

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Dr Dragutin Kostić
Dr Predrag Jovanović

ELEKTROVUČNA VOZILA I POSTROJENJA

BEOGRAD
2024.

Dragutin Kostić, Predrag Jovanović
ELEKTROVUČNA VOZILA I POSTROJENJA
I izdanje

Recenzenti: dr Slobodan Vukosavić
dr Željko Despotović
dr Dragomir Mandić

Za izdavača: dr Nebojša Bojović, dekan

Glavni i odgovorni urednik: dr Mirjana Bugarinović

Tehnički urednik: Predrag Knežević

Izdavač: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet,
Vojvode Stepe 305; telefon: 011 3976 017;
faks: 011 3096 704; www.sf.bg.ac.rs

Priprema: Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta;
telefon: 011 3091 344; idsf@sf.bg.ac.rs;
(skriptarnica) sfknjige@sf.bg.ac.rs

Štampa: Pekograf DOO,
Vojni put 258/d, 11080 Zemun;
telefon: 011 31 49 166; www.pekograf.com

Tiraž: 100 primeraka

ISBN 978-86-7395-482-0

Na osnovu odluke Uređivačkog odbora Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, broj 504/2 od 9. aprila 2024. godine, odobrava se za upotrebu u nastavi na osnovnim studijama kao osnovni udžbenik za predmete „Elektrovučna vozila” i „Železnička elektro-energetska postrojenja”, i kao pomoćni udžbenik za predmet „Teorija vuče”.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

629.423(075.8)
621.33(075.8)

КОСТИЋ, Драгутин, 1953-

Elektrovučna vozila i postrojenja / Dragutin Kostić, Predrag Jovanović. - 1. izd. - Beograd : Univerzitet, Saobraćajni fakultet, 2024 (Zemun : Pekograf). - VIII, 274 str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 100. - Beleška o autorima: str. 273-274. - Bibliografija: str. 271-272.

ISBN 978-86-7395-482-0

1. Јовановић, Предраг Р., 1973- [аутор]
а) Железничка возила, вучна б) Електрична вуча

COBISS.SR-ID 143176201

Izdavač zadržava sva prava. Reprodukција pojedinih delova ili celine ove publikacije nije dozvoljena.

Predgovor

Ovaj udžbenik je nastao iz potrebe da se studentima približe tehničke i eksploatacione karakteristike železničkih elektrovučnih vozila i elektroenergetske infrastrukture, kao posebne i jedinstvene tehničke celine železničkog saobraćaja i transporta.

Pitanja koja se odnose na elektrovučna vozila i postrojenja ne mogu se obrađivati izolovano i nezavisno od tema koje pripadaju teoriji vuče vozova. U drugom i trećem poglavlju se obrađuju klasične teme iz ove oblasti.

Vučni pogon predstavlja osnovu za razumevanja tehničkih karakteristika vozila. Vučni motor, elektroenergetski konvertori i vučni transformator predstavljaju esencijalne sklopove pogona, pa su iz tog razloga posebno analizirani, da bi u nastavku mogle biti prikazane i diskutovane tehničke i eksploatacione karakteristike pojedinih tipova elektrovučnih vozila, osnovni principi regulacije brzine i vučne sile, planovi održavanja i tehnička ispitivanja

Savremena vučna vozila snabdevena su mernim uređajima koji registruju poziciju voza, brzinu vožnje i upotrebu električne energije. Ova tema je obrađena sa normativnog i tehničkog stanovišta ali će čitaoci moći da sagledaju i osnovne principe za izračunavanje snage iz podataka dobijenim merenjima, akviziciju i prenos podataka od vozila prema dispečerskom centru.

Naredna poglavlja posvećena su stabilnim postrojenjima električne vuče za sistem 25kV, 50Hz. Gradivo obuhvata elektrovučne podstanice, tipove i sastav kontaktne mreže, postrojenja za sekcionisanje i postupke održavanja. Preduslov za razumevanje ove materije predstavlja poznavanje značenja termina, specifičnih za kontaktnu mrežu, pa je shodno tome dat popis karakterističnih termina i njihovo značenje. Kako intenzitet saobraćaja direktno utiče na opterećenje kontaktne mreže, u poslednjem poglavlju je postavljen jednostavan model koji pruža mogućnost približne ocene pada napona na jednoj deonici u zavisnosti od pozicije i broja vozila na mreži i struja koju vozila preuzimaju iz mreže.

Težili smo da nivo izlaganja gradiva bude razumljiv čitaocu koji je savladao kurs Elektrotehnike po nastavnom planu tehničkih nematičnih fakulteta. Sa druge strane smo se trudili da održimo nivo koji se zahteva za univerzitetski udžbenik. Udžbenik sadrži više rešenih numeričkih primera koji ilustruju izloženo gradivo pojedinih poglavlja. Prilikom rešavanja nekih primera korišćen je programski paket MATLAB.

Iz priloženog spiska literature na kraju udžbenika može se lako zaključiti da nedostaje domaća literatura iz ove oblasti. Saobraćajni fakultet je, zahvaljujući profesoru Dimitriju Diniću, nekada bio vodeća institucija po izdavačkim poduhvatima iz elektrovučnih vozila i vuče vozova. Ovaj udžbenik se nakon dugog niza godina pojavljuje sa namerom da na neki način podseti na tu tradiciju i podstakne napore da se ova multidisciplinarna naučna oblast očuva, i u budućnosti unapredi.

Zahvaljujemo se dr Anici Kostić dipl.mat. na nesebičnoj pomoći prilikom editovanja i tehničke pripreme teksta. Zahvaljujemo se mr Petru Markoviću dipl.el.inž. za pripremu dela slika za ilustraciju gradiva u poglavljima 4. i 5. Posebnu zahvalnost izražavamo uvaženim profesorima, akademiku dr Slobodanu Vukosaviću, redovnom članu SANU, dr Željku Despotoviću, naučnom savetniku iz Instituta Mihailo Pupin i dr Dragomiru Mandiću, koji su se prihvatili zadatka da izvrše recenziju ovog udžbenika i daju korisne primedbe i sugestije u cilju njegovog poboljšanja.

Mišljenja smo da ova knjiga može koristiti i inženjerima koji se u svom radu susreću sa oblastima koje su analizirane u ovom udžbeniku. Na kraju želimo da pozovemo čitaoce koji budu koristili ovu knjigu da nam ukažu na greške koje sigurno postoje, ali ih nismo uočili.

U Beogradu, aprila 2024.

Autori

Sadržaj

Predgovor	iii
1 Opšte karakteristike vozila	1
1.1 Podela i glavni sklopovi	1
1.2 Tehnički podaci o vozilu	6
2 Mehanički podsistem vozila i vučne karakteristike	11
2.1 Elementi i osnovne funkcije	11
2.2 Vučne karakteristike pri vožnji konstantnom brzinom	15
2.3 Dinamičke karakteristike vuče	16
2.4 Otpori vuče	17
2.4.1 Stalni otpori vuče	17
2.4.2 Povremeni otpori vuče	19
2.5 Ukupna sila vuče i potreban momenat vučnog motora	20
2.6 Adhezija i granična vrednost vučne sile	21
2.6.1 Opšta jednačina vuče, vučni dijagram i maksimalna snaga vučnih motora	26
2.6.2 Protivklizna zaštita	30
2.7 Kočenje voza	33
3 Vozni dijagram	39
3.1 Karakteristični režimi vožnje	39
3.1.1 Analiza osnovnih režima	39
3.2 Primeri	44

4	Vučni motor	53
4.1	Principi elektromehaničke konverzije	57
4.2	Električne mašine jednosmerne struje.....	59
4.2.1	Induktor	60
4.2.2	Indukt sa kolektorom.....	60
4.2.3	Osnovni izrazi elektromehaničke konverzije mašine jednosmerne struje.....	62
4.2.4	Magnetno polje mašine jednosmerne struje	63
4.3	Vučni motor jednosmerne struje sa rednom pobudom.....	67
4.3.1	Upravljanje brzinom i momentom motora u vući	71
4.3.2	Promena smera kretanja	76
4.4	Električno koćenje.....	77
4.5	Vučni motor za valovitu struju.....	80
4.6	Asinhroni motor	82
4.6.1	Detalji konstrukcije	82
4.7	Osnovni principi rada	83
4.7.1	Primer za vežbu	88
4.8	Ekvivalentni električni model	88
4.8.1	Analiza ekvivalentnog kola	90
4.8.2	Računski primer	91
4.9	Mehanička karakteristika asinhronog motora	93
4.9.1	Analiza krive $M = f(s)$	95
4.9.2	Karakteristike rada vučnog motora u regionu konstantne vućne sile.....	100
4.9.3	Karakteristike rada asinhronog motora u regionu konstantne snage.....	102
4.9.4	Rad asinhronog motora u oblasti slabljenja magnetnog polja	103
4.9.5	Generatorski režim rada – elektrićno koćenje	103
5	Elektroenergetski konvertori	105
5.1	Pregled osnovnih prekidaćkih elemenata konvertora.....	108
5.1.1	Neupravljivi prekidaćki element konvertora – Dioda	108
5.1.2	Poluupravljivi prekidaćki element konvertora – tiristor.....	110
5.1.3	Upravljivi prekidaćki element konvertora, tranzistor – IGBT..	112
5.2	Diodni ispravljać	113
5.3	Tiristorski AC/DC konvertori	115
5.4	DC/DC konvertori.....	119

5.5	DC/AC konvertori – Invertori	122
5.5.1	Princip rada polumostnog invertora	122
5.5.2	Trofazni inverter	125
5.6	Četvorokvadrantni ulazni konvertor	132
5.7	Upravljanje asinhronim motorom	137
6	Transformatori	143
6.1	Princip rada	143
6.1.1	Efektivne vrednosti napona primara i sekundara transformatora.....	146
6.2	Vrste transformatora	147
6.2.1	Stepen korisnog dejstva transformatora	148
6.2.2	Merni naponski i merni strujni transformatori	149
7	Primeri elektrovučnih vozila	151
7.1	Elektrovučna vozila sa motorima za valovitu struju	151
7.1.1	Električne lokomotive sa diodnim ispravljačima	152
7.1.2	Tehnički podaci diodnih lokomotiva 461 i 441.....	158
7.1.3	Tiristorska lokomotiva	161
7.1.4	Sistem za regulaciju brzine lokomotive	164
7.2	Električne lokomotive sa asinhronim vučnim motorom	166
7.2.1	Prednosti vuče sa asinhronim motorom	166
7.2.2	Električno kočenje.....	170
7.2.3	Elektromotorni voz serije 413, FLIRT – Statdler.....	170
7.3	Višesistemska elektrovučna vozila	174
7.3.1	Pitanja za proveru znanja	181
8	Dizel vučna vozila	183
8.1	Dizel električna vučna vozila	186
9	Održavanje i ispitivanje elektrovučnih vozila	191
9.1	Vrste održavanja	191
9.1.1	Redovne opravke.....	192
9.2	Ispitivanje elektrovučnih vozila	194
9.2.1	Ispitivanja u vožnji na pruzi.....	198
10	Merenje potrošnje električne energije	201
10.1	Normativni i tehnički okvir za merne uređaje.....	202
10.2	Algoritmi i prenos mernih podataka	204

11 Sistemi elektrićne vuće.....	213
11.1 Razvoj i standardni tipovi elektrićne vuće	213
12 Elektrovoćne podstanice.....	219
13 Kontaktna mreža	223
13.1 Prosta kontaktna mreža	223
13.2 Lanćasta kontaktna mreža	224
13.3 Zatezanje kontaktne mreže.....	226
13.4 Veza kontaktna mreža – vozilo	228
13.5 Tehnićke karakteristike kontaktne mreže.....	230
13.5.1 Sastav kontaktne mreže otvorene pruge	232
13.6 Sekcionisanje kontaktne mreže	233
13.7 Šema napajanja i sekcioniisanja	235
13.7.1 Osnovne mere i sigurnosni razmaci kontaktne mreže	239
13.7.2 Visine kontaktnog provodnika, nosećeg ućeta i napojnog voda	240
13.8 Sigurnosni razmaci visokonaponske opreme	241
13.9 Osnovne karakteristike kontaktne mreže za brzine do 160 km/h.....	244
13.10 Kontaktna mreža za velike brzine	245
13.11 Održavanje kontaktne mreže.....	248
13.12 Znaćenje karakteristićnih pojmova	253
14 Elektrićne karakteristike kontaktne mreže.....	257
14.1 Padovi napona u kontaktnoj mreži	266
Literatura	271
Beleška o autorima	273