

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za strojništvo

Miha Boltežar

Mehanska nihanja

1. del

(2. popravljena izdaja)

Ljubljana, 2010

Naslov dela: Mehanska nihanja - 1. del

Avtor: prof. dr. Miha Boltežar, univ. dipl. inž.

Recenzenta: prof. dr. Anton Kuhelj ml., univ. dipl. inž.
izr. prof. dr. Bogomil Pertot, univ. dipl. inž.

Jezikovni pregled: Anja Baras

© Fakulteta za strojništvo in dr. Miha Boltežar

Brez soglasja založnika je prepovedano vsakršno reproduciranje ali
prepis v katerikoli obliki.

CIP - Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

531.38/.39(075.8)

BOLTEŽAR, Miha

Mehanska nihanja / Miha Boltežar. 2. popravljena izd. - Ljubljana
Fakulteta za strojništvo, 2010-

Del 1. - 2010

ISBN 978-961-6536-45-5 (zv. 1)

253726720

Kazalo

Predgovor	V
Predgovor k drugi izdaji	VII
1 Osnove mehanskih nihanj	1
1.1 Kratak zgodovinski pregled	1
1.2 Pomen preučevanja mehanskih nihanj	3
1.3 Osnovni pogoji za nastanek mehanskih nihanj	5
1.4 Razvrstitev mehanskih nihanj	7
1.4.1 Lastna nihanja - Vsiljena nihanja	7
1.4.2 Nedušena nihanja - Dušena nihanja	7
1.4.3 Linearna nihanja - Nelinearna nihanja	8
1.4.4 Nihanja z eno prostostno stopnjo - Nihanja z več prostostnimi stopnjami	9
1.4.5 Nihanja diskretnih sistemov - Nihanja zveznih sistemov	13
1.4.6 Deterministična nihanja - Naključna nihanja	14
1.5 Reševanje problemov pri nihanjih: modeliranje	15
1.5.1 Postavitev dinamičnega - fizikalnega modela	15
1.5.2 Postavitev matematičnega modela	18
1.5.3 Predstavitev rezultatov	19
1.6 Osnovni elementi nihajočega sistema	20
1.6.1 Vzmeti	20
1.6.2 Mase	26
1.6.3 Dušilke	28
1.7 Harmoniska gibanja	30
1.7.1 Prikaz s krožečim vektorjem	32
1.7.2 Prikaz v kompleksni ravnini	33
1.8 Fourierjeva analiza	36
1.8.1 Kompleksni zapis Fourierjevih vrst	39
1.8.2 Frekvenčni spektri	40
1.9 Pregledna vprašanja	41

2	Lastna nihanja sistemov z eno prostostno stopnjo	43
2.1	Lastna nedušena nihanja	43
2.1.1	Prikaz nihanj v fazni ravnini	47
2.1.2	Lastna nedušena torzijska nihanja	54
2.2	Lastna dušena nihanja	57
2.2.1	Lastna nihanja z viskoznim dušenjem	57
2.2.2	Lastna nihanja s suhim drsnim trenjem	72
2.3	Rešeni primeri	76
2.4	Pregledna vprašanja	99
3	Vsiljena nihanja sistemov z eno prostostno stopnjo	103
3.1	Odziv sistema na harmonično motnjo	103
3.1.1	Izguba energije pri viskoznem dušenju	113
3.1.2	Faktor kvalitete in pasovna širina	116
3.1.3	Ekvivalentno viskozno dušenje	117
3.1.4	Frekvenčna prenosna funkcija	120
3.2	Odziv sistema na centrifugalno motnjo	122
3.3	Prenos sile na podlago	128
3.4	Odziv sistema na harmonično nihanje podlage	131
3.5	Seizmična teorija	136
3.6	Odziv sistema na periodično motnjo	139
3.7	Odziv sistema na prehodno motnjo	144
3.7.1	Impulzna prenosna funkcija	145
3.7.2	Konvolucijski integral	147
3.8	Rešeni primeri	153
3.9	Pregledna vprašanja	161
4	Nihanja sistemov z več prostostnimi stopnjami	165
4.1	Lastna nihanja	166
4.1.1	Matrični zapis	172
4.2	Vsiljena nihanja	178
4.3	Rešeni primeri	183
4.4	Pregledna vprašanja	191
	Literatura	193
	Uporabljeni simboli in oznake	194
	Stvarno kazalo	197

Predgovor

V pričujočem učbeniku želim v enem zvezku združiti osnovno teorijo, zglede ter nekaj rešenih primerov na področju mehanskih nihanj na nivoju ter v obsegu, kakor snov podajam v drugem letniku vsem študentom univerzitetnega študija strojništva na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. Namenjen je vsem študentom strojništva ter inženirjem, ki bi si radi osvežili ta znanja, ki v modernem času pridobivajo pomen. V sodobnem svetu razvijamo in proizvajamo mirne ter tihe izdelke, želimo živeti v mirnem tako delovnem kakor tudi bivalnem okolju. Za ta namen moramo predvsem poznati osnovne teorije mehanskih nihanj.

V učbeniku sem poskusil definirati osnovne pojme, ki jih srečujemo na področju mehanskih nihanj in ki naj bi jih poznali vsi inženirji strojništva. Izogibal sem se pretirani uporabi visoke matematike, pri podajanju sem vključeval osebne izkušnje s pojasnili na dnu strani, tako s področja splošne dinamike kakor seveda tudi mehanskih nihanj.

Pri pisanju sem se srečeval s številnimi dilemami, prva, ter ne najmanjša, je povezana že s samo opredelitvijo pojma v naslovu - mehanska nihanja. Pri obravnavanju izmeničnih gibanj namreč v praksi uporabljamo izraze kot so nihanja, vibracije, oscilacije ter tresenja. V takih primerih nisem poskušal izrazov poenotiti, ampak sem jih uporabljal enkrat tako, drugič drugače, kakor mi zvenijo v ušesih najprimerneje v posameznem sobesedilu.

Učbenik sem začel z opredelitvijo osnovnih pojmov iz teorije mehanskih nihanj. To uvodno poglavje vsebuje kratek zgodovinski pregled preučevanja mehanskih nihanj, osnovne pogoje za nastanek nihanj, razne razvrstitve mehanskih nihanj ter osnovne elemente nihajočega sistema. Na kratko sem ponovil poglavje iz kinematike o harmoničnem gibanju ter podal osnovne pojme iz Fourierjeve analize.

V drugem poglavju sem obdelal lastna nihanja sistema z eno prostostno stopnjo. Najprej sem izvedel obravnavo brez dušenja, nato pa podrobno predstavil viskozno dušena nihanja pa tudi nihajoče sisteme s suhim drsnim trenjem.

V tretjem poglavju sem obdelal vsiljena nihanja pri sistemih z eno prostostno stopnjo, najprej za harmonično vzbujevalno silo konstantne amplitude, nato pa še pri centrifugalni motnji zaradi preostale neuravnoteženosti rotorjev. Za prakso so izrednega pomena poglavja o zaščiti objekta pred nihanjem podlage kakor tudi zaščita okolice pred nihanjem sistema. Z namenom osnovnega razumevanja načel merjenja,

predvsem pospeškov pri nihanju, sem predstavil osnove seizmične teorije. To poglavje sem sklenil z razširitvijo harmoničnega vzbujanja na poljubno periodično vzbujanje ter na vzbujanje s silo poljubne oblike ter trajanja, kar vodi k določevanju konvolucijskega integrala.

V zadnjem vsebinskem poglavju sem na kratko predstavil osnove nihanj sistemov z več prostostnimi stopnjami, tako lastnih kakor tudi vsiljenih, kar na primeru nihala z dvema prostostnima stopnjama. Podal sem tudi osnove matričnega zapisa nihanja takih sistemov.

Na koncu vseh poglavij sem dodal značilne rešene primere, nekatere rešene le simbolno, druge tudi s številskimi vrednostmi, katerih namen je osvetlitev podanih teorij na določenih primerih. Dodal sem tudi razna vprašanja, namenjena predvsem študentom pri lastnem preverjanju razumevanja predelane snovi.

Bralcu, ki si želi dodatnega poglobljenega študija mehanskih nihanj, je v svetovni literaturi na voljo večje število kakovostnih učbenikov. Navajam jih le nekaj, ki so mi ugajali: [1], [2], [3], [4], [5], in [6] in jih priporočam.

Ob izidu tega učbenika se želim zahvaliti najprej svojemu učitelju, prof. dr. Antonu Kuhlju ml., ki me je že med študijem navdušil za področje vibracij. Skupaj s prof. Bogomilom Pertotom sta opravila natančni recenzentski pregled učbenika. Za njune koristne ter vzpodbudne pripombe se jima najlepše zahvaljujem. Za lektoriiranje in s tem za večjo čistost jezika je poskrbela ga. Anja Baras. Pri uvajanju v pisanje s \LaTeX om sta mi stala ob strani člana Laboratorija za dinamiko strojev in konstrukcij, moja sodelavca dr. Primož Čermelj ter dr. Janko Slavič. Slednjemu sem dolžan tudi zahvalo za skrbni pregled celotnega besedila. Za izdelavo naslovnice je poskrbel arhitekt Uroš Rošker. Slike je natančno izdelal podiplomski študent Gregor Čepon, za kar se mu prav tako lepo zahvaljujem.

Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije se zahvaljujem za finančno podporo pri tiskanju učbenika.

Predgovor k drugi izdaji

Prva izdaja učbenika je pošla v štirih letih, kar dokazuje potrebo po teh vsebinah v slovenskem jeziku. Stalni porast potreb po znanju iz mehanskih nihanj v slovenski industriji, kar dokazujejo številni projekti Laboratorija za dinamiko strojev in konstrukcij kot tudi številni podiplomski študenti pod mentorstvom avtorja, dodatno izkazujejo upravičenost ponovne izdaje učbenika.

V istem obdobju zadnjih štirih let je Fakulteta za strojništvo UL uvedla prenovljene Bolonjske študijske programe, kjer so osnovne vsebine iz mehanskih nihanj, zbrane v tem učbeniku, predavane pri predmetu Dinamika togih teles v tretjem letniku RR programa.

Za drugo izdajo 1. dela sem popravil par napak iz prve izdaje, vsebino pa sem pustil nedotaknjeno. Vsem, ki so me na napake opozorili, sem dolžan iskreno zahvalo.

Ponovno se tudi zahvaljujem vsem sodelavcem, ki so kakorkoli sodelovali pri nastanku tega učbenika.