

## **P R E D G O V O R**

Dinamika konstrukcija sa zemljotresnim inženjerstvom predstavlja veoma aktuelnu i značajnu oblast Teorije konstrukcija, koja izučava uticaj dinamičkog opterećenja na konstrukcije, posebno zemljotresnog. U knjizi su date osnove neophodne za razumevanje problematike Dinamike konstrukcija i rešavanje problema vezanih za dinamički proračun građevinskih objekata. Knjiga je prvenstveno namenjena i prilagođena studentima akademskih studija građevinskih i arhitektonskih fakulteta. S obzirom da su posle svakog poglavlja urađeni i karakteristični numerički primeri, obrađena materija može biti korisna i inženjerima u praksi. Deo izložene materije se već decenijama izučava na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu, u okviru predmeta Stabilnost i dinamika konstrukcija na građevinskom, i na drugim predmetima na arhitektonskom smeru.

Od 2014. godine uvodi se predmet Dinamika konstrukcija sa zemljotresnim inženjerstvom, pa je zemljotresnom inženjerstvu posvećena posebna pažnja. Zbog obimnosti problematike sva razmatranja su ograničena samo na linijske nosače. Predznanje potrebno za razumevanje i praktičnu primenu datog teksta, koji prati i odgovarajuća zbirka rešenih zadataka, je poznavanje tehničke mehanike, statike konstrukcija linijskih nosača i osnove matricnog računa. Zbog specifičnosti seizmičkog opterećenja, a imajući u obzir da se celokupna teritorija naše zemlje nalazi u seizmički aktivnom području, to je ono najčešći oblik dinamičkog opterećenja na građevinske objekte. Iz tih razloga je i izložena materija inženjerske seizmologije i zemljotresnog inženjerstva, sa aspekta adekvatnog korišćenja naših tehničkih propisa iz ove oblasti i Evrokoda 8. U delu zemljotresno inženjerstvo, koje čini posebni i najobimniji deo ove knjige, u dodatku je dat i Evrokod 8, tj. proračun seizmički otpornih konstrukcija.

Sadržaj knjige je podeljen u pet delova. Prvi deo je Uvod. U drugom delu detaljno su razmatrani sistemi sa jednim stepenom slobode, gde su objašnjeni osnovni stavovi dinamike konstrukcija. Obradene su slobodne neprigušene i slobodne prigušene oscilacije. Obraden je opšti slučaj i specijalni slučajevi i to prinudne oscilacije sa harmonijskom poremećajnom silom. Sistemi sa više stepeni slobode obrađeni su u trećem delu, gde su obrađene slobodne neprigušene oscilacije i metode sračunavanja učestanosti. Velika pažnja je posvećena numeričkim primerima i korišćenju računara u proračunu građevinskih konstrukcija. U daljem tekstu su prikazane prinudne neprigušene oscilacije. Analiza prinudnih prigušenih oscilacija sistema sa više stepeni slobode data je primenom modalne analize. U četvrtom delu obrađeni su sistemi sa kontinualno raspoređenom masom, kao i približno rešavanje sistema sa beskonačno mnogo stepeni slobode. U petom i najobimnijem delu pod nazivom Zemljotresno inženjerstvo obrađena je analiza uticaja zemljotresa i u Dodatku je prikazan Evrokod 8.

Pored osnova inženjerske seizmologije, prikazan je i proračun objekata na dejstvo zemljotresa prema važećim tehničkim propisima na karakterističnim numeričkim primerima. Posebno je prikazano određivanje torzionih uticaja na primeru raspodele poprečne sile na zidove nesimetrične zgrade, a dat je i jednostavan model za obuhvatanje popustljivosti tla, tj. interakcije tlo-konstrukcija.

Seizmološka karta je data samo za povratni period od 500 godina, jer je ona relevantna za projektovanje objekata visokogradnje svrstanih u II-III kategoriju objekata jer se takvi objekti najčešće grade, a to su stambene zgrade, hoteli, rastorani, javne i industrijske zgrade koje nisu svrstane u prvu kategoriju, kao i pomoćno-proizvodne zgrade i agrotehnički objekti.

