



Eltrac

Napredni elektromotorni pogoni za primjene u vuči

Nositelj projekta

Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

Ovaj projekt je financirala Hrvatska zaklada za znanost pod brojem IP-11-2013-7801

NAZIV PROJEKTA: NAPREDNI ELEKTROMOTORNI POGONI ZA PRIMJENE U VUČI

NAZIV PROJEKTA NA ENGLISKOM: ADVANCED ELECTRIC DRIVES FOR TRACTION APPLICATIONS (ELTRAC)

VODITELJ: Prof. dr. sc. DAMIR ŽARKO

KORISNIK: SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

VRIJEDNOST: 971.500,00 kn

UGOVORNO TIJELO: HRVATSKA ZAKLADA ZA ZNANOST

TRAJANJE: 1.10.2014 – 30.9.2018.

WEB STRANICA: <https://eltrac.fer.hr/>

KONTAKT: Prof. dr. sc. Damir Žarko
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska
e-mail: damir.zarko@fer.hr
Tel: 01 6129 706

PROJEKTI TIM:

Prof. dr. sc. Željko Jakopović
Prof. dr. sc. Fetah Kolonić
Prof. dr. sc. Zlatko Maljković
Prof. dr. sc. Viktor Šunde
Izv. prof. dr. sc. Mario Vražić
dr. sc. Neven Čobanov
dr. sc. Šandor Ileš
dr. sc. Ivan Mrčela

Doc. dr. sc. Stjepan Stipetić
dr. sc. Zlatko Hanić
dr. sc. Marinko Kovačić
Tanja Poljugan, dipl. ing.
Goran Rovišan, dipl. ing.
dr. sc. Ana Hanić
Tino Jerčić, mag. ing.

SAŽETAK

Razvoj učinkovitijih prijevoznih sredstava i smanjenje njihovog utjecaja na okoliš u okviru je energetske politike Europske unije. Elektrifikacija prijevoznih sredstava i poticanje sve većeg korištenja željeznica za prijevoza tereta su neki od ključnih elemenata za sveukupno povećanje energetske učinkovitosti u prometu i smanjenje emisije stakleničkih plinova.

Projekt stavlja naglasak na razvoj naprednih elektromotornih pogona za primjenu u vuči za prijevoz putnika i tereta. Tradicionalni pristup projektiranju elektromotornih pogona stavlja naglasak na neovisno projektiranje svake pojedinačne komponente pogona, ne uzimajući u obzir njihovu međusobnu interakciju i na taj način onemogućava ostvarivanje optimalnih performansi cijelog pogonskog sustava.

Glavni cilj projekta je poboljšati pristup projektiranju elektromotornih pogona za primjene u vuči na način da se projektiranju komponenta pristupi sinergijski i upotrijebe napredni algoritmi upravljanja. Na taj način bi se poboljšale performanse i učinkovitost sustava i smanjili troškovi tijekom životnog ciklusa vozila.

Navedeni cilj postignut je kroz:

- Razvoj programskih alata za računalom podržano projektiranje komponenta elektromotornog pogona za primjenu u vuči korištenjem multifizikalnog pristupa (engl. multiphysical approach) uzimajući u obzir utjecaj pojedinih komponenta na sustav u cjelini,
- Razvoj različitih topologija učinkog pretvarača za primjenu u vuči u svrhu evaluacije raznih metoda modulacije i upravljanja,
- Izradu programskog okruženja za simulaciju dinamičkog vladanja sustava vuče koji objedinjuje kompleksne nelinearne modele komponenta sustava s modelima upravljačkih algoritama i dinamikom vozila,
- Razvoj upravljačkog sustava elektromotornog pogona temeljenog na modelskom prediktivnom upravljanju koje osigurava najveću korisnost sustava tijekom cijelog voznog ciklusa vučnog vozila,
- Eksperimentalno testiranje razvijenih algoritama na laboratorijskom modelu vučnog sustava.

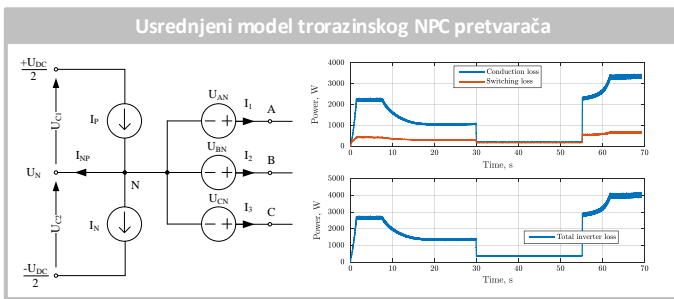
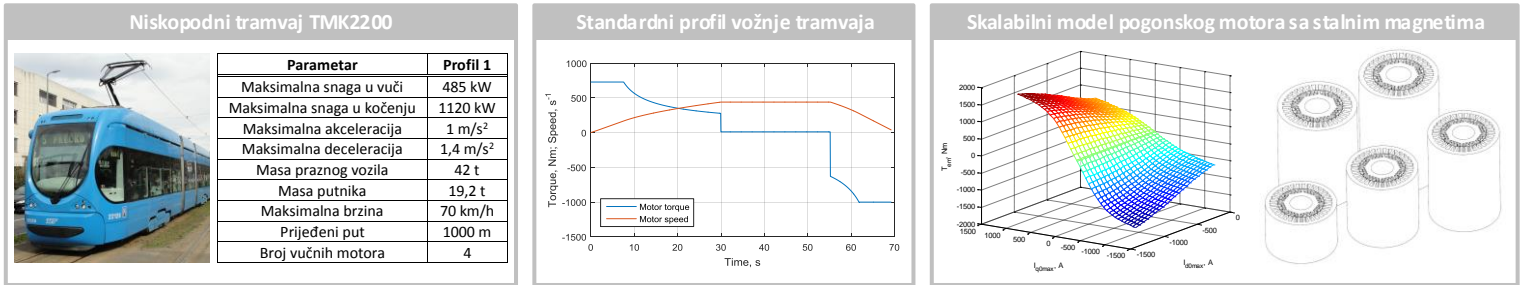
VIŠKRITERIJSKA OPTIMIZACIJA POGONSKOG SUSTAVA TRAČNIČKOG VOZILA

Glavne komponente elektromotornih pogona tračničkih vozila su elektromotor, učinski pretvarač, transformator i sustav upravljanja. Pod pojmom optimiranja pogona u cjelini smatra se određivanje vanjskih karakteristika svake pojedine komponente na način da se postigne optimalnost pogona s obzirom na funkcije ograničenja te jednu ili više funkcija cilja.

Funkcije ograničenja obuhvaćaju sva fizikalna i tehnička ograničenja koja proizlaze iz karakteristika materijala od kojih su izrađene komponente pogona (npr. krivulja magnetiziranja magnetskih limova, toplinske klase trajnih magneta i izolacijskih materijala), ograničenja zbog primjene međunarodnih normi (npr. IEC norme) te specifičnih zahtjeva vozila (npr. profil vožnje, maksimalni osovinski pritisak ili raspoloživi prostor za smještaj motora i pretvarača).

Funkcije cilja predstavljaju izlazne karakteristike pogona (npr. masa pogona, ukupna cijena ili ukupni gubici energije) za koje se postupkom optimiranja želi postići minimalna ili maksimalna vrijednost.

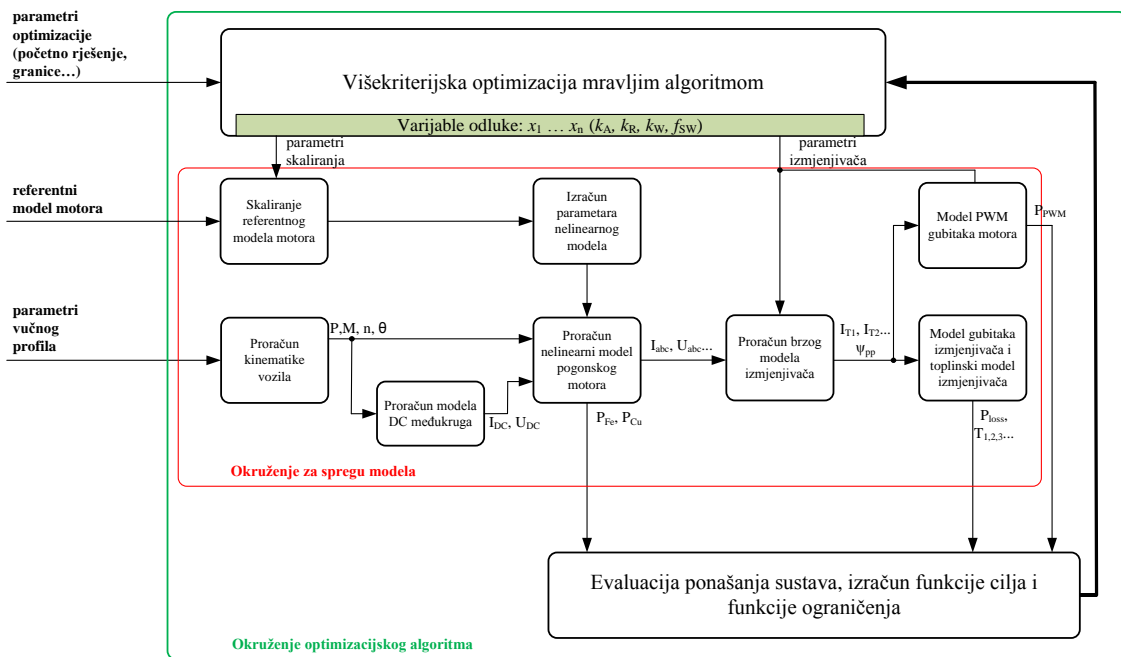
U sklopu projekta ELTRAC u programskom sustavu MATLAB razvijen je programski kod za višeciljno Pareto optimiranje pogona niskopodnog tramvaja primjenom algoritma MIDACO (Mixed Integer Distributed Ant Colony Optimization).



