zamene šina su veoma velika. Zato je neophodno usmeriti pažnju na ona

tehnička rešenja koja će u još značajnijoj meri uticati na smanjenje habanja šina, odnosno na smanjenje troškova održavanja infrastrukture koloseka lakih šinskih vozila.



**Slika 2.** Prikaz oblika habanja šina lakih šinskih vozila u eksploataciji

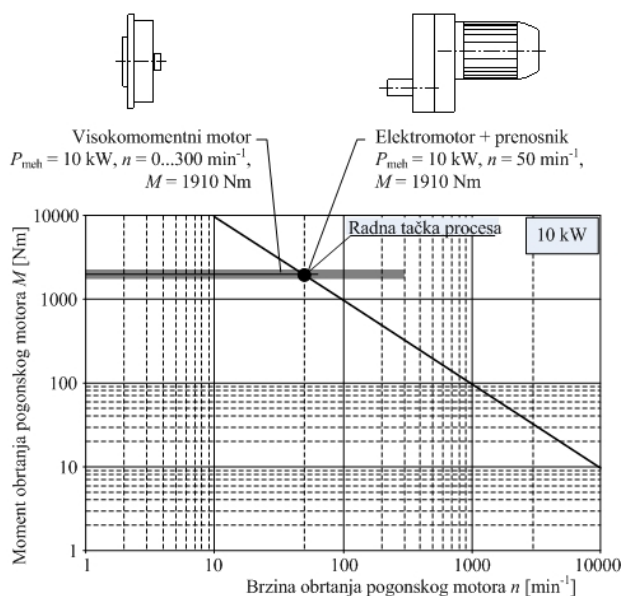
## 4. PREDLOG SMANJENJA HABANJA ŠINA

### 4.1 Karakteristike pogona lakih šinskih vozila

Znamo da snaga ( $P_t$ ) za vuču stoji u strogoj zavisnosti sa vučnom silom ( $F_t$ ) i brzinom ( $v$ ),  $P_t = F_t \cdot v$ . Ako je snaga na obodu točka konstantna  $P_t = \text{const}$ , a brzina se menja, onda se vučna sila menja u zavisnosti od brzine.

Grafički predstavljena ova zavisnost vučne sile od brzine izgleda kao ravnostrana hiperbola i naziva se idealna vučna karakteristika. Vučna karakteristika šinskih vozila sa električnim prenosnikom ima kontinualni karakter i oblik koji se najviše od svih prenosnika snage približava idealnom obliku vučne sile [5]. Izvedba pogona iziskuje prilagođavanje radne tačke pogonskog mehanizma, definisane nazivnim momentom i brzinom obrtanja s radnom tačkom procesa [6].

U najvećem broju rešenja prilagođavanja na radnu tačku procesa obavljaju se pomoću mehaničkog prenosnika (slika 3.).



Slika 3. Radna tačka direktnog i pogona s prenosnikom

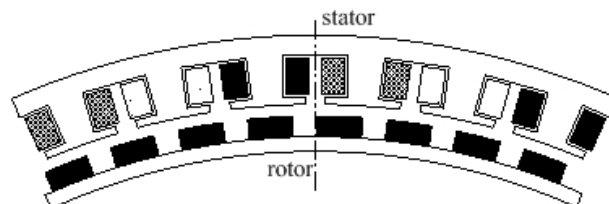
Savremena tehnička rešenja oblikuju pogonski mehanizam da se izostavi prenosnik, tj. primeni pogonski uređaj koji neposredno pokreće osovinski sklop ili točak, tj. pogonski uređaj postaje direktni pogon.

### 4.2 Opšti principi rada i izvedba visokomomentnih motora

Osnovu direktnog pogona čini momentni motor, odnosno visokomomentni motor. Široki raspon brzine obrtanja unutar kojeg je i radna brzina procesa uz traženi visoki moment obrtanja je

osnovna značajka izbora i primene direktnog pogona u pogonskom mehanizmu. Osnovna konstrukciona karakteristika visokomomentnog motora, koja ga razlikuje od većine elektromotornih pogona, sastoji se u različitom broju polova u statorskom i rotorskom delu.

Na slici 4. prikazana je izvedba višefaznog sinhronog motora sa uzbuđom putem trajnih magneta, a po nekim autorima naziva se i modularni motor sa trajnim magnetima.