Potrebno je napomenuti da je značajna pažnja posvećena, u Dodatku, Evrokodu 8: Proračun seizmički otpornih konstrukcija, tj. Evropskom standardu. Bez obzira što je Srbija pridruženi član CEN-a, usvajanje Evropskih standarda je jedan od uslova za ulazak u Evropsku Uniju. Primena ovih propisa u zemljama Evropske zajednice povezana je sa donošenjem Nacionalnog dokumenta za primenu (NAD). Izrada takvog dokumenta u našoj zemlji je potrebna u okviru Evrokoda 8, jer su u četiri zemlje u okruženju već doneti propisi prema Evrokodu 8. Projektovanje i građenje seizmički otpornih konstrukcija u današnje vreme nije više posebno znanje pojedinih stručnjaka i naučnika, već je to deo redovnog obrazovanja građevinskih inženjera. Smatrao sam za potrebnim da buduće inženjere treba još sada upozanti sa Evropskim standardima za zgrade i mostove u delu koji se odnosi na Evrokod 8 (EC8) iako to još uvek nisu naši propisi, i njihova primena nije naša obaveza. Treba imati u vidu da će naši stručnjaci računati i graditi objekte i za inostranstvo, u zemlji i van zemlje. pri čemu je potrebna primena EC8.

Pri koncipiranju ovog udžbenika korišćena je knjiga Dinamika konstrukcija izdata zajedno sa profesorom Milićem Milićevićem (1984).

Autor očekuje da će ovaj udžbenik pomoći studentima u uspešnom savlađivanju gradiva iz Dinamike konstrukcija i zemljotresnog inženjerstva, a građevinskim inženjerima pomoći pri projektovanju objekata i rešavanju ovih problema u inženjerskoj praksi.

Autoru je prijatna dužnost da se zahvali prof. dr Tomislavu Igiću i prof. dr Marini Mijalković, na uloženom trudu i datim sugestijama pri recenziji rukopisa. Autor se zahvaljuje docentu dr Draganu Zlatkovu, kao i kolektivu „Projektinženjering Tim“ i izdavačkom preduzeću „AGM knjiga“ za uspešnu realizaciju publikovanja ove knjige.

Zapažanja, sugestije i primedbe, ako ih ima, dostaviti autoru koji će ih sa zahvalnošću prihvatiti.

**Niš, januar 2017. godine**

**Autor**

## **S A D R Ź A J**

<b>I</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>II</b>	<b>SISTEMI SA JEDNIM STEPENOM SLOBODE.....</b>	<b>19</b>
2.1	Slobodne oscilacije sistema sa jednim stepenom slobode.....	19
2.1.1	Slobodne neprigušene oscilacije.....	19
2.1.2	Numerički primeri.....	24
2.1.3	Slobodne prigušene oscilacije sa viskoznim otporima.....	31
2.1.4	Numerički primeri.....	36
2.2	Prinudne prigušene oscilacije sistema sa jednim stepenom slobode.....	38
2.2.1	Opšti slučaj.....	38
2.2.2	Specijalni slučajevi.....	39
2.2.2.1	Prinudne oscilacije sa harmonijskom poremećajnom silom.....	39
2.2.2.2	Numerički primeri.....	44
2.2.2.3	Eksperimentalno određivanje oscilacija.....	55
2.2.2.4	Uticaj naglog opterećenja.....	57
2.2.2.5	Opterećenje impulsom.....	59
2.2.2.6	Numerički primeri.....	62
2.2.2.7	Proizvoljna poremećajna sila.....	64
2.2.2.8	Numerički primeri.....	67
<b>III</b>	<b>SISTEMI SA VIŠE STEPENI SLOBODE.....</b>	<b>69</b>
3.1	Slobodne neprigušene oscilacije sistema.....	69
3.1.1	Diferencijalna jednačina kretanja.....	69
3.1.2	Rešenje problema slobodnih neprigušenih oscilacija sistema.....	73
3.2	Metode sračunavanja učestanosti.....	79
3.2.1	Metoda iteracije.....	80
3.2.2	Metode Stodole i Holcera.....	81
3.2.3	Metode spektralnih funkcija.....	84
3.2.4	Numerički primer.....	85
3.3	Prinudne neprigušene oscilacije sistema sa više stepeni slobode.....	92
3.3.1	Opšti slučaj.....	92
3.3.2	Slučaj kada su prinudne sile harmonijske, sinhrono i sinfazne funkcije.....	97
3.3.3	Numerički primeri.....	100
3.4	Analiza prinudnih prigušenih oscilacija sistema sa više stepeni slobode primenom modalne analize.....	109
3.4.1	Modalna analiza.....	109
3.5	Numerička integracija korak po korak.....	112
3.5.1	Metoda sa konstantnim ubrzanjem (Newmark-ov postupak).....	113
3.5.2	Tačnost i stabilnost metoda numeričkih integracija.....	115
<b>IV</b>	<b>OSCILACIJE SISTEMA SA KONTINUALNO RASPODELJENOM MASOM</b>	<b>117</b>
4.1	Osnovne jednačine linijskih nosča u ravni u dinamici konstrukcija.....	117
4.1.1	Osnovne diferencijalne jednačine štapa u dinamici konstrukcija.....	117