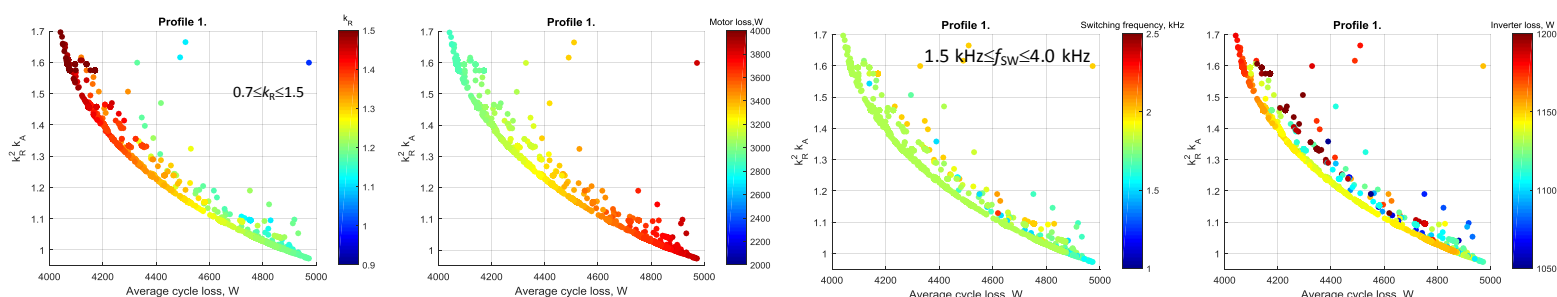
Postavke optimizacije pogona niskopodnog tramvaja

Funkcije cilja	normirani volumen pogonskog motora $(k_R)^2 k_A$ srednji gubici motora i izmjenjivača na jednom standardnom ciklusu vožnje P_{sr}
Ograničenja nejednakosti	gubici motora $P_{gm} = (k_R)^2 k_A P_{Fe0} + k_A P_{CuCore} + k_A P_{Cu0EW}$ (skalirani iz referentnog modela) nadtemperatura PN spoja $T_{JCMAX} = 45$ K
Varijable odluke	faktor skaliranja motora u radialnom smjeru k_R - kontinuirana varijabla faktor skaliranja motora u aksijalnom smjeru k_A - kontinuirana varijabla faktor prematanja motora k_W - diskretna varijabla frekvencija skapanja izmjenjivača f_{sw} - kontinuirana varijabla

Blok shema softvera za optimizaciju pogona električnog tramvaja



Pareto fronte optimalnih rješenja



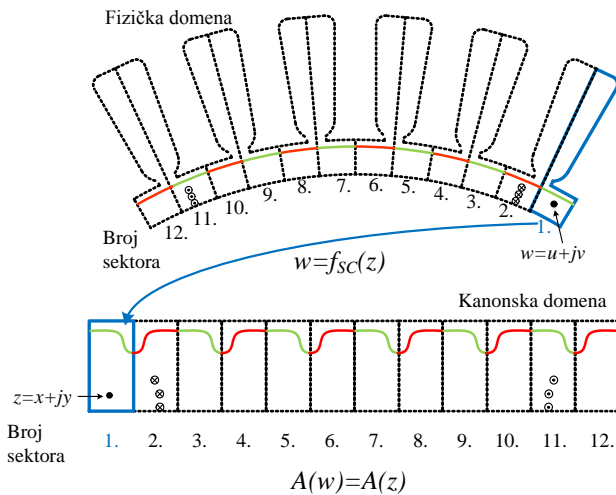
MODELIRANJE ZASIĆENIH SINKRONIH STROJEVA S POVRŠINSKIM TRAJNIM MAGNETIMA PRIMJENOM KONFORMNOGA PRESLIKAVANJA I MAGNETSKIH EKVALENTNIH KRUGOVA

Analički i kombinirani analitičko-numerički modeli električnih strojeva omogućuju brze proračune i pogodni su za korištenje kod optimiranja dizajna stroja. Razvijena je iterativna metoda za proračun magnetskog polja u zračnom rasporu zasićenih sinkronih strojeva s površinskim trajnim magnetima bazirana na analitičko-numeričkom modelu. U proračune su uzeti u obzir nazubljeni stator, zasićenje željezne jezgre i promjena zasićenja s položajem rotora te lokalna promjena magnetizacije magneta zbog utjecaja vanjskog magnetskog polja u zračnom rasporu. Metoda koristi novi pristup u kombiniranju konformnih preslikavanja i magnetskih ekvivalentnih krugova te je implementirana za proračun strojeva s razlomljenim i cjelobrojnim namotom.

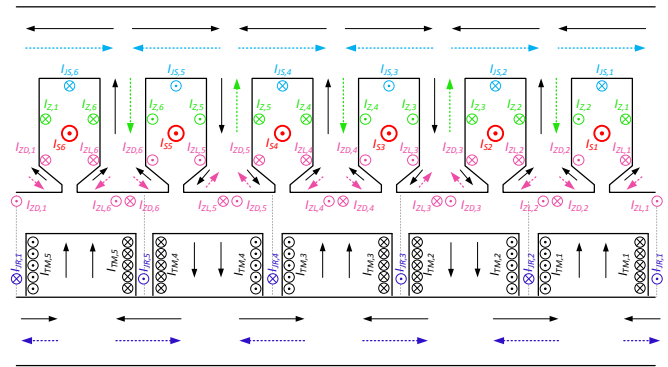
Metoda za proračun implementirana je na nekoliko primjera strojeva s površinskim trajnim magnetima s različitim razinama zasićenja u dijelovima magnetskog kruga. Za stanje praznog hoda i nazivno opterećenje provedeni su proračuni valnih oblika indukcije u zračnom rasporu, momenta i napona. Predstavljen je iteracijski postupak proračuna induktiviteta i ulančenih tokova magneta metodom smrznutih permeabilnosti te proračun gubitaka u bakru, željezu i magnetima. U svrhu verifikacije metode svi dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima tranzijentnih simulacija metodom konačnih elemenata.

Metoda za proračun magnetskog polja

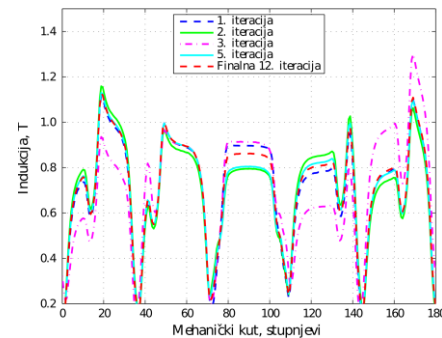
Za proračun magnetskog polja u zračnom rasporu koristi se konformno preslikavanje analitičkog rješenja za glatku kružnu domenu u nazubljeni zračni raspor. Razvijena je metoda za računalno učinkovitu transformaciju kompleksne nazubljene domene pomoću transformacije jedne polovice utorskog koraka zračnog raspora.



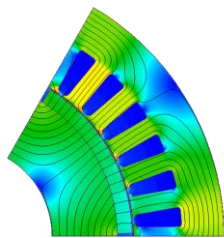
Geometrija stroja podijeljena je u niz poddomena. Promjena magnetizacije željeza uzrokovana zasićenjem modelirana je točkastim strujnim izvorima smještenima u zračnom rasporu i utorima stroja. Dodane strujnice imaju jednaki utjecaj na magnetsko polje u zračnom rasporu kao i padovi magnetskog napona iznosa jednakih strujama točkastih izvora na materijalu konačne permeabilnosti koji se nalazi izvan granica zračnog raspora.



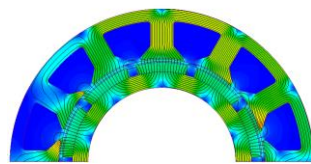
Strujnice kojima se opisuje efekt magnetskog zasićenja u željezu stroja imaju utjecaj na iznos i valni oblik magnetskog toka u zračnom rasporu, a zatim i na iznos promijenjenog magnetskog toka te iznos magnetskog pada napona na željezu kojim se opisuje efekt zasićenja pa je proračun potrebno provesti iteracijski. Iteracijski proračun provodi se dok razlika vektorskih magnetskih potencijala u dva uzastopna iteracijska koraka ne bude manja od unaprijed definirane vrijednosti.