Slika 4. Izvedba višefaznog sinhronog motora

Visokomomentni motori su potekli iz vojne namenske industrije. Ovi motori zauzimaju sve značajniji segment u tehničkim sistemima pa tako i kod projektovanja konstrukcije lakih šinskih vozila.

Direktni pogon čini visokomomentni motor koji je nastao "namatanjem" linearnih motora na kružni venac, a koristi se za rotaciona kretanja unutar tehničkih sistema.

Osnovne karakteristike direktnih pogona je veliki pogonski moment pri malim brzinama obrtanja [7]. Ponuda ovih motora na tržištu u oko 90 do 95 % slučajeva svodi se na tzv. "kit" ili "bezkućišnu" izvedbu, koja se sastoji iz statorskog dela sa namotima i rotora s trajnim magnetima.

Na slici 5. prikazana je "kit" izvedba Torque motora [8], sa brzinom obrtanja od 0 do  $300 \text{ min}^{-1}$  i maksimalnim momentom od 880 Nm.



Slika 5. "Kit" izvedba Torque motora 1FW6130-0PA10

### 4.3 Karakteristike direktnih pogona

#### Oblik i dimenzije

Tehnički najzanimljivija dodatna karakteristika direktnog pogona s visokomomentnim motorima su njegove dimenzije.

Kratke je aksijalne dužine i relativno velikog prečnika. Masa kao funkcija prečnika vrlo je mala.

Izrađuju se sa šupljim rotorom čiji unutrašnji prečnik omogućava niz tehničkih rešenja koja puna vratila nemaju.

Veliki unutrašnji prečnik šupljeg rotora visokomomentnog motora je dodatna prednost u primeni u raznim područjima mašinogradnje, jer daje veliku fleksibilnost u oblikovanju direktnih pogona pogonskih mehanizama i integraciju u viši tehnički sistem bez dodavanja prekomernih pokretnih masa.

Važno je istaći da se u mašinogradnji obično primenjuju motori prečnika od 200 do 1200 mm.

### Prostor ugradnje

Kod razvoja pogonskih mehanizama cilj je postići što manju, a time i kompaktniju izvedbu sa svim elementima pogona integrisanim u jednu ugradbenu celinu.

Upotrebom visokomomentnih motora, osnovne karakteristike visokog pogonskog momenta pri niskim brzinama obrtanja u pogonskom mehanizmu ogleda se u tome što se dobija šuplja forma male ugradbene dužine, unutar koje su smešteni elementi pogona, što je dovoljan uslov za smanjenje prostora ugradnje.

### Dinamika pogona

Visokomomentni motori su konstruisani tako što se koriste kao direktni pogoni, čime se eliminiše primena zupčastih, pužnih, remenskih, lančanih prenosnika, te drugih prenosnih mehaničkih elemenata, čime se omogućava direktno spajanje rotora motora sa radnim motorom.

Zbog izuzimanja mehaničke redukcije tromosti masa između radnog i pogonskog člana i malih sila trenja, ubrzanje i usporenje koje nastaje u radu je znatno veće nego kod standardnih pogona s prenosnikom. Vrlo mala vremenska električna konstanta u većini danas razvijenih električnih sistema je manja od 3 ms, što daje brzi dinamički odziv momenta obrtanja sa velikim ubrzanjima i usporenjima, usled povećanog poteznog momenta  $M_{\max} \approx 3M_N$ .

Uporedbe radi dinamičkih karakteristika, potezni moment visokomomentnog motora je 2,5 do 4,5 puta veći od poteznog momenta obrtanja asinhronog motora  $p = 2$  pola kod iste snage, čime je osigurano traženo preopterećenje u radu.

Vreme ubrzanja od stanja mirovanja do radne brzine obrtanja, uz uzimanje u obzir momenta tromosti opterećenja s radnim momentom, nalazi se u području 5 do 20 ms i uporedivo je sa onima kod standardnih pogona [9].

### Pouzdanost i buka

Pouzdanost direktnog pogona s visokomomentnim motorom je verovatnoća da u radnom veku proizvoda pod određenim uslovima rada neće doći do pojave neispravnosti usled greške, ispada radi neispravno vođenog procesa, štete ili havarije. Kod direktnog pogona u tehničkom sistemu kad nastane kvar, rad sistema mora se prekinuti dok se isti ne otkloni. Pouzdanost direktnog pogona od posebnog je značaja za održavanje [10], ali i za razvoj u oblikovanju proizvoda.