4.1.2	Osnovne jednačine sistema u dinamici konstrukcija.....	119
4.1.3	Poprečne oscilacije pravih prizmatičnih štapova.....	122
4.1.3.1	Slobodne oscilacije proste grede.....	123
4.1.3.2	Slobodne oscilacije konzole.....	126
4.2	Sistemi sa konačnim brojem stepeni slobode.....	127
4.2.1	Metode zamene kontinualno raspodeljene mase diskretnim skupom koncentrisanih masa.....	128
4.2.1.1	Prosta greda.....	129
4.2.1.2	Konzolna greda.....	129
4.2.1.3	Uklještena greda.....	129
4.2.2	Torzione oscilacije.....	129
4.2.2.1	Primer – konzolni nosač kružnog poprečnog preseka.....	130
<b>V</b>	<b>ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO .....</b>	<b>133</b>
5.1	Uvod.....	133
5.2	Zemljotresi kao prirodni fenomeni.....	134
5.2.1	Parametri zemljotresa.....	135
5.2.1.1	Magnituda zemljotresa i intenzitet zemljotresa.....	140
5.2.1.2	Skala seizmičkog intenziteta Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK-64).....	144
5.2.1.3	Kratak prikaz Evropske makroseizmičke skale EMS-98.....	149
5.2.1.4	Vibracije seizmičkih talasa kroz tlo.....	151
5.2.2	Uticao vrste tla na stepen seizmičnosti, seizmička rejonizacija i mikrorejonizacija.....	153
5.2.3	Određivanje seizmičkih sila.....	155
5.2.3.1	Metoda direktne dinamičke analize.....	156
5.2.3.2	Metoda spektralne analize.....	157
5.2.4	Sistemi sa jednim stepenom slobode.....	158
5.2.4.1	Sprektri odgovora i projektni spektri.....	158
5.2.4.2	Projektni spektri.....	160
5.2.5	Sistemi sa više stepenom slobode.....	162
5.2.5.1	Upotreba spektra odgovora.....	164
5.2.5.2	Analiza višespratnih sistema spektralnom teorijom.....	165
5.3	Nosivost i duktilnost.....	173
5.4	Osnovna načela u zemljotresnom inženjersvom.....	177
5.5	Adaptacija i rekonstrukcija postojećih objekata.....	181
5.6	Proračun objekta na dejstvo zemljotresa prema važećim tehničkim propisima.....	181
5.6.1	Izvodi iz važećih tehničkih propisa za objekte visokogradnje (1981).....	182
5.7	Osnovni principi projektovanja građevinskih objekata izloženih dejstvu zemljotresa.....	195
5.8	Numerički primeri .....	210
5.8.1	Primer 1 – AB trobrodni okvirni nosač.....	210
5.8.2	Primer 2a – Antenski stub – Proračun prema Pravilniku za objekte visokogradnje .....	218
5.8.3	Primer 2b – Antenski stub – Proračun prema nacrtu Pravilnika za inženjerske objekte .....	230
5.8.4	Primer 3 – trospratna zgrada.....	237
5.9	Interakcija konstrukcije i tla.....	247
5.9.1	Jednostavni model za popustljivost tla.....	248