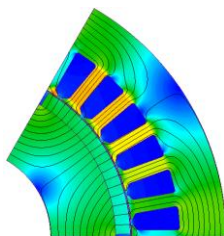
Metoda je implementirana za različite topologije strojeva



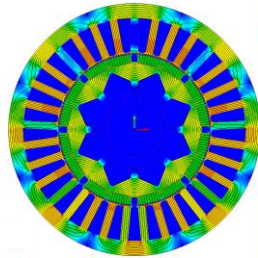
36 utora i 6 polova s dominantno zasićenim jarmom



12 utora i 10 polova s razlomljenim koncentriranim namotom



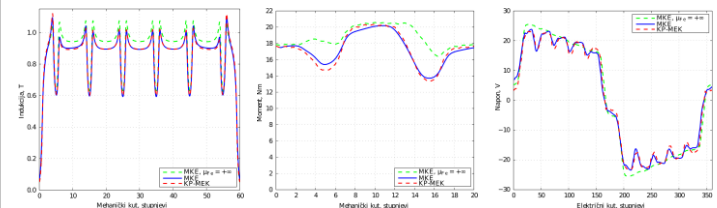
36 utora i 6 polova s dominantno zasićenim zubima



33 utora i 8 polova s razlomljenim distribuiranim namotom

Usporedba rezultata proračuna za SPM 36/6

Usporedba s metodom konačnih elemenata za valne oblike indukcije praznog hoda u zračnom rasporu, momente i napone za nazivnu radnu točku za stroj s 36 utora i 6 polova s dominantno zasićenim zubima



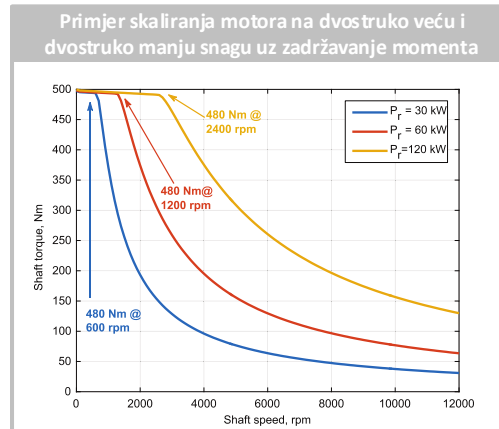
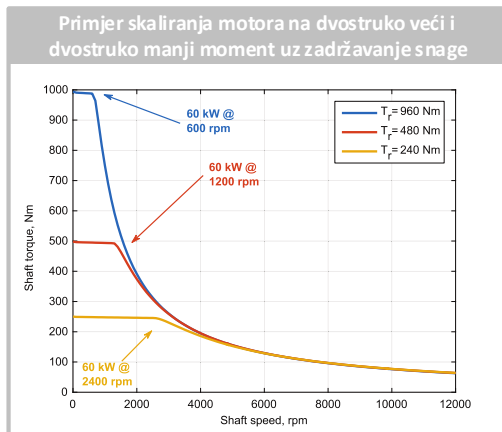
Usporedba gubitaka u magnetima i željezu te usporedba induktiviteta i ulančenih tokova

		P_{PM2} , W	P_{Fe2} , W
Prazni hod	MKE	29,71	272,49
	KP-MEK	22,65	277,34
Nazivna radna točka	MKE	56,12	284,33
	KP-MEK	51,30	290,77

		L_d	L_q	L_{dq}	Ψ_{PM2}	Ψ_{Fe2}
Prazni hod	MKE	0,2325	0,2361	-1,36E-06	0,8846	-5,10E-05
	KP-MEK	0,2305	0,2335	-1,87E-07	0,8694	-3,25E-06
	MKE, $\mu_r = \infty$	0,2492	0,2492	0	0,9422	0
Nazivna radna točka	MKE	0,2313	0,2345	-7,07E-03	0,8748	-3,85E-02
	KP-MEK	0,2282	0,2291	-9,93E-03	0,8559	-6,14E-02
	MKE, $\mu_r = \infty$	0,2492	0,2492	0	0,9422	0

Mape korisnosti često se koriste za vizualizaciju performansi električnog vučnog motora ili za opisanje električnog motora u programskim alatima za proračun električnih vučnih sustava. Glavni motiv ovog istraživanja bio je pronalazak brzog i točnog načina generiranja mapa korisnosti za skalirane verzije postojećeg, referentnog motora koji ima poznate dimenzije i parametre. Sinkroni stroj s trajnim magnetima može se modelirati koristeći nelinearno mapiranje tokova i gubitaka u ovisnosti o komponentama vektora struje u $d-q$ koordinatnom sustavu. Povezivanjem tog modela sa zakonima skaliranja za strojeve s trajnim magnetima moguće je brzo i točno proračunati mape korisnosti, tj. mape gubitaka te analizirati potrošnju energije po ciklusima vožnje. Istraživanje je pokazalo kako skalabilni model rezultira uštedom računalnih resursa pri proračunu mapa korisnosti skaliranih strojeva uz zanemariv utjecaj na točnost. Glavna prednost ovakvog pristupa je mogućnost brzog proračuna više puta uzastopno, što je primjerice primjenjivo kada se želi minimizirati volumen ili masa stroja unutar optimizacijskog postupka.

Optimizacija se temelji na korištenju referentnog motora poznate geometrije i performansi. Za taj motor potrebno je napraviti model temeljen na mapiranju ulančenih tokova i gubitaka. Faktori skaliranja k_A , k_R i k_W omogućuju brzi izračun performansi motora koji je smanjen / povećan u aksijalnom ili radijalnom smjeru te ujedno ima i premotan namot (promijenjen broj zavoja i paralelnih grana kako bi se prilagodio naponu napajanja). Za daća optimizacijskog procesa je pronaći kombinaciju parametara k_A , k_R i k_W koja primjerice maksimizira učinkovitost stroja na zadanom ciklusu vožnje. Optimizacijski proces je vrlo brz jer ne sadrži računalno zahtjevan proračun performansi stroja metodom konačnih elemenata već primjenjuje vrlo brzi izračun temeljen na zakonima skaliranja. Dimenzije optimalnog stroja i parametri namota dobiju se linearnim skaliranjem radijalnih odnosno aksijalnih dimenzija te promjenom broja zavoja spojenih u seriju sukladno optimalnoj kombinaciji parametara k_A , k_R i k_W .

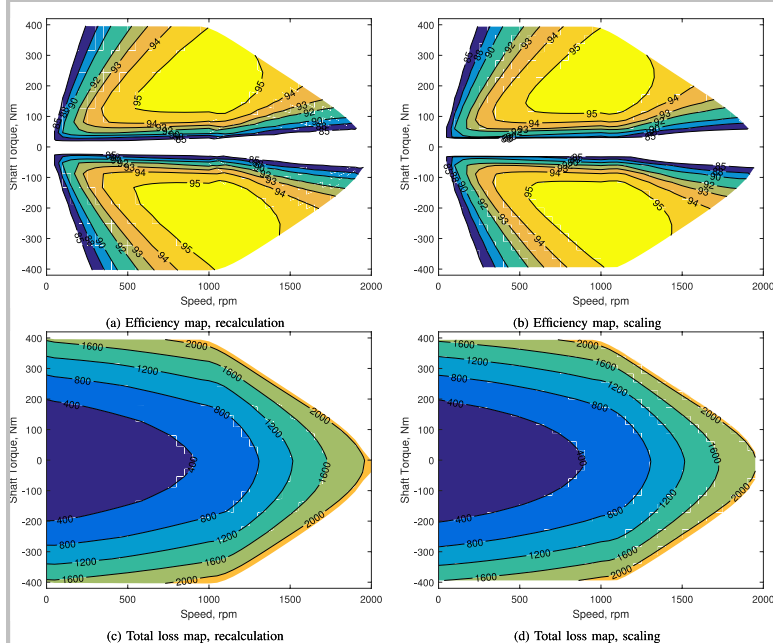
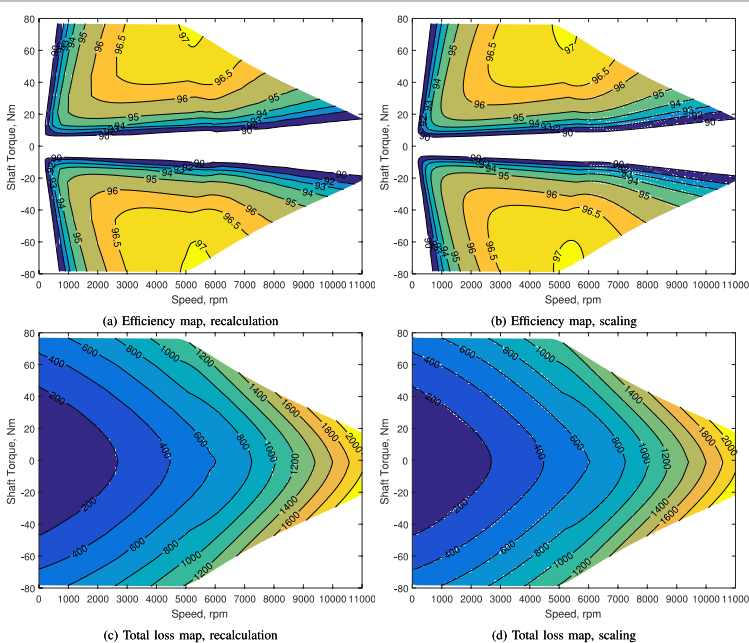


Usporedba ponovnog proračunavanja i primjene skalabilnog modela		
	Proračun mapa ulančenih tokova i gubitaka	Proračun mape korisnosti
1. PRIMJER		
Ponovni proračun	180 s	15 s
Skalabilni model	0 s	15 s
2. PRIMJER		
Ponovni proračun	203 s	14 s
Skalabilni model	0 s	14 s

Odstupanja skalabilnog modela u odnosu na referentni postupak ponovnog proračuna				
	Korisnost	Ukupni gubici	Napon	Kut vektora struje
1. PRIMJER				
Srednje odstupanje, %	0,16	1,06	0,03	0,03
Max. odstupanje, %	5,99	5,88	5,15	1,33
2. PRIMJER				
Srednje odstupanje, %	0,23	1,17	0,01	0,14
Max. odstupanje, %	5,45	5,02	4,73	5,76

1. PRIMJER: Usporedba mapa korisnosti i mapa gubitaka u motorskom i generatorskom području za slučaj ponovnog proračuna modela ulančenih tokova i gubitaka [a, c] i za slučaj primjene predloženog skalabilnog modela [b, d]. Prije skaliranja, motor je proizvodio 65 kW (120 Nm pri 5150 min⁻¹) uz 6 zavoja po svitku. Skalirani motor ima 38 kW (77 Nm pri 4700 min⁻¹) uz 9 zavoja po svitku.