Buka u tehničkim sistemima može biti strukturalna i vazдушna [11]. Buka i vibracije nastaju istovremeno kao posledica istih uzroka pri poremećajima u radu, u direktnim pogonima. Valjkasti ležajevi i strujanje rashladne tečnosti kroz kanale izvor su buke. Pravilnim izborom uležištenja može se uticati na nivo buke. Brzina strujanja rashladnog medija kroz rashladne kanale oko statora motora dodatni je uzrok nastanka buke i prema preporuci proizvođača rashladnih sistema mora biti do 1 m/s. Nivo buke kod direktnih pogona je znatno niži nego kod elektromotora sa prenosnikom i manji je od 65 dB [9].

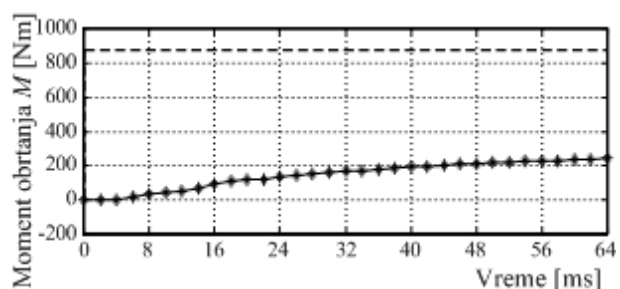
## 5. IZBOR POGONSKOG MOTORA

### 5.1 Dinamičke karakteristike

Visokomomentni motor je uzet u razmatranje i ima oznaku: 1FW6130-0PA10, slika 5. sa regulisanom brzinom obrtanja od 0 do 300  $\text{min}^{-1}$  i  $M_{\max}$  od 880 Nm.

Odabrani motor je višefazni sinhroni motor s uzbuđenjem trajnim magnetima s 33 para statorskih polova. Jedna od karakteristika je odziv momenta obrtanja. To je dinamička karakteristika vezana za vreme uspostave momenta obrtanja u pogonu usled poremećaja.

Slika 6. prikazuje odziv brzine obrtanja pogonskog motora na skokovitu promenu reference momenta obrtanja sa 0 na  $M_{\max}$  od 880 Nm.

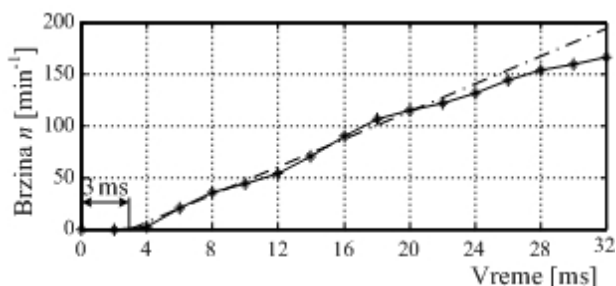


Slika 6. Odziv brzine obrtanja pogonskog motora

Nakon određenog početnog mrtvog vremena, odziv brzine obrtanja je približno linearan sve do brzine od  $120 \text{ min}^{-1}$ . Razlog tome je moment obrtanja motora koji je u tom području konstantan i puno veći od momenta trenja motora  $M_{tr}$ .

Slika 7. prikazuje početno mrtvo vreme odziva brzine obrtanja pogonskog motora uključujući linearnu aproksimaciju (linija-tačka-linija).

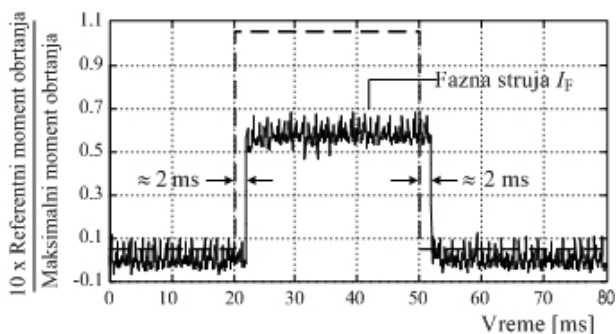
Ova slika pokazuje da je početno, odnosno čisto mrtvo vreme odziva približno jednako 3 ms.



Slika 7. Odziv brzine obrtanja pogonskog motora

Budući je ekvivalentno mrtvo vreme merenja brzine obrtanja jednako  $t_s/2 = 1 \text{ ms}$  ( $t_s = 2 \text{ ms}$  – vreme uzorkovanja mernog signala) [12], mrtvo vreme odziva momenta obrtanja je  $\approx 2 \text{ ms}$ .

