

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu imenovalo nas je za članove Komisije za pregled i ocenu magistarskog rada kandidata **Petra M. Markovića** pod naslovom "**Simulacioni model električne lokomotive za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite**". Nakon pregleda rada podnosimo Nastavno-naučnom veću sledeći

IZVEŠTAJ

1. Biografski podaci:

Petar Marković je rođen 9. septembra 1979. godine u Užicu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Za to vreme je bio redovan učesnik republičkih i saveznih takmičenja iz matematike i fizike, na kojima je osvojio veliki broj nagrada.

Godine 1998. upisao je osnovne studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. U toku studija je tri godine radio kao demonstrator na laboratorijskim vežbama u Laboratoriji za elektroniku. Diplomirao je u septembru 2004. godine, na Odseku za elektroniku, telekomunikacije i automatiku - Smer za elektroniku. Studije je završio sa prosečnom ocenom 9.26 i ocenom 10 na diplomskom ispitu. Diplomski rad pod naslovom "Brzi brojački modul za programabilni kontroler" radio je u preduzeću Informatika AD.

Odmah po diplomiranju, u oktobru 2004. godine, zaposlio se u preduzeću Informatika AD, gde je radio kao saradnik na razvoju hardvera industrijskih kontrolera. Iste godine upisao je i postdiplomske magistarske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Maja 2005. godine prelazi na Saobraćajni fakultet u Beogradu, Katedra za vozila i pogonske sisteme, gde do danas radi kao asistent-pripravnik. Angažovan je u nastavi i drži računске i laboratorijske vežbe iz predmeta Elektrotehnika, Elektrovučna vozila, Železnička elektroenergetska postrojenja.

Istraživačke aktivnosti sprovodi i u okviru projekata finansiranih od strane Ministarstva za nauku R. Srbije: "Istraživanje i razvoj novih metoda za optimalno korišćenje adhezionih mogućnosti vučnog vozila", projekat br. 15020, od 2008. do 2010. god. i "Istraživanje uticaja i razvoj metoda operativnog upravljanja saobraćajem vozila sa električnom vučom po energetskom kriterijumu optimalnosti", projekat br. TR36047, od 2011. i dalje.

Sve predmete na postdiplomskim studijama je položio sa prosečnom ocenom 10.

Iz oblasti kojima se bavi kao prvi autor ili koautor do sada je objavio tri rada na međunarodnim konferencijama, osam radova na domaćim konferencijama i dva rada u časopisima. Na temu magistarske teze, kao prvi autor objavio je **tri rada na međunarodnim konferencijama**:

1. Petar Marković, Dragutin Kostić, "Simulation Model of Adhesion Force Test Unit for Slip Control", Proceedings of 16th International Symposium on Power Electronics (Ee2011), Novi Sad, Serbia, 26-28.11.2011

2. Petar Marković, Dragutin Kostić, "Fuzzy Logic Slip Controller of an Electric Locomotive", Proceedings of 15th International Symposium on Power Electronics (Ee2009), Novi Sad, Serbia, 28-30. october 2009.

3. Petar Marković, Dragutin Kostić, Nenad Jevtić, "Hardware-in-the-loop Simulation of the Laboratory Model for Adhesion Force Emulation" XV International Conference on Railways RAILCON'12, 2012, Niš, Srbija, 04-05.10.2012, str. 53- 56

i tri rada na domaćim konferencijama:

1. Petar Marković, Dragutin Kostić, Nenad Jevtić, "Primena algoritama protivklizne zaštite na simulacionom modelu električne lokomotive", XIV Konferencija o železnici ŽELKON, Niš, 07. i 08. oktobra 2010, str. 83-86.
2. Petar Marković, Dragutin Kostić, "Modelovanje pojave proklizavanja kod električnih lokomotiva Železnica Srbije", CD Zbornik radova 53. Konferencije ETRAN, Etran 2009, Vrnjačka Banja, 15-18. jun 2009.
3. Petar Marković, Dragutin Kostić, "Analiza dejstva protivklizne zaštite na lokomotivama Železnica Srbije", CD Zbornik radova 52. Konferencije ETRAN, Etran 2008, Palić, 8-12. jun 2008.