## *Dinamika konstrukcija sa zemljotresnim inženjrstvom*

5.9.2	Formulisanje parametara saradnje tla i konstrukcija na realnim objektima.....	249
5.10	Dodatak EC8.....	252
5.10.1*	Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade EN 1998-1:2004.....	252
5.10.1.1	Opšte napomene.....	252
5.10.1.2	Zahtevi ponašanja i graničnih stanja.....	256
5.10.1.3	Granična stanja.....	258
5.10.1.4	Posebne mere pri projektovanju.....	259
5.10.2	Uslovi tla i zemljotresno dejstvo.....	259
5.10.2.1	Uslovi i klasifikacija tipova tla prema EC8.....	259
5.10.2.2	Seizmičko dejstvo.....	261
5.10.3	Osnovna prikazivanja zemljotresnog dejstva prema EC8.....	262
5.10.3.1	Horizontalni elastični spektar odgovora.....	262
5.10.3.2	Vertikalni elastični spektar odgovora.....	263
5.10.3.3	Projektno pomeranje tla.....	264
5.10.3.4	Projektni spektar za elastičnu analizu.....	264
5.10.3.5	Alternativna prikazivanja zemljotresnog dejstva.....	265
5.10.4	Osnovni principi seizmički otpornih konstrukcija zgrada prema EC8.....	266
5.10.4.1	Izbor konstruktivnog sistema.....	266
5.10.4.2	Izbor povoljne konfiguracije zgrade po osnovi i po visini.....	267
5.10.4.3	Obezbeđivanje rezervne nosivosti konstruktivnog sistema.....	268
5.10.5	Analiza konstrukcije.....	269
5.10.5.1	Proračunski model.....	269
5.10.5.2	Metode analize.....	270
5.10.5.3	Kombinacije efekata komponenata seizmičkog dejstva.....	280
5.10.5.4	Proračun pomeranja.....	282
5.10.5.5	Nenoseći elementi.....	282
5.10.6	Procena stanja oštećenja i ojačanja zgrada EN 1998-3:2005.....	283
5.10.6.1	Zahtevi ponašanja i granična stanja.....	283
5.10.6.2	Podaci za procenu stanja konstrukcije.....	284
5.10.6.3	Procena stanja.....	284
5.10.6.4	Odluke o konstrukcijskim intervencijama.....	284
5.10.6.5	Projekat konstrukcijske intervencije.....	285
5.10.6.6	Deo 3: Informativni aneksi.....	285
5.10.7	Seizmička analiza mostova.....	286
5.10.7.1	Osnovne postavke EN 1998-2:2004(5).....	286
5.10.8	Kontrola ponašanja konstrukcija pri dejstvu zemljotresa.....	291
5.10.8.1	Elementi za seizmičku izolaciju i apsorpciju.....	292
5.11	Kontrola kvaliteta gradnje.....	296
5.11.1	Procena štete.....	297
5.12	Seizmički hazard kao najvažniji element seizmičkog rizika.....	299
	<b>Oznake.....</b>	<b>302</b>
	<b>Indeks pojmova.....</b>	<b>304</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>312</b>
	<b>O autoru.....</b>	<b>317</b>



## **I. UVOD**

Dinamika konstrukcija je deo Teorije konstrukcija koji se bavi proučavanjem stanja naprezanja i stanja deformacije konstrukcija pri dinamičkom opterećenju na bazi zakona Dinamike.