2. PRIMJER: Usporedba mapa korisnosti i mapa gubitaka u motorskom i generatorskom području za slučaj ponovnog proračuna modela ulančenih tokova i gubitaka [a, c] i za slučaj primjene predloženog skalabilnog modela [b, d]. Prije skaliranja, motor je proizvodio 42 kW (270 Nm pri 1500 min⁻¹) uz 6 zavoja po svitku. Skalirani motor ima 40 kW (394 Nm pri 950 min⁻¹) uz 9 zavoja po svitku.

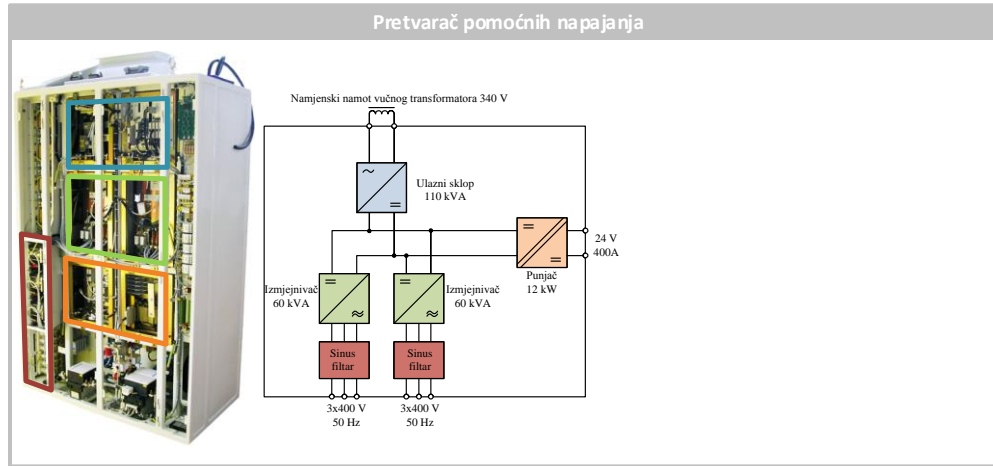


U svrhu evaluacije višerazinskih topologija razvijena je nova metoda optimiranja pretvarača pomoćnih napajanja za tračnička vozila. Metoda implicira pretvarač kao cjelinu sastavljenu od izmjenjivača i izlaznog filtra uzimajući u obzir njihove međusobne uzročno-posljedične veze.

Za potrebe višekriterijske optimizacije pretvarača izrađeni su računalno nezahtjevni modeli izmjenjivača i filtra. Ubrzanje izračuna strujno-naponskih odnosa unutar izmjenjivača i filtra postignuto je spajanjem fazorskog modela, usrednjenog modela i sklopnog modela u tzv. hibridni model. U ovaj model uključena je i nelinearnost magnetskog materijala jezgre prigušnice filtra. Izlaz hibridnog modela koristi se za proračune gu bitaka u izmjenjivaču i filtru koji se potom uvode u toplinski model. Temperature magnetskih i poluvodičkih komponenata postavljene su kao granice.

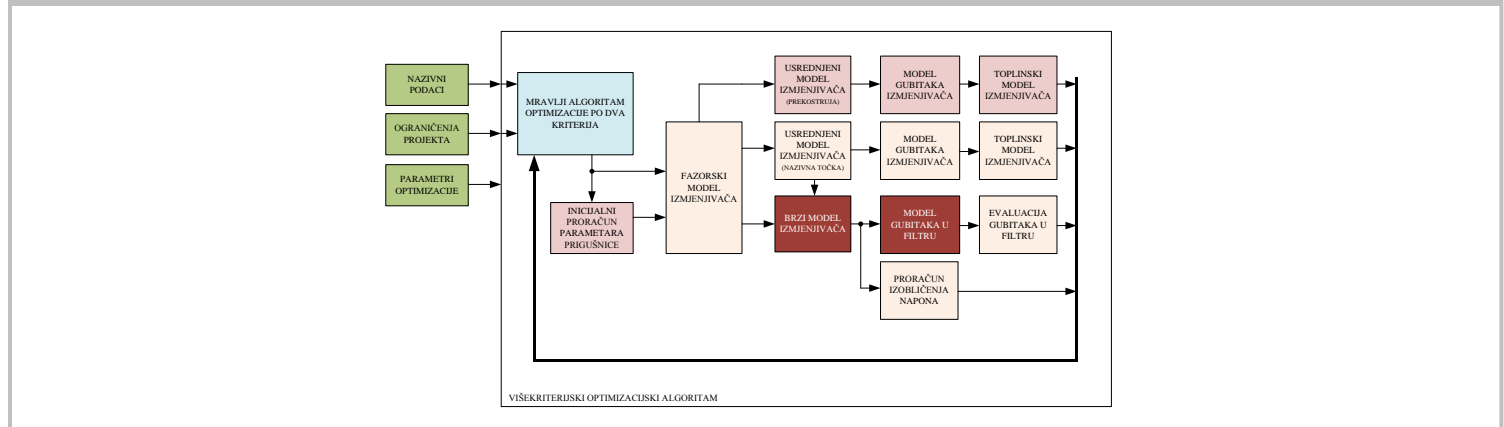
Razvijena optimizacijska metoda kao kriterije koristi volumen izlaznog filtra i ukupne gubitke pretvarača. Za rješavanje više kriterijskog optimizacijskog problema s mješovito cjelobrojnim varijablama odluke prethodno je modificiran metaheuristički optimizacijski algoritam koloni je mrava (MIDACO).

Prema jednom od rješenja optimizacije izrađen je prototip pretvarača pomoćnih napajanja s trorazinskim izmjenjivačem T-tipa. Kako bi se potvrdili u radu postavljeni modeli, na prototipu su napravljena detaljna ispitivanja gubitaka u filtru i izmjenjivaču.



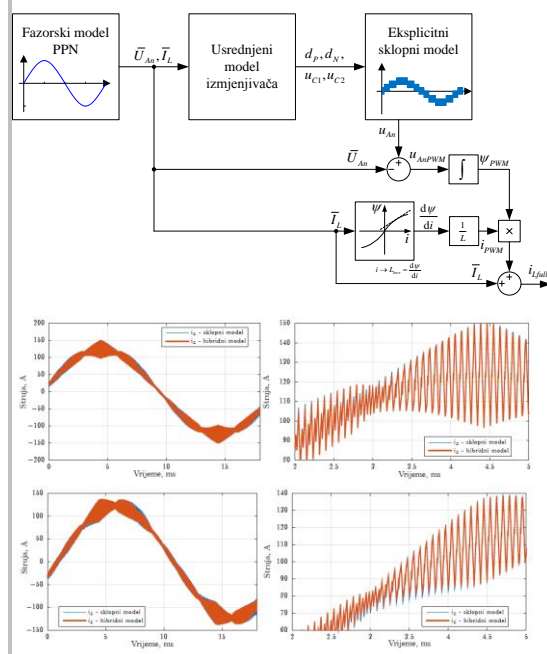
Parametar	Dvorazinski	Trorazinski
IGBT modul	Semikron SKM300GB12T4	Mitsubishi (Powerex) CM400ST_24S1
Opterećenje	86 A @ 0.9ind	86 A @ 0.9ind
Strujna klasa	300 A	400A
Topologija	dvorazinski	Trorazinski
Induktivitet	2x400 μH	1x108 μH
Kapacitet	3x4,7 μF	1x5 μF
Gubici inverter	657 W	835 W
Gubici filter	428 W	156 W
Ukupni gubici	1085 W	991 W
Masa filtra	33 kg	9 kg
Volumen filtra	7652 cm ³	2186 cm ³
Maks. T @200A	21,75 K	16,04 K
Sklopna frek.	4 kHz	12,150 kHz
η, @ 54 kW	98,0%	98,2%

Višekriterijska optimizacija pretvarača pomoćnih napajanja

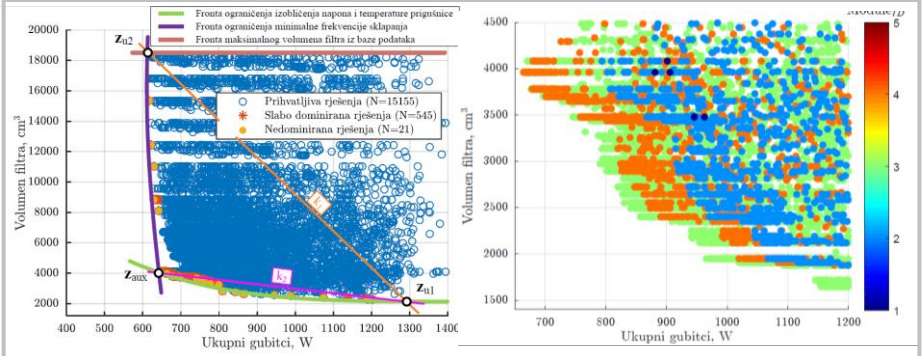


Računalno nezahtjevni hibridni model pretvarača

Hibridni model pretvarača napajanja je za tri reda vrijednosti brži od klasičnog sklopnog modela.