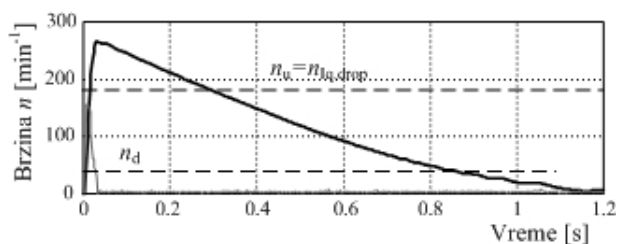
Slika 8. prikazuje odziv merenog signala fazne struje motora pri skokovitoj promeni momenta obrtanja pogonskog motora uz blokirani, tj. zakočeni rotor ( $n = 0$ ).



Slika 8. Odziv merenog signala fazne struje motora pri skokovitoj promeni momenta obrtanja uz zakočeni rotor

U ovom slučaju fazna struja motora ima DC oblik i proporcionalna je momentu obrtanja motora [13]. Prikazani odziv, slika 9. potvrđuje da je kašnjenje odziva struja/moment obrtanja oko 2 ms.

Iz karakteristika na slikama 6, 7. i 9. je vidljivo da pogonski motor gubi moment obrtanja na visokim brzinama obrtanja. To se događa zbog efekta zasićenja napona motora.

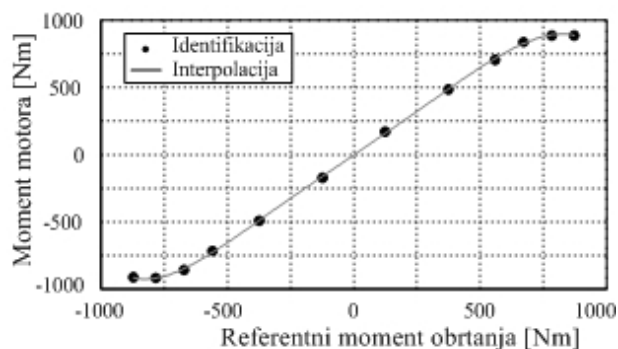


Slika 9. Karakteristika pokretanja i zaustavljanja pogonskog motora bez dodatne mase i spoljnog opterećenja

## 5.2 Statička karakteristika

Iz statičke krive momenta obrtanja, slika 10. uočava se da pogonski motor zaista razvija maksimalni moment obrtanja od približno 880 Nm u oba smera obrtanja. Statička kriva je linearna do momenta obrtanja od 500 Nm, a u području od 500 do 880 Nm ima malo manji gradijent prirasta.

Ova karakteristika je u skladu s dokumentacijom motora [14]. Za potrebe on-line korekcije referentnog momenta obrtanja u kontrolnom programu (tj. on-line linearizaciji krive momenta obrtanja), invertirana statička kriva  $M$  ( $M_{em}$ ) je interpolirana polinomom petog stepena (slika 10.).



Slika 10. Procenjena kriva momenta obrtanja motora

## 6. ZAKLJUČAK

Pored poznatih metoda gradnje i održavanja koloseka, te savremenih konstrukcionih rešenja izvedbe pogona lakih šinskih vozila, predloženo je sveobuhvatno zadovoljavajuće rešenje smanjenja habanja uvođenjem direktnih pogona.

Direktni pogoni sa visokomomentnim motorom su novo rešenje za pogonske mehanizme tehničkih sistema, među kojima značajno mesto zauzimaju transportna sredstva.

Značajne karakteristike direktnog pogona za konstrukciju lakih šinskih vozila su:

- veliki prečnik statorskog i rotorskog paketa šuplje izvedbe uz malu ugradbenu dužinu;

- veliki specifični moment obrtanja u trajnom radu od 2,2 do 2,7 Nm/kg, tj. 8,3 do 9 Nm/kg za područje preopterećenja momentom, čime se znatno smanjuje masa pogona i prostor ugradnje u poređenju sa standardnim elektromotorom s prenosnikom istih karakteristika;

- visoki stepen korisnog delovanja;

- pogon bez zazora i vrlo velike torzijske i savojne krutosti, zbog direktnog povezivanja pogonskog motora sa opterećenjem;

- vrlo male vremenske električne konstante, a time i brz dinamički odziv unutar 10 ms, sa velikim ubrzanjima i usporenjima;

- regulisane frekvencije napona pomoću frekvencijskog pretvarača čime se postiže promena brzine obrtanja, što pridonosi komfornosti pogona;

- smanjen broj ugrađenih mehaničkih delova, čime se povećava pogonska pouzdanost i sigurnost, a održavanje postaje jednostavnije i jeftinije;

- smanjen broj pokretnih delova, a time je intenzitet buke tokom rada u granicama  $\leq 65$  dB.