2. Predmet magistarskog rada

Proklizavanje točkova pogonskih osovina u vučnom režimu i klizanje u režimu kočenja česta su negativna pojava u železničkom saobraćaju. Razlozi zbog kojih dolazi do ovih pojava su: umanjen koeficijent adhezije između točka i šine usled spoljašnjih dejstava (atmosferski uslovi, zaprljanost šine...) i neprilagođeno velika vrednost vučnog, odnosno kočionog, momenta primenjenog na pogonskoj osovini.

Osnovni cilj koji je potrebno ostvariti u režimu vuče je preventivna zaštita točkova od proklizavanja uz efektivno korišćenje adhezije, tj. razvijanje maksimalne vučne sile koja se može ostvariti na spoju točak šina bez gubitka adhezije. Da bi napred navedeni cilj bio ostvaren neophodna je precizna detekcija klizanja kao i kontrola i regulisanje vučne sile na najveću dozvoljenu vrednost u zoni pseudoklizanja. Ove aktivnosti predstavljaju glavne zadatke jednog algoritma protivklizne zaštite.

Sudeći po trenutnom stanju istraživanja u ovoj oblasti u svetu, razvoj novih metoda i unapređenje postojećih algoritama protivklizne zaštite dostigli su vrhunac u prethodnoj dekadi, čak i u slučaju primene na vozovima velikih brzina. Međutim, nizak stepen tehnološke razvijenosti u slučaju Železnica Srbije daje veliki prostor za unapređenje ove bitne funkcionalnosti, što je jedan od motiva za ovaj rad.

Osnovni cilj magistarskog rada bio je realizacija platforme za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite. Prvenstveno, cilj je bio realizacija računarskog simulacionog modela električne lokomotive, po uzoru na lokomotivu serije 444 ŽS. Nakon toga, razvijeni su i na simulacionom modelu primenjeni neki osnovni algoritmi protivklizne zaštite, najčešće korišćeni u praksi i prezentovani u naučnim radovima. Kao poslednji korak ka krajnjem cilju istraživanja, analizirana je mogućnost za realizaciju laboratorijskog modela, pogodnog za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite. Predložen je model, koji se sastoji od para motor-generator i koji uspešno, u realnom vremenu, emulira proces razvijanja vučne sile na kontaktu točak-šina i promenu adhezionih uslova u toku kretanja vozila što direktno utiče na promenu opterećenja vučnog motora. Validnost i upotrebna vrednost predloženog modela potvrđena je odgovarajućom *Hardware-in-the-Loop* simulacijom.

3. Osnovni podaci o magistarskom radu

Magistarski rad kandidata Petra Markovića "Simulacioni model električne lokomotive za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite" sastoji se od 113 strana, sa 77 slika. Lista referenci obuhvata 39 jedinica. Rad se sastoji od: uvoda (prvo poglavlje), šest radnih poglavlja, zaključka (osmo poglavlje), spiska literature i popisa najčešće korišćenih simbola.

4. Sadržaj i analiza rada

U uvodnoj, prvoj, glavi magistarskog rada objašnjen je predmet istraživanja magistarske teze i opisan predmet i rezultati istraživanja u pojedinim poglavljima.

U drugom poglavlju ukratko su objašnjeni osnovni pojmovi i opisane i definisane osnovne veličine od interesa (brzina klizanja, relativno klizanje, koeficijent adhezije, vučna sila). Objasnjeno je pojam adhezije krive, navedeni faktori koji utiču na njen oblik i navedeni neki matematički modeli, koji se koriste za modelovanje ove pojave u računarskim simulacijama.

U poglavlju broj tri objašnjena je osnovna svrha algoritama protivklizne zaštite u kontekstu položaja radne tačke na adhezionoj krivoj. Definirano je koje električne i mehaničke veličine ima potrebe meriti, a koje nemerljive veličine estimirati. Zatim su opisani principi funkcionisanja osnovnih i najčešće upotrebljivanih algoritama protivklizne zaštite, prethodno podeljeni u dve grupe – algoritmi dijagnostičkog tipa (reaguju po detekciji proklizavanja točkova) i optimizacionog tipa (prate poziciju radne tačke na adhezionoj krivoj, neprekidno utičući na njen položaj).

