

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Dr Vlastimir DEDOVIĆ,
dr Dušan MLADENOVIĆ, dr Dragan SEKULIĆ

DINAMIKA VOZILA

BEOGRAD
2017.

Dr Vlastimir Dedović, dr Dušan Mladenović, dr Dragan Sekulić
DINAMIKA VOZILA
I izdanje

Recenzenti: dr Srećko Žeželj
dr Gradimir Danon

Za izdavača: dekan, dr Nebojša Bojović

Glavni i odgovorni urednik: dr Marijana Petrović

Tehnički urednik: Gordana Marjanović

Korice: Predrag S. Zdravković

Izdavač: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet,
Vojvode Stepe 305,
telefon: 3976–017
fax: 3096–704
<http://www.sf.bg.ac.rs>

Priprema: Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta
telefon: 3091–344
e-mail: izdavacka_delatnost@sf.bg.ac.rs

Štampa: Pekograf d.o.o.
11080 Zemun, Vojni put 258/d
telefon/fax: 3149–166
e-mail: pekograf@sbb.rs
<http://www.pekograf.com>

Tiraž: 250 primeraka

ISBN 978–86–7395–370-0

Na osnovu odluke Uređivačkog odbora Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu broj 488/2 od 8. maja 2017. godine, odobrava se za upotrebu u nastavi kao osnovni udžbenik za predmet "Vozna dinamika".

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

PREDGOVOR

Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu u različitim formama već decenijama neguje nastavu iz naučne oblasti Dinamika vozila.

Potreba za jednim modernim osnovnim udžbenikom za ovaj predmet postojala je duže vreme, budući da su prethodne knjige iz Dinamike vozila na našem jeziku, korišćene u nastavnom procesu i posvećene ovoj naučnoj oblasti, objavljene u periodu 1973.–1975. Prvo izdanje udžbenika Dinamika vozila, autora prof. dr Vlastimira Dedovića, na Saobraćajnom fakultetu objavljeno je 2004. godine i nedavno je iscrpljeno.

Izmenе koncepta nastave u skladu sa Bolonjskom deklaracijom, promene studijskih programa, kao i drugačiji redosled slušanja povezanih predmeta na različitim modulima, usloveli su da je sadržaj udžbenika morao da u neophodnoj meri bude prilagođen, izmenjen, dopunjen i aktuelizovan. Redosled izlaganja materije prilagođen je praksi nastave, neki delovi udžbenika su skraćeni, dok su neki prošireni. Propraćene su aktuelne promene u oblasti vozila i saobraćaja i načinjen uvod za neke nove nastavne predmete. Značajan deo posla na izmenama i dopunama materije obavili su mlađe kolege Dušan Mladenović i Dragan Sekulić, čime su zaslužili da budu koautori ovog udžbenika.

Studentima Saobraćajnog i drugih srodnih fakulteta potrebno je poznavanje osnova podužne, bočne i vertikalne dinamike vozila da bi pomoću metoda i znanja iz ove oblasti mogli da odrede parametre projektne i upotrebne vrednosti vozila, imajući u vidu:

- ◇ *aktivnu bezbednost – ponašanje vozila pri kretanju pod dejstvom poremećaja i određivanje graničnih parametara pri kojima vozilo gubi kontakt sa podlogom, a vozač kontrolu nad vozilom;*
- ◇ *pasivnu bezbednost – definisanje parametara pri sudaru vozila;*
- ◇ *uticaj vozila na put – definisanje parametara koji određuju interakciju vozila i puta;*
- ◇ *udobnost i sigurnost putnika i tereta,*
- ◇ *automatizaciju sistema za poboljšanje dinamičkih svojstava vozila i pojavu autonomnih vozila i*
- ◇ *uticaj vozila na okolinu.*

Sadržaj udžbenika odgovara nastavnom planu i programu predmeta Vozna dinamika (na osnovnim studijama) i Dinamika vozila – posebna poglavlja (na master studijama) na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, aprila 2017.

Prof. dr Vlastimir V. Dedović

ZAHVALNOST

Kolegama – nastavnicima i studentima Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, zahvaljujemo na saradnji u koncipiranju nove verzije udžbenika, korisnim primedbama i ukazivanju na štamparske i tehničke greške u ranijem izdanju. Oni su doprineli da kvalitet ove knjige bude unapređen i bolje prilagođen potrebama nastave u odnosu na izdanje iz 2004.

Želimo da izrazimo posebnu zahvalnost recenzentima, profesoru dr Srećku Žeželju i profesoru dr Gradimiru Danonu, za efikasnost i korisne sugestije ugrađene u ovu knjigu, kao i za trud koji su uložili.

Zahvalni smo i rukovodstvu Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Uređivačkom odboru i Izdavačkoj delatnosti Fakulteta za efikasan postupak koji je omogućio da se ova knjiga blagovremeno nađe u rukama korisnika.

Na kraju, ali ne i na poslednjem mestu, zahvaljujemo našim porodicama na strpljenju i razumevanju, dragocenoj pomoći i podršci, bez kojih ne bismo mogli da se u potrebnoj meri posvetimo ovom zahtevnom i obimnom poslu.

Autor

SADRŽAJ

PREDGOVOR	3
ZAHVALNOST	5
1. IZVOD IZ ISTORIJE AUTOMOBILA	13
1.1 Istorijski razvoj kopnenih vozila	13
1.2 Nastanak i evolucija točka	14
1.3 Kopnena transportna vozila	15
1.3.1 Zaprežna vozila	16
1.3.2 Vozila sa parnim pogonom	17
1.3.3 Vozila sa električnim pogonom	21
1.3.4 Vozila sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem.....	23
1.4 Početak industrije automobila	27
1.5 Doba inženjera.....	29
1.6 Razvoj Dinamike vozila	36
2. UVOD U DINAMIKU VOZILA.....	39
2.1 Vozilo kao složen tehnički sistem	39
2.2 Dinamika vozila kao naučna disciplina i njeni temelji.....	41
2.3 Njutnovi zakoni	42
2.4 Osnovni pojmovi iz statike	43
2.5 Položaj težišta vozila i osovinski pritisak	46
2.6 Prenos težine.....	47
2.7 Sile i momenti koji deluju na vozilo.....	49
2.8 Aerodinamičke sile.....	50
2.8.1 Teorijski osnovi aerodinamike.....	51
2.9 Dinamički osovinski pritisak.....	53
2.10 Prianjanje.....	54
2.11 Otpori kretanju vozila.....	55
2.11.1 Otpor vazduha.....	57
2.11.2 Aerodinamički otpor automobila	58
2.11.3 Aerodinamički dodaci na savremenim vozilima	59
2.11.4 Uticaj pojedinih otpora na potrošnju energije	61

2.12 Tokovi snage na vozilu.....	62
2.12.1 Pogonski agregat	64
2.12.2 Stvarne karakteristike motora	66
2.12.3 Usklađivanje stvarnih karakteristika motora sa idealnim	67

I DEO – PODUŽNA I BOČNA DINAMIKA VOZILA

3. KOČENJE MOTORNIH VOZILA.....	71
3.1 Osnove.....	71
3.2 Rad i snaga kočenja	72
3.3 Kočeni točak.....	73
3.4 Prianjanje i klizanje	74
3.5 Stabilnost pri kočenju.....	77
3.5.1 Podužna stabilnost.....	78
3.6 Maksimalne performanse pri kočenju	82
3.6.1 Vertikalne reakcije.....	83
3.6.2 Zakoni kretanja kočenog vozila.....	85
3.6.3 Kočenje samo jednom osovinom.....	88
3.7 Stvarne karakteristike kočenja.....	89
3.7.1 Bezbedno rastojanje u koloni	93
3.8 Raspodela kočnih sila.....	94
3.8.1 Idealna i konstantna raspodela kočnih sila	95
3.8.2 Adhezioni dijagrami	97
3.8.3 Raspodela sila kočenja u dijagramu $X_2 = f(X_1)$	99
3.8.4 Raspodela sila kočenja sa korekcijom	101
3.8.5 Promenljivo opterećenje vozila	102
3.9 Savremeni elektronski sistemi za kontrolu dinamičkog ponašanja vozila	104
3.9.1 Anti-blok sistem (ABS).....	104
3.9.2 Drugi sistemi za kontrolu dinamičkog ponašanje vozila	106
4. UPRAVLJANJE, STABILNOST I UPRAVLJIVOST MOTORNIH VOZILA	109
4.1 Osnovni pojmovi	109
4.2 Karakteristike sistema za upravljanje.....	110
4.3 Upravljanje i upravljivost	111
4.4 Skretanje pri maloj brzini	113
4.5 Skretanje pri velikoj brzini	115
4.6 Jednačine skretanja.....	118
4.7 Gradijent podupravljalivosti.....	121

4.7.1	Neutralno vozilo	121
4.7.2	Podupravljivo vozilo	121
4.7.3	Preupravljivo vozilo.....	122
4.8	Karakteristična brzina.....	123
4.9	Kritična brzina	123
4.10	Porast bočnog ubrzanja.....	124
4.11	Porast brzine skretanja.....	124
4.12	Ugao bočnog klizanja	125
4.13	Statička rezerva	126
4.14	Eksperimentalno određivanje gradijenta podupravljivosti	127
4.14.1	Merenje pri konstantnom radijusu	127
4.14.2	Merenje pri konstantnoj brzini.....	129
4.15	Uticao sistema za oslanjanje na skretanje	130
4.15.1	Raspodela momenata bočnog naginjanja	131
4.15.2	Parametri koji utiču na bočnu silu.....	133
4.16	Ispitivanje vozila u nestacionarnim režimima kretanja (Unsteady-state testing)	135
4.16.1	Bočni prelazni odziv pri skretanju – ISO 14793	136
4.16.2	Dvostruka promena saobraćajne trake – ISO 3888	137
4.16.3	Jednostruka promena saobraćajne trake.....	141
4.16.4	Izbegavanje prepreke	143
5.	TEORIJA UDARA I SUDAR VOZILA.....	145
5.1	Osnovna jednačina teorije udara.....	145
5.2	Opšti zakoni teorije udara.....	145
5.2.1	Zakon o promeni količine kretanja materijalne tačke pri udaru.....	145
5.2.2	Zakon o promeni količine kretanja sistema materijalnih tačaka pri udaru.....	146
5.2.3	Zakon o promeni momenta količine kretanja sistema pri udaru	147
5.2.4	Koeficijent udara (sudara).....	148
5.3	Udar tela o nepomičnu prepreku	149
5.4	Upravni centralni sudar dva tela.....	151
5.5	Gubitak kinetičke energije pri plastičnom sudaru – Karnoova teorema	155
5.6	Udar po telu koje se obrće	158
5.7	Necentralni kosi sudar vozila pri ravnom kretanju.....	159
5.8	Modeliranje sudara	162
5.8.1	Ponašanje strukture vozila i deformacije pri sudaru	166
5.8.2	Energetska analiza modela vozila pri udaru o nepomičnu prepreku .	167
5.8.3	Energetska analiza modela sudara dva vozila	169
5.8.4	Analiza sudara pomoću oscilatornog modela.....	171
5.8.5	Oscilatorni model centralnog sudara dva automobila koji se kreću u istom pravcu	174

II DEO – VERTIKALNA DINAMIKA VOZILA

6. OSCILACIJE MOTORNIH VOZILA – TEORIJSKE OSNOVE	177
6.1 Oscilacije – uvodna razmatranja	177
6.1.1 Stepeni slobode i oscilacije vozila	177
6.1.2 Pobude koje deluju na vozilo.....	178
6.1.3 Vozilo kao oscilatorni sistem	178
6.1.4 Oscilatorni modeli vozila.....	180
6.2 Oscilacije – teorijske osnove	182
6.2.1 Slobodne neprigušene oscilacije sa jednim stepenom slobode	182
6.2.2 Prinudne neprigušene oscilacije sa jednim stepenom slobode.....	185
6.2.3 Slobodne prigušene oscilacije sa jednim stepenom slobode.....	189
6.2.4 Prinudne prigušene oscilacije sa jednim stepenom slobode	192
6.2.5 Predstavljanje oscilacija u kompleksnoj ravni	194
6.2.6 Dinamički faktor pojačanja i prenosna funkcija	196
6.3 Vertikalna reakcija	197
7. POBUDA OD NERAVNOSTI PODLOGE	199
7.1 Harmonijska pobuda.....	199
7.2 Periodična (poliharmonijska) pobuda.....	201
7.3 Stohastička pobuda.....	204
7.4 Karakteristike i analiza oscilatornih veličina.....	206
7.4.1 Kvantifikacija nivoa oscilacija	206
7.4.2 Frekventna (spektralna) analiza.....	207
7.4.3 Spektralna gustina	211
7.4.4 Karakteristike mikroprofila podloge.....	213
7.4.5 Primena spektralne gustine neravnosti	214
7.5 Proračun oscilatornih karakteristika	216
8. OSCILATORNE KARAKTERISTIKE VOZILA	219
8.1 Deformacije elastičnih elemenata.....	219
8.1.1 Sedište	219
8.1.2 Sistem za oslanjanje.....	221
8.2 Osovinski pritisak.....	223
8.2.1 Promena vertikalne reakcije	223
8.2.2 Pasivna i aktivna bezbednost vozila	224
8.2.3 Faktor udara točka	226
8.2.4 Opterećenje kolovoza	226
8.3 Vertikalne oscilacije sa dva stepena slobode.....	227

9. UTICAJ OSCILACIJA NA ČOVEKA.....	231
9.1 Nadražaj i opažanje	231
9.1.1 Hipoteze opažanja.....	232
9.2 Vrednovanje dejstva oscilacija	233
9.2.1 Pravac dejstva	234
9.2.2 Percepcija jačine oscilacija	235
9.2.3 Faktor komfora za diskretni spektar.....	235
9.2.4 Faktor komfora za kontinualni spektar	236
9.3 Dejstvo harmonijskih oscilacija na čoveka	237
9.4 Dejstvo oscilacija sa slučajnom pobudom.....	242
9.5 Ocena i optimizacija dejstva oscilacija.....	244
9.6 Preporuke.....	246
9.7 Izlaganje slučajnim oscilacijama	246
9.7.1 Udobnost, radna sposobnost, zdravlje – Standard ISO 2631:1985	247
9.7.2 Udobnost i zdravlje – Standard ISO 2631:1997.....	250
9.7.3 Dejstvo udarnih vibracija – Standard ISO 2631-5:2004.....	253
10. LITERATURA.....	255
11. MALI ENGLESKO-SRPSKI REČNIK TERMINA.....	263
 O AUTORIMA.....	269