Zavisno od vrste nosača, u Dinamici konstrukcija se može govoriti o dinamici linijskih nosača u ravni i u prostoru, kao i o dinamici površinskih nosača. U zavisnosti od ponašanja materijala pod opterećenjem može se govoriti o elastičnom, plastičnom ili elastoplastičnom ponašanju konstrukcije pri dinamičnom opterećenju.

U ovom kursu biće govora o Dinamici elastičnih linijskih nosača u ravni, čije je izučavanje proizašlo uglavnom iz dva razloga:

- današnje inženjerske konstrukcije su sve elegantnije, odnos stalnog i korisnog opterećenja postaje sve izraženiji u smislu da je uticaj korisnog opterećenja sve dominantniji. S obzirom da su realna statička opterećenja strogo uzevši ne tako česta, a da dinamička opterećenja izazivaju dinamičke uticaje koji su utoliko veći ukoliko su konstrukcije vitkije.
- veliki deo teritorije naše zemlje leži u seizmički aktivnim područjima, pa zato se nameće potreba da se građevinske konstrukcije analiziraju na uticaj zemljotresa u cilju obezbeđenja njihove sigurnosti i pri ovim uticajima.

U Statici konstrukcija opterećenje u toku vremena ne menja ni intenzitet, ni položaj, ni pravac, ni smer. Ono se nanosi na konstrukciju postepeno tako da se u konstrukciji ne pojave značajna ubrzanja čestica (mase) konstrukcije. Intenzitet takvog opterećenja raste od nule do svoje pune vrednosti postupno i zadržava stalni karakter.

Dinamička opterećenja su ona koja u toku vremena menjaju ili mogu menjati položaj, intenzitet, pravac i smer. Ovo dovodi do pojave ubrzanja čestica nosača na koji deluju kao i na pojavu inercijalnih sila u nosaču, što ima za posledicu složeniju analizu stanja naprezanja i deformacije koji se pojavljuju u nosačima za razliku od one u Statici konstrukcija. Ova se analiza svodi na dinamički proračun konstrukcija i analizu pojave resonance u konstrukciji.

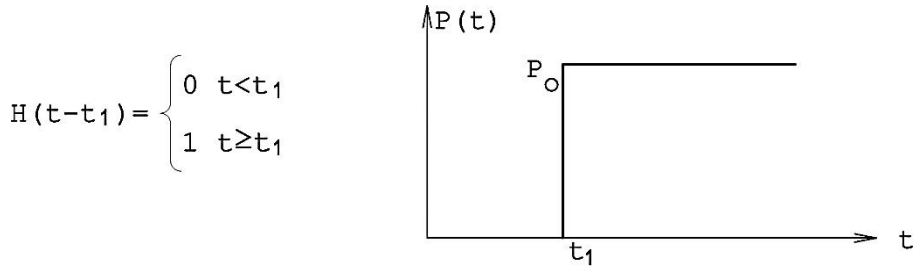
Vrste i podela dinamičkog opterećenja. Osnovne vrste dinamičkog opterećenja su:

- udarno opterećenje;
- vibraciono opterećenje.

Udarna opterećenja su opterećenja koja se naglo nanose na konstrukciju i ostaju na

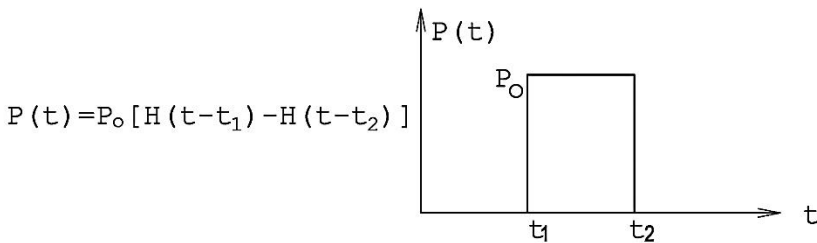
njoj duže ili kraće vreme. Udarno opterećenje može biti periodično i aperiodično. Periodično opterećenje je opterećenje koje se ponavlja u jednakim vremenskim razmacima ( $t$ ). Posebni slučaj periodičnog opterećenja je harmonijsko periodično opterećenje.