Četvrto poglavlje donosi kratak pregled rezultata eksperimentalnih merenja na električnim tiristorskim lokomotivama ŽS serije 444, čiji je osnovni cilj bio analiza dejstva protivklizne zaštite, realizovane u sklopu modernizacije diodnih lokomotiva ŽS serije 441. Prikazani su vremenski snimci svih relevantnih merenih veličina i prodiskutovano je dejstvo primenjenog algoritma protivklizne zaštite.

U petom poglavlju opisan je računarski simulacioni model (MATLAB/Simulink) električne lokomotive, realizovan sa ciljem razvoja algoritama protivklizne zaštite. Opisan je mehanički podsistem, od vratila pogonskih motora, preko mehaničkih reduktora, pa do pogonskih osovina sa točkovima. Prikazane su dve verzije: sa modelovanom elastičnošću pogonskih osovina, i bez analiziranja ove pojave, tj. sa pretpostavkom krutosti pogonskih osovina. Električni podsistem, od mrežnog napajanja, preko naponskog pretvarača do pogonskog motora, takođe je realizovan u dve izvedbe. Jedna varijanta je sa vučnim motorima za jednosmernu struju i tiristorskim ispravljačima, po uzoru na lokomotive ŽS serije 444. Regulacija struje motora izvodi se primenom kontrolera na bazi *fuzzy* logike. Druga varijanta električnog podsistema je realizovana sa asinhronim motorima sa primenjenim indirektnim vektorskim upravljanjem.

Poglavlje broj šest sadrži opis nekoliko osnovnih algoritama protivklizne zaštite koji su razvijeni i primenjeni na simulacionim modelima električne lokomotive opisanim u prethodnom poglavlju. Primjenjene metode se razlikuju po složenosti za primenu i kvalitetu dejstva. Najjednostavnije koriste razliku ugaonih brzina pogonskih osovina: jedna metoda kao signal za povratnu spregu sa proporcionalnim dejstvom kompenzacije reference momenta, druga za aktiviranje šablonske kompenzacije struje ili momenta motora pri prekoračenju odgovarajućeg praga razlike brzina. Složenije metode zahtevaju poznavanje estimirane vrednosti vučne sile, pa je prikazana realizacija odgovarajućeg opservera poremećaja za estimaciju nemerljive vučne sile. Opisane su i primjenjene dve metode koje koriste estimiranu vrednost adhezije sile: prva sa linearnim PI regulatorom u povratnoj sprezi po adhezionom momentu, dok se u drugoj, na dva različita načina ova estimirana vrednost koristi pri realizaciji kontrolera protivklizne zaštite na bazi fazi logike.

U sedmom poglavlju je opisan laboratorijski model pogodan za implementaciju i testiranje algoritama protivklizne zaštite. Model se sastoji od para motor-generator, gde motor emulira pogonski motor električnog vozila, na koji se primenjuje algoritam protivklizne zaštite, dok generator emulira opterećenje, srazmerno vučnoj sili koja se razvija na kontaktu točak-šina. Emulacija kretanja vozila u realnom vremenu realizuje se na kontroleru. Prikazani su rezultati računarske simulacije predloženog modela, a nakon toga i rezultati odgovarajuće *Hardware-*

In-The-Loop simulacije, koji potvrđuju upotrebnu vrednost predloženog laboratorijskog modela u svrhu razvoja i testiranja algoritama protivklizne zaštite.

Najvažniji doprinosi magistarskog rada su sledeći:

- Dat je pregled osnovnih, najčešće korišćenih algoritama protivklizne zaštite, sa podelom po načinu delovanja i veličinama koje se mere ili estimiraju.
- Realizovan je kompletan računarski simulacioni model električne lokomotive serije 444 Železnica Srbije, pogodan za razvoj algoritama protivklizne zaštite, sa mogućnošću simuliranja i analiza mnogih drugih funkcionalnosti i pojava. Kroz realizaciju ovog modela uspešno je prilagođen i primenjen matematički model adhezione karakteristike, široko korišćen u programima za računarsku simulaciju dinamike kretanja železničkog vozila.
- Realizovan je simulacioni model zamišljene lokomotive sa asinhronim vučnim motorima, pogodan za razvoj naprednijih algoritama protivklizne zaštite, posebno onih koji ne koriste signal sa senzora ugaone brzine.
- Razvijeno je i primenjeno na prethodno realizovanim modelima nekoliko osnovnih algoritama protivklizne zaštite. Široko korišćeni algoritam protivklizne zaštite, *Hybrid re-adhesion control method*, je primenjen na simulacionom modelu lokomotive serije 444. Rezultati simulacija pokazuju da je algoritam veoma efikasan, jednostavan za primenu, kao i da postoji značajan prostor za unapređenje algoritma protivklizne zaštite trenutno primenjenog na lokomotivama ŽS serije 444, zasnovanog na sličnim principima.
- U cilju unapređenja platforme za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite, predložen je laboratorijski model koji se sastoji od para motor-generator i kontrolera na kome se emulira kretanje vozila u longitudinalnom pravcu, uz primenu unapred definisanih adhezionih karakteristika proizvoljnog oblika. Momentom generatora se upravlja tako da opterećenje motora bude srazmerno emuliranoj vrednosti vučne sile. Jedan takav model jednomotornog vozila je opisan, i utvrđena mu je upotrebna vrednost kroz realizaciju odgovarajuće *Hardware-in-the-Loop* simulacije, pri čemu se na kontroleru realizuju samo osnovni zadaci – adhezionu karakteristika, kretanje vozila, histerezisni strujni regulator za upravljanje radom generatora.
- Sledeći korak koji je predviđen, u pravcu ka realizaciji laboratorijskog modela, jeste zamena korišćenog kontrolera (Atmega16) nekim digitalnim procesorom signala, kako bi se u realnom vremenu na procesoru mogli realizovati svi ostali upravljački zadaci (pored osnovnih) kao što su upravljanje radom motornog pogona i primena ranije razvijenih algoritama protivklizne zaštite.
- Uspešno je razvijena široka platforma za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite, koja se sastoji od dva računarska simulaciona modela električnih lokomotiva (sa nekoliko podvarijanti) i nekoliko različitih kontrolnih jedinica sa realizovanim osnovnim algoritmima protivklizne zaštite. Proces će biti kompletiran realizacijom laboratorijskog modela, čija je funkcionalnost opisana u magistarskom radu, a upotrebna vrednost potvrđena realizacijom odgovarajuće HIL simulacije.

5. Zaključak i predlog

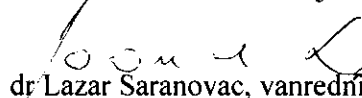
Magistarski rad kandidata Petra M. Markovića je u celini napisan u skladu sa obrazloženjem navednim u prijavi teme i sadrži sve bitne elemente koji se zahtevaju u magistarskom radu na magistarskim studijama Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Kandidat je u toku svog obrazovanja na Elektrotehničkom fakultetu ispuno sve obaveze predviđene Zakonom i pravilima Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu za izradu magistarskog rada.

U okviru magistarskog rada razvijeni su i na simulacionom modelu primenjeni neki osnovni algoritmi protivklizne zaštite, najčešće korišćeni u praksi i prezentovani u naučnim radovima. Analizirana je mogućnost za realizaciju laboratorijskog modela, pogodnog za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite. Predložen je model, koji se sastoji od para motor-generator i koji uspešno, u realnom vremenu, emulira proces razvijanja vučne sile na kontaktu točak-šina i promenu adhezionih uslova u toku kretanja vozila što direktno utiče na promenu opterećenja vučnog motora. Validnost i upotrebnost vrednost predloženog modela potvrđena je odgovarajućom *Hardware-in-the-Loop* simulacijom.

Na osnovu svega izloženog, članovi Komisije predlažu Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu da rad **Petra M. Markovića**, pod naslovom "**Simulacioni model električne lokomotive za razvoj i testiranje algoritama protivklizne zaštite**", prihvati kao magistarsku tezu i da kandidatu odobri javnu usmenu odbranu.

U Beogradu, 26.08.2013.

Članovi komisije:



dr Lazar Saranovac, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet



dr Vujo Đindarević, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet



dr Dragutin Kostić, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet