

Univerzitet u Novom Sadu
Fakultet tehničkih nauka

Zvonko Đ. Rakarić

INŽENJERSKA DINAMIKA

Novi Sad, 2021.

Edicija: „TEHNIČKE NAUKE - UDŽBENICI”

Naziv udžbenika: „INŽENJERSKA DINAMIKA”

Autor: dr Zvonko Đ. Rakarić, vanredni profesor Fakulteta tehničkih nauka
u Novom Sadu

Recenzenti: dr Ivana Kovačić, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta
u Novom Sadu
dr Dragi Radomirović, redovni profesor Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta
u Novom Sadu

Izdavač: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Glavni i odgovorni urednik:
Prof. dr Rade Doroslovački, dekan Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Priprema i štampa: FTN - Grafički centar GRID, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad

Štampanje odobrio:
Savet za bibliotečku i izdavačku delatnost Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Predsednik Saveta za bibliotečku i izdavačku delatnost:
Prof. dr Milan Martinov, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Autorska prava pripadaju izdavaču

СР-Каталогизација у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

531.3:62(075.8)

РАКАРИЋ, Звонко

Inženjerska dinamika / Zvonko Đ. Rakarić. - Novi Sad : Fakultet tehničkih
nauka, 2021 (Novi Sad : GRID). - 355 str. : graf. prikazi. ; 24 cm. - (Edicija
"Tehničke nauke - udžbenici" ; 941)

Tiraž 500. - Bibliografija.

ISBN 978-86-6022-357-1

a) Динамика -- Инжењерски аспект

COBISS.SR-ID 43294985

Predgovor

Knjiga Inženjerska dinamika je pisana tokom prethodnih šest godina mog rada kao predmetnog nastavnika na Mehanici 2 na studijskom programu građevinarstva na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Zapravo, brojne ideje izložene u ovoj knjizi nastajale su tokom prethodne dve decenije, tokom kojih sam bio angažovan na studijskom programu građevinarstva, kao asistent ili nastavnik na predmetima Mehanike 1 (Statika) i/ili Mehanike 2 (Kinematika i Dinamika).

Osnovni razlog pisanje ove knjige je što se pored brojne literature iz Mehanike, uočavala potreba za udžbenikom u kojem će razmatranje kretanja na osnovnom nivou biti tretirano i prezentovano na način blizak problemima sa kojima se sreću studenti i inženjeri građevinarstva. Osim toga, jedan od ciljeva je i osavremenjivanje i prilagođavanje ovog predmeta savremenim trendovima u inženjerstvu.

Od 2017 godine, Mehanika 2 (Osnovne akademske studije; Građevinarstvo; 06-GG14; FTN Novi Sad) je jedan od predmeta iz oblasti inženjerske Mehanike sa FTN-a iz Novog Sada, u sklopu Projekta **Multimedijalna i interaktivna nastava i učenje Inženjerske Mehanike Mech-in-NS**, (<http://www.mech-in-ns.ftn.uns.ac.rs/>), koji je podržan od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Kao jedan od ciljeva projekta je inoviranje pomenute grupe predmeta kroz upotrebu IT tehnologija, kreiranje multimedijalnog sadržaja i saradnje sa privredom.

Formiranje koncepcije knjige kao osnovnog udžbenika na Mehanici 2, pridržavajući se postojećeg akreditovanog programa, je vršeno tako da se izložena materija što bolje poveže sa ostalim predmetima sa studijskog programa, kao i da se iskoriste pozitivna iskustva na sličnim predmetima sa građevinskih fakulteta u bliskom okruženju, kao i sa građevinskih fakulteta iz sveta. S tim u vezi sam konsultovao predmetne nastavnike sa studijskog programa građevinarstva (FTN Novi Sad), čije su brojne sugestije i predlozi bili od velike pomoći prilikom kreiranja osnovne koncepcije knjige. Na ovom mestu bih se posebno zahvalio prof dr Dušanu Kovačeviću. Osim toga, od velike pomoći su mi bili i dostupni materijali sa sličnih predmeta sa građevinskih fakulteta iz Beograda, Zagreba i Osijeka. Ovde bih se zahvalio prof dr Aleksandru Juriću koji predaje Mehaniku II na Građevinskom i Arhitektonskom fakultetu sa Sveučilišta Josipa Juraja Štrosmajera iz Osijeka (<http://www.gfos.unios.hr/preddiplomski-sveucilisni-studij-gradevinarstvo/mehanika-ii-pss-grad>). Brojne ideje i smernice sam našao i u predmetima:

- Mehanika 2 sa Građevinskog fakulteta Tehničkog Univerziteta u Beču, Austrija:

(<https://tiss.tuwien.ac.at/course/courseDetails.xhtml?dswid=9925&dsrid=305&courseNr=201085>)

- Inženjerska dinamika sa smera za građevinarstvo sa MIT (Kembridž, Masačusets, SAD):

(<https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/>) i

- Strukturalna dinamika sa Departmana za građevinarstvo Univerziteta IIT iz Bombaja, Indija:

(https://www.youtube.com/watch?v=Jlzo8OzoZ_c&list=PL0463169721E0D76F)

Teorijska razmatranja, izvođenja, teoreme, zakone itd, sam nastojao na predavanjima ilustrovati na realnim inženjerskim problemima. Pored oslanjanja na bogat multimedijalni sadržaj, simulacije i animacije u okviru platforme Mech-in-NS (<http://www.mech-in-ns.ftn.uns.ac.rs/>), na nastavi sam koristio kratke i online dostupne filmove čije sam delove puštao na predavanjima. Takođe, linkovi su postavljani na prezentacijama koje su pratile izvođenje nastave, kao i na FB grupu Inženjerska dinamika i platforme u okviru Online nastave. Ovo je omogućilo razvijanje aktivne diskusije o datim problemima, prepoznavanje teorijskih koncepata i povezivanje sa realnim inženjerskim problemima, koristeći pogodnosti IT tehnologija. Umesto „rešavanje zadatka“, kao tradicionalan pristup u Mehanici, koristio sam „diskusija i rešavanje ilustrativnih primera“. Naglasak sam uvek stavljao na konceptijsko razmatranje datog problema, vezu sa realnim inženjerskim problemom, mogući način mehaničkog modelovanja, prepoznavanje izvođenih teorijskih jedinica u realnom problemu i konačno, diskusiju. Nastojao sam da i ova knjiga bude u duhu takvog pristupa.

Zbog ograničenosti same knjige, samo je jedan deo ovog multimedijalnog sadržaja i video prezentacija mogao biti na određeni predstavljen i razmotren u njoj. Iz tog razloga ću ovo mesto iskoristiti da navedem neke od najčešće korišćenih linkova koje sam koristio u prethodnih šest godina nastave na Mehanici 2, kao i teorijske pojmove koje sam na osnovu njih ilustrovao:

- Podizanje pomoću kрана, elementa procesne industrije, dugačkog 108 m. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=0-XRJXdU2zk> (nepokretni koordinatni sistem, formiranje mehaničkog modela, pravolinijsko kretanje tačke, pomeranje, brzina, ubrzanje; ravansko kretanje; trenutni pol brzine; kinematička veza između brzina tačaka tela kojom je obezbeđen vertikalni pravac užadi);

- Falkriški točak, poznata prevodnica u Škotskoj. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=tBH9SE-Kw8> (krivolinijsko kretanje tačke; složeno kretanje, prenosno i relativno kretanje; kinematika i dinamika obrtanja tela oko nepokretne ose; kinematika i dinamika translacionog kretanje, moment količine kretanja za nepokretnu tačku/osu; moment količine kretanja za pokretnu tačku, promene momenata količine kretanja; ravnotežni položaj);

- „Rolling bridge“, interesantno rešenje mosta u Londonu. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=x0Dj7XA77hw> (unutrašnje i spoljašnje veze, određivanje broja stepeni slobode kretanja materijalnog sistema; viskozno prigušenje, cilindrični zglobovi, krivolinijsko kretanje tačke, moment količine kretanja

za nepokretnu tačku/osu; promena momenta količine kretanja; ravnotežni položaj);

- Demonstracija i vežba podizanja elementa (oblika ploče) od prefabrikovanog betona na gradilištu – rotacija elementa koji je vezan samo pomoću užadi, oko ose normalne na ravan ploče. Link: (<https://www.youtube.com/watch?v=ylcXOM8Vza4> (veza-uže; kinematika ravanskog kretanja; dinamički uslov ravanskog kretanja; centar mase, dinamičko ostvarenje obrtanja oko nepokretne ose, maseni moment inercije; glavna osa inercije; glavna centralna osa inercije);

- „Facelift“- podizanje elementa od prefabrikovanog betona pravougaonog oblika u vertikalni položaj ostvarivanjem obrtanja oko ivice kojom element naleže na podlogu; prenošenje i postavljanje na zadatu lokaciju. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=geLHscONhpo> (veza-uže; statička sila suvog trenja; dinamički uslov obrtanja oko nepokretne ose, dinamički uslov translatornog kretanja, ravnotežni položaj, ravnotežni položaj);

- Hidraulički pogonjen čekić na principu slobodnog pada. Postavljanje šipova. Link: https://www.youtube.com/watch?v=b7BuKNYb7hA&list=RDCMUCrBbCbXIZprSfIWM4D6buXw&start_radio=1&rv=b7BuKNYb7hA&t=46 (slobodan pad; pravolinijsko kretanje, udar materijalnog sistema, udarni impuls; impulsna reakcija; kinetička energija, potencijalna energija; mehanička energija, promena kinetičke i mehaničke energije, koeficijent restitucije; obrtanje oko nepokretne ose; ravansko kretanje; veza klizač-vođica);

- Izgradnja Miloja vijadukta, Francuska; građevinski poduhvat sa početka 21 veka: <https://www.youtube.com/watch?v=Tyd29gzoeg> (ekvivalentni sistem; ekvivalentna krutost; savijanje vitkog elastičnog štapa, nepokretni koordinatni sistem; korišćenje GPS-a za određivanje položaja i pomeranja; translatorno kretanje tela, kretanje mehaničkog sistema, unutrašnje veze; spoljašnje veze; teorema o kretanju centra mase sistema, oscilacije, složeno kretanje, prenosno kretanje; relativno kretanje);

- Tensegriti strukture (strukture budućnosti). Link: https://www.youtube.com/watch?v=qgilDKW_Aps&t=11s (unutrašnje sile, položaj; pomeranje; kruti elementi; elastični elementi, aksijalna sila; sila zatezanja; sila pritiska; kinematičke i dinamičke veze; redundantni elementi; određivanje broja stepeni slobode kretanja materijalnog sistema za prostorni i ravanski rešetkati sistem; ravnotežni položaj, stabilnost ravnotežnog položaja);

- Seizmički frikcion ležaj (Friction pendulum bearing). Link: <https://www.youtube.com/watch?v=l1NWtVaTq7I> (pomeranje; brzina, ubrzanje; inercijalna sila; translatorno oscilatorno kretanje; amplituda; sopstvena kružna frekvencija; rezonancija, formiranje mehaničkog modela, geneza nastajanja konstrukcije ležaja, od klatna ka materijalnom sistemu kao modelu ležaja, modelovanje trenja, složeno kretanje; prenosno i relativno kretanje, translatorno kretanje, translatorno oscilatorno kretanje);

- Dinamički amortizer na principu klatna (Taipei 101). Link: <https://www.youtube.com/watch?v=CV5MckylvL0&t=6s> (krivolinijsko kretanje, veze, viskozno trenje, viskozni prigušivač; krivolinijsko oscilatorno kretanje; rezonancija);

- Dinamički amortizer sa translatorsnim kretanjem inercijskog elementa. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=4V5iM1OPZJY> (mehanički model – translatorsno kretanje tela- kretanje materijalne tačke; veza klizač-vođica, Njutnovi zakoni; Kinematika i Dinamika translatorsnog pravolinijskog kretanja; količina kretanja i promena; modelovanje trenja, sila viskoznog trenja; oscilacije, inercijalna sila);
- „Gateshead Millenium Bridge“ (pokretni most sa naginjanjem). Link: <https://www.youtube.com/watch?v=S7nXXy1NhpM> (Kinematika i Dinamika obrtanja tela oko nepokretne ose; cilindrični zglobovi, krivolinijsko kretanje tačke; ravnotežni položaj; moment količine kretanja za osu; promena momenta količine kretanja za osu; statičke i dinamičke reakcije oslonaca);
- Monitoring stanja konstrukcija (Structural Health monitoring-SHM) <https://www.youtube.com/watch?v=TwyxgYjwHuo> (pomeranje, brzina; ubrzanje, akcelorometar; deformacija; oscilacije),
- Upotreba viskoznih prigušivača u građevinskim strukturama. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=OoWtKmNoz6Q> . (pravolinijsko kretanje; složeno kretanje; prenosno i relativno kretanje; deformacija; translatorsno kretanje; unutrašnja sila; sila viskoznog trenja; kinetička energija i njena promena; mehanička energija i njena promena; gubitak mehaničke energije; nepotencijalne sile; prigušenje u strukturama; translatorsno i obrtno kretanje elemenata ramske konstrukcije; uticaj prigušenja na amplitude prinudnih oscilacija);
- Frikcioni prigušivač (na bazi Kulonove sile suvog trenja klizanja). Link: <https://www.youtube.com/watch?v=Pkhfy8AsRxo> (trenje klizanja; modelovanje sile suvog trenja klizanja; kinetička, mehanička energija i njihove promene; gubitak mehaničke energije; prigušenje u sistemu; razlika između sile trenja klizanja i sile viskoznog trenja; zaustavni položaji; kinematika materijalnog sistema; broj stepeni slobode kretanja materijalnog sistema; kinematika i dinamika kretanja ramske strukture; veza klizač-vođica);
- Samo-centrirajuće strukture. Link: <https://www.mdpi.com/2075-5309/4/3/520/htm> (kinematika ramskih struktura; broj stepeni slobode kretanja; obrtanje oko nepokretne ose; moment količine kretanja za nepokretnu osu i promena; nelinearni oblik restitucione sile);
- Primena tensegriti struktura za aktivne fasade. Link: https://www.fernandofraternalierearch.com/publications/JCOMB_Tensegrity_Facades_2017.pdf (prostorna rešetkasta konstrukcija; materijalni sistem; broj stepeni slobode kretanja; aksijalna sila; zatezanje i pritisak; deformacija; Hukov zakon, pravolinijsko i krivolinijsko kretanje tačaka sistema; oscilatorno kretanje i primena za skupljanje („energy harvesting“) ambijentalne energije.
- Vibracije, dinamika i Buka (Wood vibrations). Link: <https://www.youtube.com/watch?v=Dn4vFmBvSrQ&t=115s> i <https://www.youtube.com/watch?v=B87gPJypUI0&t=211s> (vibracije struktura izazvane radom mašina sa obrtnim elementima (pumpe, ventilatori, kompresori, vetroturbine...), vibracije rešetki, roštilja, konzolnih nosača, moment količine kretanja i njegova promena).

Knjiga se sastoji iz četiri dela. Prvi deo je posvećen Kinematici tačke i Dinamici materijalne tačke. Cilj prvog dela je da najpre student u potpunosti razume predstavljanje i razmatranje osnovnih kinematskih veličina jedne tačke u odnosu na referentnu tačku koja može biti pokretna ili nepokretna, kao i da se razume način predstavljanja ovih veza u nepokretnom koordinatnom sistemu (NKS), odnosno u pokretnom koordinatnom sistemu (PKS). Uvedene kinematske veličine potom služe kao osnova za dinamičku analizu jedne materijalne tačke. Izložena dinamika jedne materijalne tačke iz prvog Dela, se zatim proširuje na sistem kojeg čine najmanje dve, ili više materijalnih tačaka, a što je predmet razmatranja drugog Dela. Ovaj drugi Deo se u suštini bavi sistemom diskretno raspoređenih masa, i važnost ovog dela je dvojaka. Naime, prilikom analize različitih struktura, mogući način njihovog modelovanja je upravo kao sistem linijskih, ravanskih ili prostornih struktura u kojima su mase elemenata koncentrisane u odgovarajućim tačkama konstrukcije. Predstavljanjem veza između ovih tačaka preko lakih elastičnih linijskih elemenata, omogućena su relativna kretanja jednih u odnosu na druge tačke ovako modelovanog sistema materijalnih tačaka (SMT). Osim toga, značaj ovog drugog Dela je i u tome, što ovako shvaćen SMT, služi kao osnova za razmatranje krutog tela (KT) i krutog objekta (KO), a kojim se bavi treći Deo ove knjige. Kruto telo se ovde uvodi kao specijalan slučaj SMT u kojem broj materijalnih tačaka teži beskonačnosti, a veze između njih su krute. Krute veze između tačaka se posmatraju na način koji je razmatren u Kinematici iz prvom Dela, gde ne postoji mogućnost relativnog kretanja između bilo koje dve tačke KT. Pravi se razlika između krutog tela i krutog objekta. Naime, intuitivno shvatanje pojma „telo“ je trodimenzijski kontinuum u kojem je masa neprekidno raspoređena. Međutim, vrlo često, prilikom modelovanja neke krute strukture, mogu postojati prostorni kontinuumi raspoređene mase, koji su međusobno povezani krutim lakim elementima. Dodatno, na ovakav prostorni kontinuum (ili kontinuum) mogu, takođe, sa krutim lakim elementima biti povezane koncentrisane materijalne tačke. Ovakva (prostorna ili ravanska) kruta struktura koja zauzima određeni deo prostora, ali gde postoje delovi prostora bez mase, će u ovoj knjizi biti tretirana kao kruti objekat (KO). Konačno, ukoliko u prethodno opisanoj strukturi, neke od veza između pojedinih krutih masivnih delova (uključujući i koncentrisane mase), nisu krute, već takve da omogućuju određeno relativno kretanje između takvih masivnih delova, tada će se takav objekat tretirati kao materijalni sistem, a koji se razmatra u poslednjem, četvrtom Delu. Pristup predstavljen u ovoj knjizi, može olakšati korišćenje uvedenih razmatranja na primenu različitih softvera koji danas stoje na raspolaganju građevinskim i strukturalnim inženjerima. Pri tome, potrebno je uvek imati u vidu da, primena različitih softvera i metoda, može biti efikasna tek ukoliko su shvaćeni osnovni principi kretanja i mirovanja krutih i elastičnih objekata, a što sve zajedno čini inženjerski prilaz rešavanju problema. U prilog takvom pristupu je i ova knjiga.

Na kraju, veliku zahvalnost dugujem recenzentima ove knjige, prof dr Ivani Kovačić i prof dr Dragom Radomiroviću. Njihove sugestije i saveti, verujem, su značajno doprineli poboljšanju kvaliteta ove knjige. No, sve greške i nedostaci

koje ovo prvo izdanje ove knjige sigurno ima, padaju na teret autora. Iz tog razloga, biću zahvalan svima koji mi na to ukažu putem mejla: zvonko@uns.ac.rs

Emiliji, Ivani i Nikoli

U Sremu,
leta, 2021. godine

Zvonko Rakarić
vanr prof FTN Novi Sad