Rezultati optimizacije



Laboratorijski prototip pretvarača pomoćnih napajanja

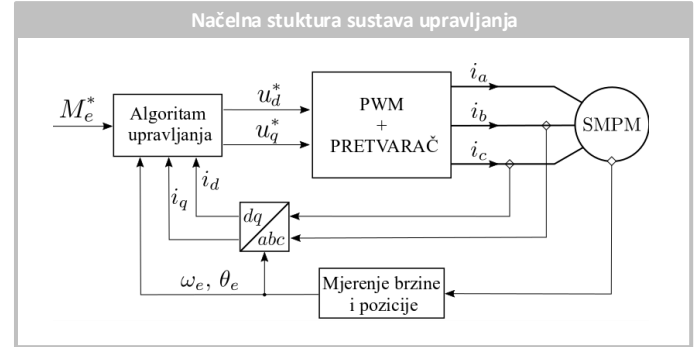
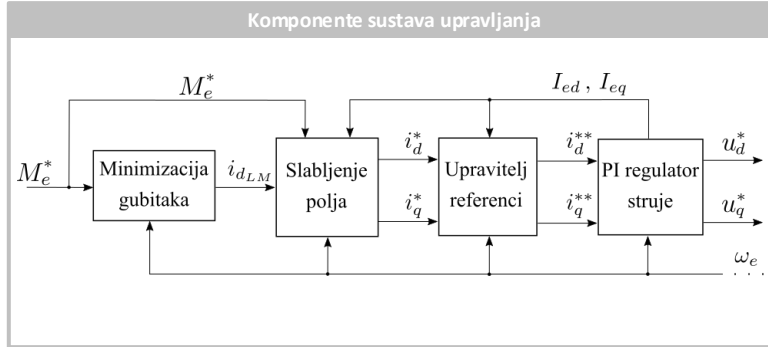


PREDIKTIVNO UPRAVLJANJE SINKRONIM MOTOROM S UNUTARNJIM TRAJNIM MAGNETIMA S CILJEM MINIMIZIRANJA ELEKTROMAGNETSKIH GUBITAKA

U električnoj vuči glavni cilj sustava upravljanja pogonskim strojem je osigurati brzo slijeđenje referentnog momenta koji vozač zadaje djelovanjem na polugu gasa, uz minimalne gubitke u stacionarnom stanju i uz poštovanje fizikalnih ograničenja (poglavito ograničenja napona). U tu svrhu razvijen je algoritam prediktivnog upravljanja kao nadgradnja klasične strukture upravljanja zasnovane na orijentaciji vektorskoga toka s proporcionalno-integralnim regulatorima struje.

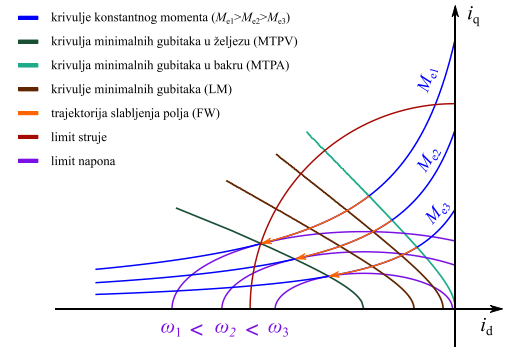
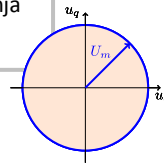
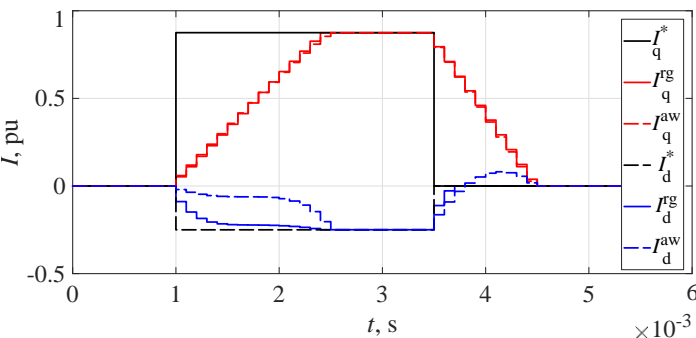
Strategija upravljanja može se podijeliti u tri segmenta:

- 1) Algoritam za pronalaženje optimalnog vektora struje u dq sustavu koji minimizira gubitke u namotu i/li željezu u stacionarnom stanju
- 2) Algoritam slabljenja polja koji osigurava da je ograničenje napona zadovoljeno u stacionarnom stanju
- 3) Algoritam upravljanja odgovoran za praćenje referentne trajektorije struje.



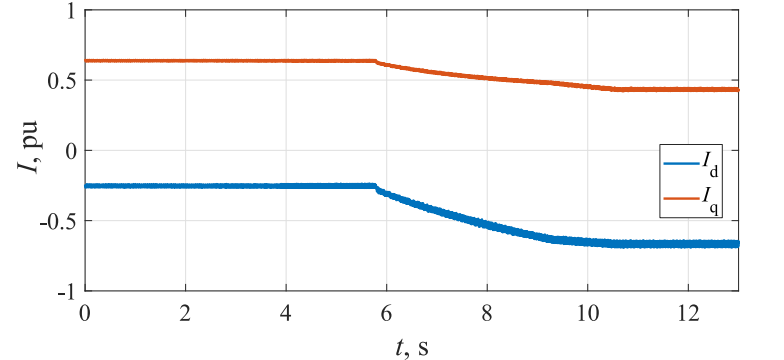
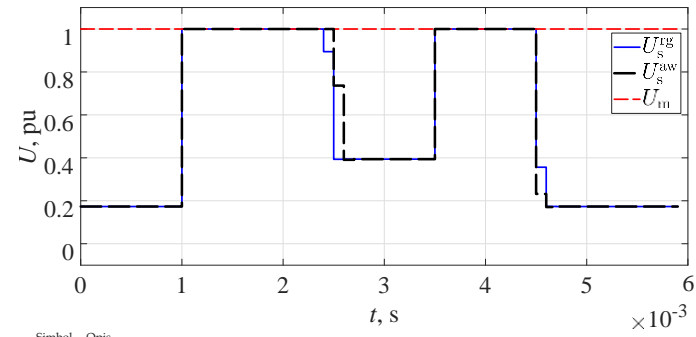
Ograničenje napona u dq koordinatnom sustavu

Algoritam upravljanja u svakom koraku mora zadovoljiti ograničenja napona.



Prediktivno slabljenje polja

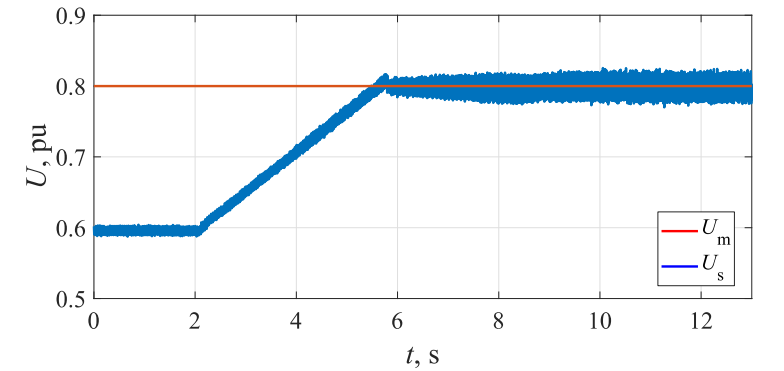
Kako bi se osiguralo zadovoljenje ograničenja napona tijekom prijelazne pojave, koristi se predikcija jedan korak unaprijed i mijenja se referenca struje u svakom koraku. Rješenje problema slabljenja polja nalazi se rješavanjem optimizacijskog problema.



Prediktivni upravitelj referenci

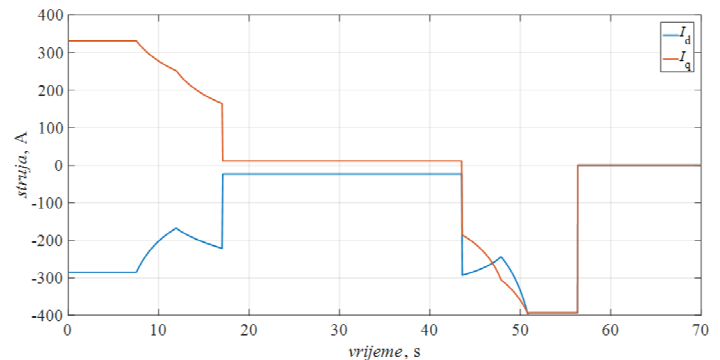
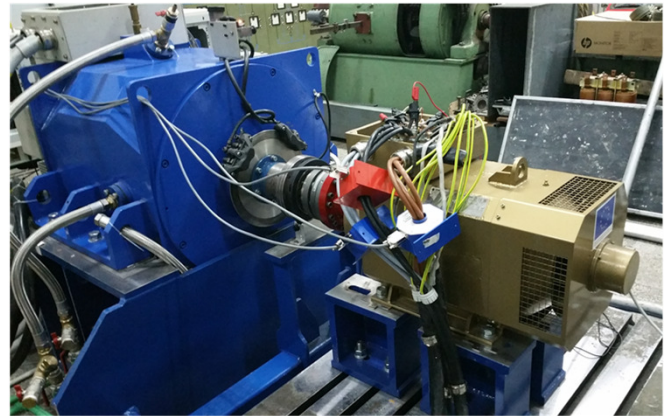
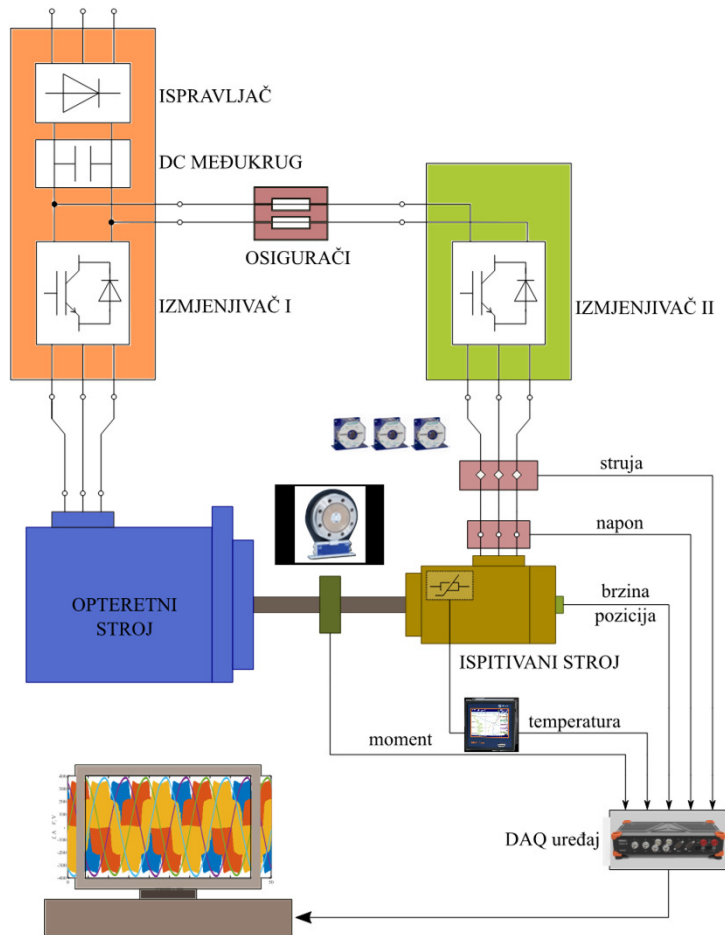
U svakom koraku cilj je pronaći referentnu vrijednost $v(k)$ najbližu željenoj $r(k)$ tako da ograničenja budu zadovoljena tijekom prijelazne pojave.

Kako bi se zadovoljila ograničenja u svakom koraku, koristi se skup koji predstavlja stanja konstantnih referenci sustava za koje su zadovoljena ograničenja u svakom koraku

$$\mathcal{O}_\infty = \{(\bar{v}, x(k)) : y(k+j) \in \mathcal{Y}, (\bar{v}, x(k+j)) \in \mathcal{O}_\infty, v(k+j) = \bar{v}, j \in \mathbb{Z}_+\}$$


Ispitivanje električnih strojeva projektiranih za primjenu u vuči često nije moguće u stvarnim uvjetima, a osobito u fazi razvoja pogonskog sustava vozila. Vučni motori izloženi su promjenjivom zakretnom momentu i brzini u motorskom i generatorskom režimu rada te se ne mogu ispitivati u klasičnom smislu uz konstantan teret i brzinu vrtnje. Potrebni zakretni moment motora za određeni profil brzine treba odrediti rješavanjem kinematike vozila koristeći njegovu ukupnu masu i izračunatu ili izmjerenu silu otpora. Isti profil brzine i okretnog momenta potrebno je postići i pri ispitivanju kako bi se odredila karakteristika vučnog motora ili cijelog vučnog pogona.

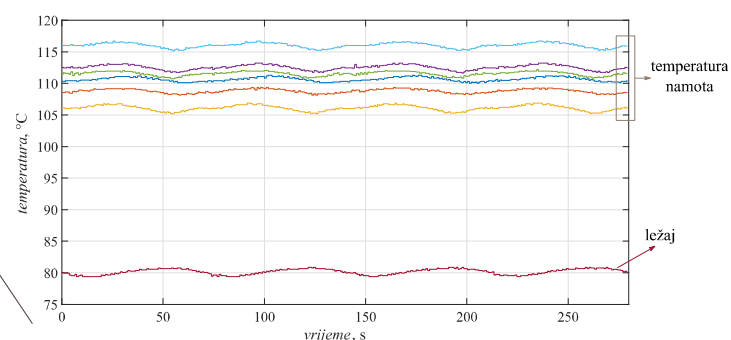
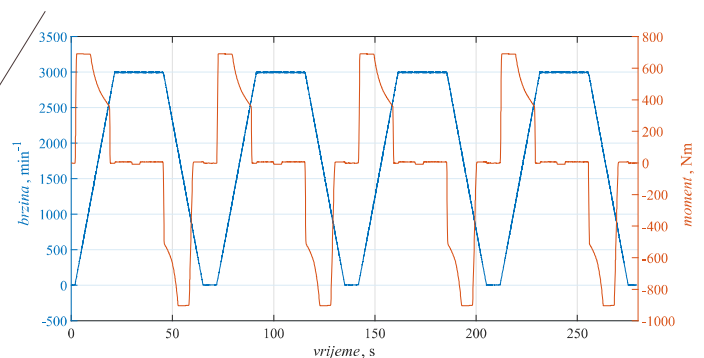
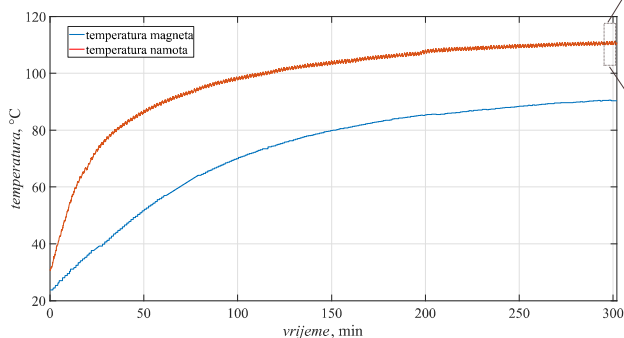
Glavne komponente razvijenog laboratorijskog modela uključuju ispitivani motor, opteretni motor, pretvarače te mjerni sustav. Opteretni stroj ne može osigurati stvarnu inerciju vozila, odnosno realan odziv brzine na referentni moment ispitivanog stroja. Problem simulacije stvarnog profila vožnje rješava se upravljanjem opterećenog stroja u zatvorenom krugu upravljanja brzinom s referentnom vrijednošću koja je sinkronizirana s referentnim momentom prema unaprijed određenom ciklusu vožnje. Ispitivani stroj upravlja se zadavanjem referentne vrijednosti momenta, koja se u zatvorenom krugu upravljanja strujom stroja pretvara u referentne vrijednosti struje u dq koordinatnom sustavu uporabom preglednih tablica dobivenih mjerenjima.



Tijek ispitivanja

Ciklus vožnje kontinuirano se ponavlja sve dok temperatura ispitivanog stroja ne dosegne stacionarno stanje.

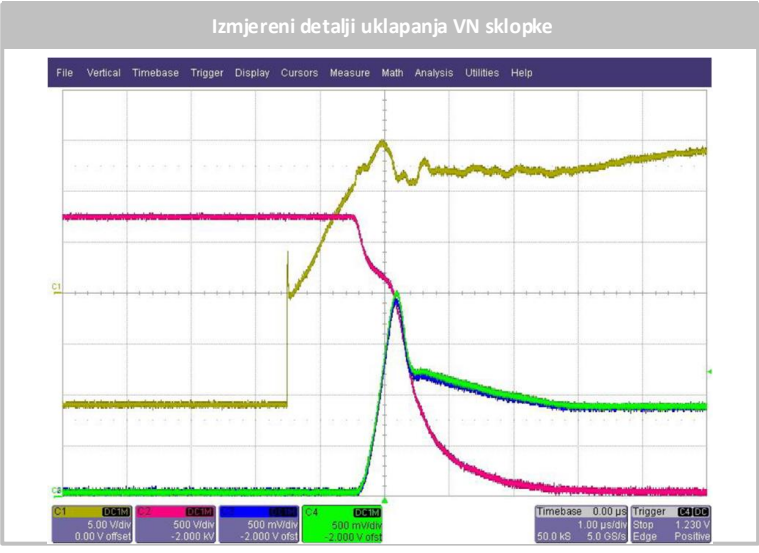
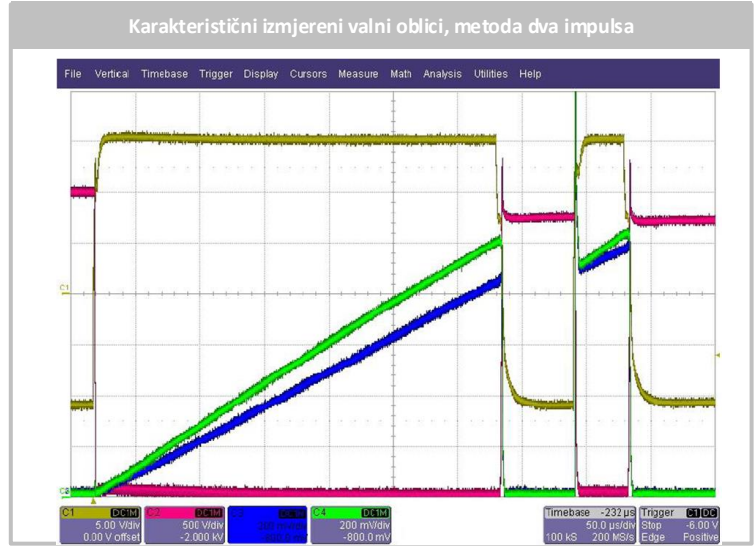
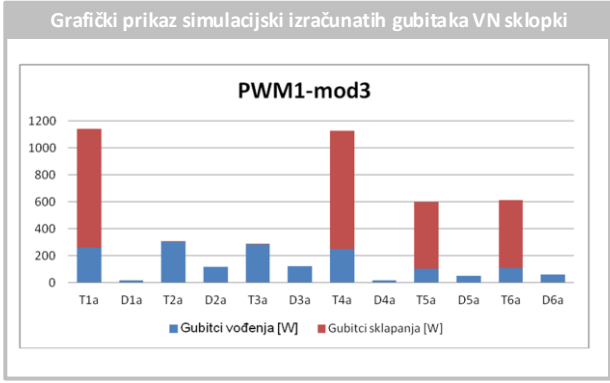
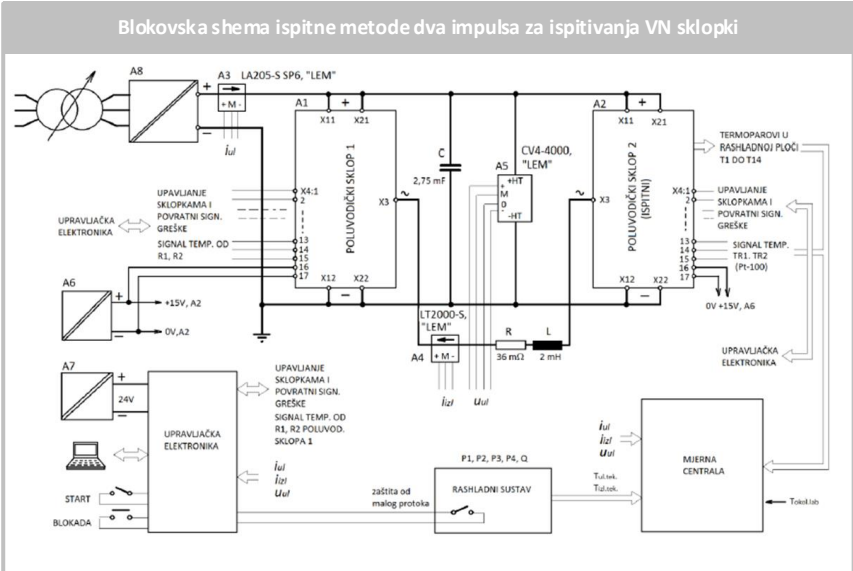
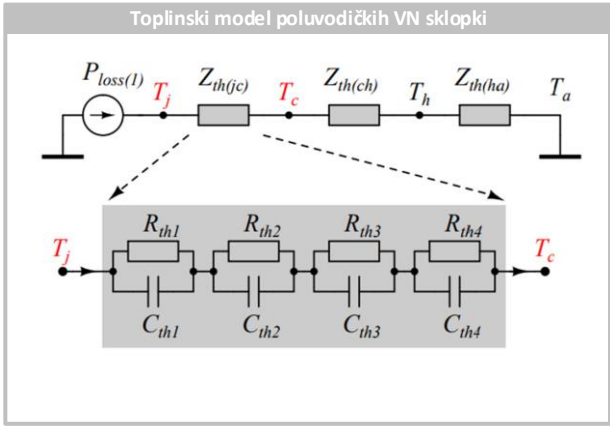
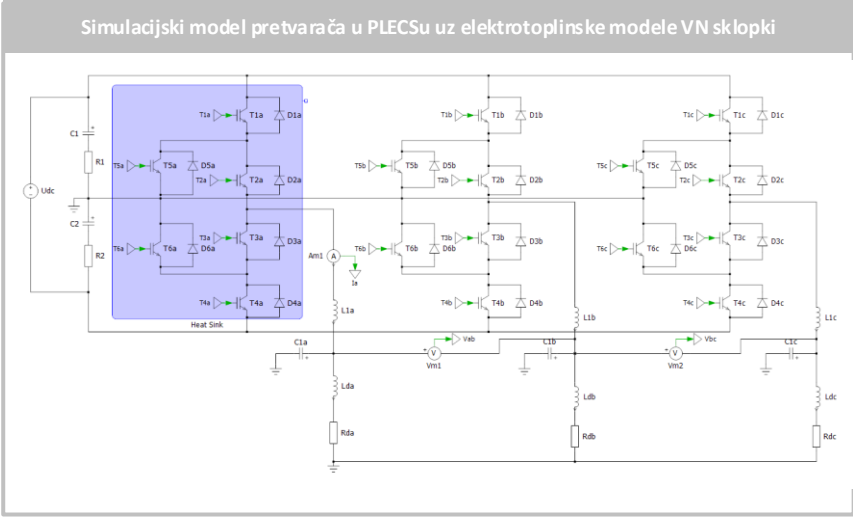
Temperatura namota mjerena je pomoću šest Pt100 sonde ugrađenih u namote i ležajeve ispitivanog stroja. Iz poznate temperature mjerene okoline i iznosa inducirano napona, korištenjem koeficijenta promjene remanencije magneta (N38EH) s povećanjem temperature procijenjena je prosječna temperatura magneta tijekom ispitivanja.



ISPITIVANJE VISOKONAPONSKIH UČINSKIH SKLOPKI DVORAZINSKOG IZMJENJIVAČA

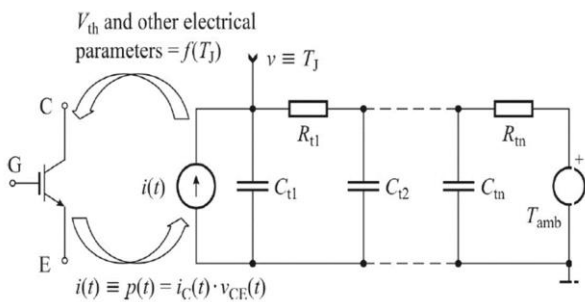
Ispitivanje visokonaponskih učinkovitih IGBT sklopki provedeno je metodama simulacije i mjerenja. Za simulacijsko ispitivanje korišten je programski paket PLECS i topologija aktivnog NPC trirazinskog izmjenjivača s IGBT sklopkama koja se često koristi u visokonaponskim primjenama. Simulacijski model s idealiziranim sklopkama nije koristan za istraživanje mogućnosti programa PLECS. Pomoću njega je dobiven uvid u karakteristične naponsko-strujne odnose u kvarnim režimima rada. U sljedećoj fazi istraživanja uvedena je elektrotoplinski spregnuta simulacija koja je omogućila relativno točno predviđanje gubitaka u učinkovitim visokonaponskim sklopkama ANPC pretvarača.

Eksperimentalna provjera rada visokonaponskih sklopki provedena je na jednom paru sklopki klasičnog dvorazinskog visokonaponskog izmjenjivača. Za eksperimentalnu provjeru odabrani su učinkoviti poluvodički moduli 1200 A / 4,5 kV oznake CM1200HG-90R proizvođača Mitsubishi.

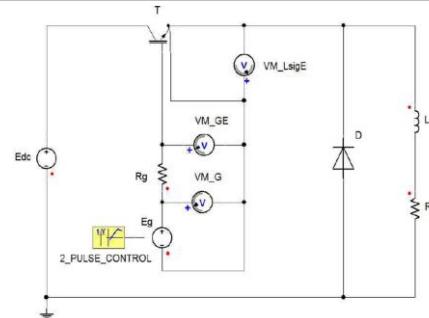


Na temelju analize različitih elektrotoplinskih modela učinkovitih poluvodičkih ventila te različitih temperaturno osjetljivih električnih parametra, kao najpogodniji parametar za mjerenje temperature poluvodiča u stvarnim radnim uvjetima odabran je kvazi-napon praga. Metodom simulacije provjeren je koncept mjerenja. Za uspješnu simulaciju metode kvazi-napona praga potrebno je koristiti softver koji ima mogućnosti elektrotoplinskog modeliranja učinkovitih poluvodičkih ventila, pa je odabran programski paket SIMPLORER. Elektrotoplinska simulacija predstavlja simulaciju pri kojoj se istovremeno provodi simulacija električkog i toplinskog ponašanja poluvodičkog ventila, uz istovremenu razmjenu podataka ta dva sustava. Na temelju informacija dobivenih simulacijskim eksperimentom definiran je koncept mjernog uređaja, prilagođenog pobudnog stupnja IGBT tranzistora, pomoću kojeg se može mjeriti temperatura poluvodičkog ventila u stvarnim radnim uvjetima. U posljednjoj fazi istraživanja izrađen je prototip uređaja za mjerenje temperature poluvodiča u stvarnim radnim uvjetima, te je ugrađen u laboratorijski postav za ispitivanje u stvarnim radnim uvjetima. Provedena mjerenja ukazuju na ispravnost metode.

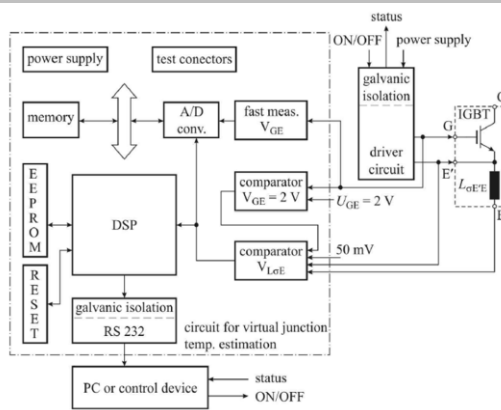
Načelo elektrotoplinskog modeliranja poluvodičkih ventila



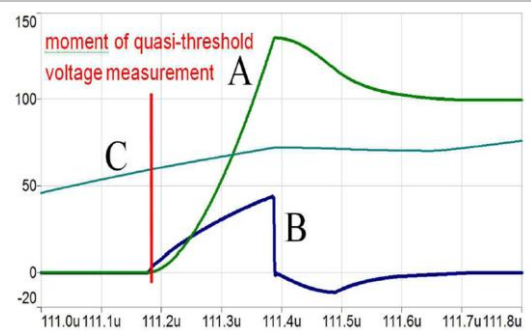
Metoda kvazi-napona praga: simulacijski elektrotoplinski model