Predloženo rešenje sa direktnim pogonom zasnovano je na osnovu trenutno dostupnih informacija potkrepljenih tehničkim podacima samostalno konstrukciono oblikovanih i realizovanih direktnih pogona u konkretnim slučajevima primene u tehničkim sistemima.

Međutim nova tehnička rešenja i daljnji razvoj direktnih pogona pogonskih mehanizama lakih šinskih sistema zasniva se na:

- primeni novih konstrukcionih materijala i tehnologija izrade sa ciljem poboljšanja karakteristika i smanjenja proizvodnih troškova;

- novim koncepcijama izvedbi direktnih pogona nastalim iz zahteva potencijalnih kupaca;

- pokušaju standardizacije i unifikacije kako celog sistema tako i delova pogonskog mehanizma u cilju povećanja kvalitete izrade;

- oblikovanju pogonskog mehanizma kao i ostalih elemenata tehničkog sistema primenom savremenih računarskih programa i metoda.

## LITERATURA

- [1] [www.pks.hr/pks014h.htm](http://www.pks.hr/pks014h.htm)
- [2] A. Sedmak, G. Vasić, M. Nikolić i M. Manojlović: Regeneracija železničkih šina navarivanjem, Tehnika železničkih vozila, Želnid, Beograd, str. 195-199, 1998.
- [3] I. Hlavaty, Z. Kübel: Resurfacing rails by submerged arc welding without preheating, ZVARANIE, No. 5-6, pp. 105-108, 2002.
- [4] M. Popescu: Reabilitarea "in situ" a elementelor de infrastructură la căile de transport urban, Contract AMTRANS, Raport de cercetare, 2003. – 2005.
- [5] J. Tepić: Šinska vozila, Edicija tehničke nauke – udžbenici, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2007.
- [6] D. Zimmer, J. Böcker, A. Schmidt, B. Schultz: Direktantriebe passend ausgewählt, Antriebstechnik, Vol. 2/2005, S. 40-45, 2005.
- [7] J. Gißler: Elektrische Direktantriebe-Vortile Direktantriebstechnik praktisch nutzen, Franzis Verlag, ISBN 3-7723-5007-0, 2005.
- [8] Siemens Linear Motor System GmbH & Co. KG, Munich Germany, [www.siemens.de](http://www.siemens.de)
- [9] A. Storath: Wenn Hohlheit bei Technikern gefragt ist-Torque motoren sorgen für hohe Drehmomente bei klein Drehzahl, Siemens AG-A & D MC EWN Bad Neustadt, 2002.
- [10] R. Leicht: Reliability Analysis for Engineers-An Introduction, Oxford scientific Publications, Oxford University Press, 1995.
- [11] H. Kurtović: Osnovi tehničke akustike, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [12] N. Perić: Digital Measurement of Angular Speed, Automatika, Vol. 31, No. 3-4, pp. 123-128, 1990.
- [13] J. Deur, A. Božić, N. Perić: Control of Electric Drives with Elastic Transmission, Friction, and Backlash-Experimental System, Automatika, Vol. 40, No. 3-4, pp. 129-137, 1999.
- [14] Built-in Torque Motors 1FW6, Simodrive Planning Guide, Siemens AG, Germany, May 2003.

## METHODS FOR REDUCED TRACK WEAR IN LIGHT RAIL VEHICLES

**Abstract:** Track wear has an important impact on cost of maintenance and lifespan of tracks for light rail vehicles. Together with already known methods of track replacement and layering of metal by welding, positive effects can be accomplished by using direct pulling engines. Characteristics of synchronous engines with high momentum, powered by permanent magnets, are much more suitable than those of electromotor engines with transfer mechanism. It is important to stress high momentum for small number of rotations, high strain under such a momentum, high level of productivity, smaller mass and assembly area, rapid dynamic response with high accelerations and decelerations, reduced number of mechanical assembly parts, reduced noise intensity, high reliability and safety of engines.

**Keywords:** light rail vehicle, track wear, direct drive, torque motor, characteristics driv