Načelna shema uređaja za mjerenje nadtemperature pri stvarnom radu

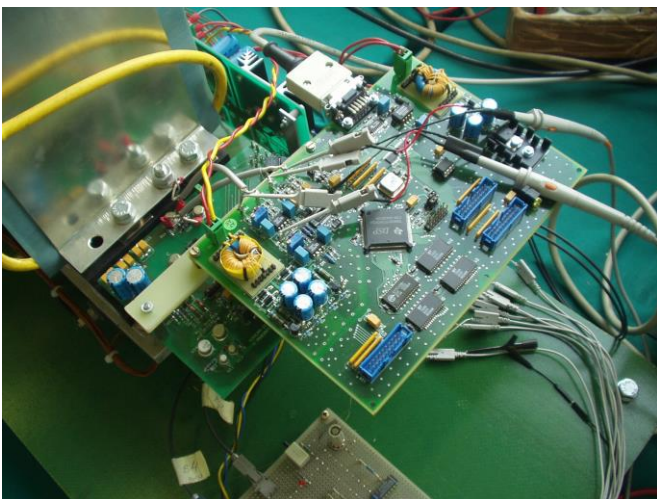


Metoda kvazi-napona praga: simulacija karakterističnih valnih oblika

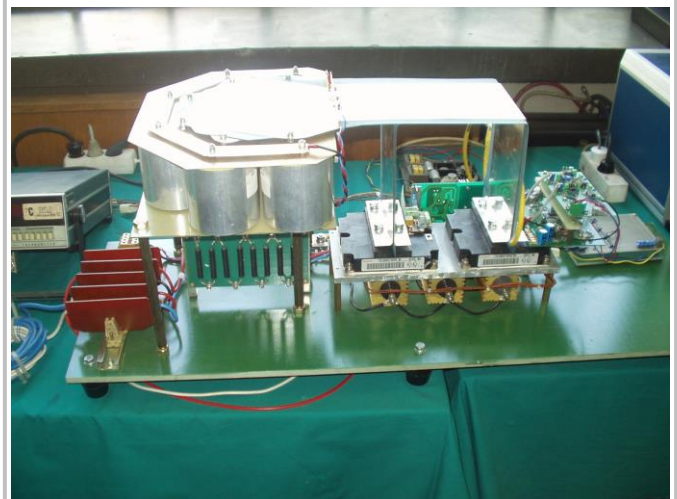


Detaljniji prikaz karakterističnih simuliranih valnih oblika metode kvazi-napona praga
 A – struja kolektora IGBT-a (x 0,1)
 B – paraziti napon V_{LE} (x 10)
 C – napon geita IGBT-a V_{GE} (x 10)

Prototip uređaja za mjerenje nadtemperature poluvodiča



Laboratorijski postav pretvarača s mogućnosti mjerenja nadtemperature



RADOVİ U ČASOPISIMA S FAKTOROM ODJEKA

- Stjepan Stipetić, Damir Žarko, Mircea Popescu, **Ultra-Fast Axial and Radial Scaling of Synchronous Permanent Magnet Machines**, IET Electr. Power Appl., 2016, Vol. 10, Iss. 7, pp. 658–666
- Ana Hanić, Damir Žarko, Zlatko Hanić, **A Novel Method for No-Load Magnetic Field Analysis of Saturated Surface Permanent-Magnet Machines Using Conformal Mapping and Magnetic Equivalent Circuits**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 31, No. 2, June 2016, pp. 740-749
- Ana Hanić, Damir Žarko, Dalibor Kuhinek, Zlatko Hanić, **On-Load Analysis of Saturated Surface Permanent Magnet Machines Using Conformal Mapping and Magnetic Equivalent Circuits**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 33, No. 3, September 2018, pp. 915-924
- Damir Žarko, Stjepan Stipetić, Marijan Martinović, Marinko Kovačić, Tino Jerčić, Zlatko Hanić, **Reduction of Computational Efforts in Finite Element Based Permanent Magnet Traction Motor Optimization**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 2, February 2018, pp. 1799-1807
- Stjepan Stipetić, James Goss, Damir Žarko, Mircea Popescu, **Calculation of Efficiency Maps Using a Scalable Saturated Model of Synchronous Permanent Magnet Machines**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 5, September/October 2018, pp.4257-4267
- Tino Jerčić, Šandor Ileš, Damir Žarko, Jadranko Matuško, **Constrained Field-Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Machine With Field-Weakening Utilizing a Reference Governor**, Automatika, Vol. 58, No. 4, 2017, pp. 439-449.

RADOVİ U ZBORNICIMA MEĐUNARODNIH KONFERENCIJA

- Tino Jerčić, Damir Žarko, Jadranko Matuško, Marijan Martinović, **Minimum Loss Control of Interior Permanent Magnet Traction Motor**, Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2015), pp. 992-998, Coeur d'Alène, Idaho, SAD, 10-13.5.2015.
- Tino Jerčić, Šandor Ileš, Damir Žarko, Jadranko Matuško, **Current Reference Governor of Permanent Magnet Synchronous Machine**, Proceedings of the 22nd International Conference on Electrical Machines (ICEM 2016), pp. 1024-1030, Lausanne, Švicarska, 4-7.9.2016.
- Ana Hanić, Damir Žarko, Dalibor Kuhinek, Zlatko Hanić, **No-Load Analysis of Permanent Magnet Machines With Bread-Loaf Magnets and Fractional-Slot Winding Using Conformal Mapping and Magnetic Equivalent Circuits**, Proceedings of the IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC 2016), pp. 603-610, Varna, Bugarska, 25-28.9.2016.
- Damir Žarko, Marinko Kovačić, Stjepan Stipetić, Damir Vuljaj, **Optimization of Electric Drives for Traction Applications**, Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2017), pp. 111-127, Dubrovnik, Hrvatska, 4-6.10.2017
- Tino Jerčić, Damir Žarko, **A Survey of Permanent Magnet Synchronous Machine Models Suitable for Computer Simulation**, Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2017), pp. 172-177, Dubrovnik, Hrvatska, 4-6.10.2017
- Tino Jerčić, Damir Žarko, Marijan Martinović, Marinko Kovačić, Josip Jurić, Zlatko Hanić, Stjepan Stipetić, **Centrifugal Fan Design for Permanent Magnet Synchronous Motor in a Traction Application**, Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2017), pp. 1-7, Miami, SAD, 21-24.5.2017.
- Stjepan Stipetić, Damir Žarko, Nikša Čavar, **Design Methodology for Series of IE4/IE5 Synchronous Reluctance Motors Based on Radial Scaling**, Proceedings of the 23rd International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018), pp. 146-151, Alexandroupoli, Grčka, 3-6.9.2018.
- Damir Vuljaj, Zlatko Hanić, Ana Hanić, Damir Žarko, **Modelling of Cross Saturation Effect in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Magnetic Equivalent Circuits**, Proceedings of the 23rd International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018), pp. 840-846, Alexandroupoli, Grčka, 3-6.9.2018.
- Damir Žarko, Stjepan Stipetić, **Adjustment of Rated Current in Design of Synchronous Reluctance Motors Using Axial Scaling and Rewinding**, Proceedings of the 23rd International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018), pp. 39-45, Alexandroupoli, Grčka, 3-6.9.2018.
- Tino Jerčić, Damir Žarko, Marinko Kovačić, **Test Bench For Simulating Driving Cycle Load of a Traction Motor**, Proceedings of the 7th Symposium on Applied Electromagnetics (SAEM '18), pp. 1-4, Podčetrtek, Slovenija, 17-20.6.2018.
- Zlatko Hanić, Damir Vuljaj, Stjepan Stipetić, Damir Žarko, **MTPA Control Strategy for Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Derived Using Current Dependent Flux Linkage Functions**, Proceedings of the 7th Symposium on Applied Electromagnetics (SAEM '18), pp. 1-11, Podčetrtek, Slovenija, 17-20.6.2018.

DOKTORSKE DISERTACIJE

- Marinko Kovačić, **Metoda optimiranja trorzinskoga pretvarača za pomoćna napajanja tračničkih vozila**, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2017.
- Ana Hanić, **Modeliranje zasićenih sinkronih strojeva s površinskim trajnim magnetima primjenom konformnoga preslikavanja i magnetskih ekvivalentnih krugova**, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2017.
- Tino Jerčić, **Prediktivno upravljanje sinkronim motorom s unutarnjim trajnim magnetima s ciljem minimiziranja elektromagnetskih gubitaka**, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2018.

DIPLOMSKI RADOVİ

- Stjepan Frljić, **Primjena zakona sličnosti u projektiranju kaveznih asinkronih motora**, diplomski rad br. 1284, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2016.
- Hrvoje Mikec, **Simulacija rada asinkronog vučnog motora u ciklusu vožnje niskopodnog tramvaja**, diplomski rad br. 1644, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2018.
- Marinko Čuljak, **skalabilni nelinearni model kaveznog asinkronog motora**, diplomski rad br. 1641, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2018.
- Mario Klanac, **Projektiranje sinkronog reluktantnog motora primjenom metode konačnih elemenata parametriranog modela motora i evolucijske optimizacije**, diplomski rad br. 1643, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2018.

ZAVRŠNI RADOVİ

- Renato Bartulović, **Laboratorijski model opterećenja pogonskog motora vučnog vozila**, završni rad br. 4328, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2016.
- Mario Klanac, **Analiza utjecaja bazne brzine na karakteristike pogonskog motora elektromotornog vlaka**, završni rad br. 4730, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2016.
- Mario Hlupić, **Simulacija vektorskog upravljanja sinkronim reluktantnim motorom**, završni rad br. 5022, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2016.
- Franjo Štampar, **Određivanje nazivnih podataka vučnih motora električnih automobila prema standardnim ciklusima vožnje**, završni rad br. 5029, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2017.
- Slaven Nađ, **Naponsko-strujne karakteristike vektorski upravljanih asinkronog motora za pogon električnog vozila**, završni rad br. 5023, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2017.



Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost Fakulteta elektrotehnike i računarstva
Sveučilišta u Zagrebu