Naglo naneto opterećenje takođe pripada dinamičkom opterećenju  $P(t) = P_0 H(t-t_1)$  gde je sa  $H(t-t_1)$  obeležena Hevisajdova (Heaviside) funkcija (Slika 1.1).



**Slika 1.1 Naglo naneto opterećenje - Hevisajdova funkcija**

Opterećenje konačnim impulsom može se prikazati preko razlike Hevisajdovih funkcija (Slika 1.2).



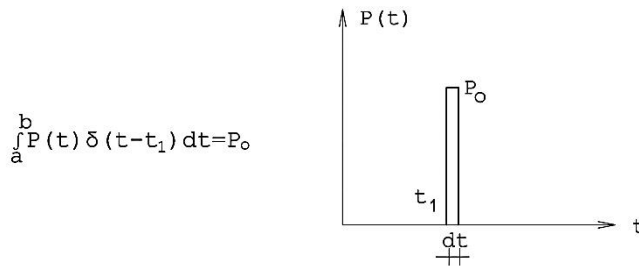
**Slika 1.2 Konačni impuls prikazan Hevisajdovom funkcijom**

Impuls sile takođe spada u udarna opterećenja. On predstavlja proizvod sile (koja deluje veoma kratko vreme, a najčešće je visokog intenziteta) i vremena za koje ta sila deluje.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (1.1)$$

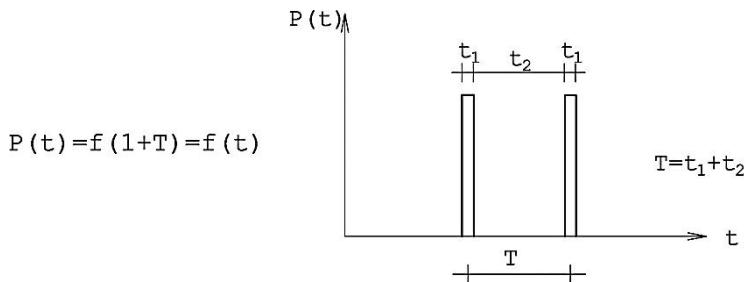
Dejstvo impulsa (Slika 1.3) moguće je matematički tretirati uvodeći Dirakovu (Dirac) ili “delta” ( $\delta$ ) funkciju, nazvanu ponekad i jedinični impuls, koji se obeležava simbolom  $\delta(t-t_1)$ .





Slika 1.3 Dirakova ( $\delta$ ) funkcija – jedinični impuls

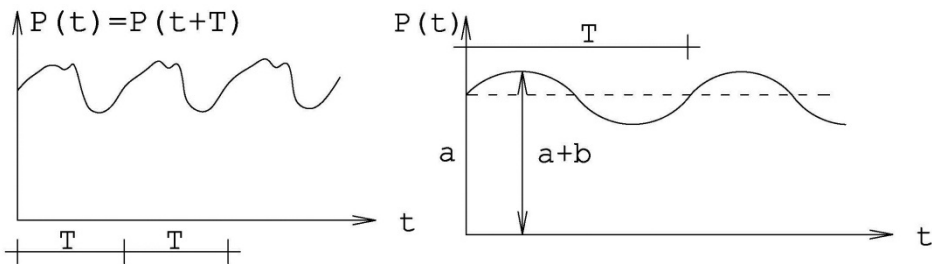
I impuls može biti periodičan. Primer (periodičnog ili aperiodičnog) udarnog opterećenja je i udar kovačkog čekića (Slika 1.4).



Slika 1.4 Udarno opterećenje prikazano periodičnim impulsima

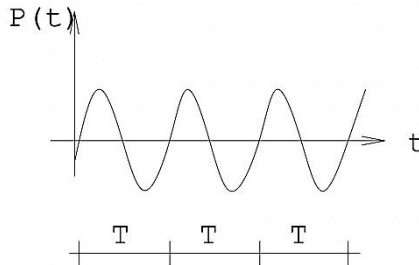
Naglo izlaganje konstrukcije dejstvu temperature (toplinski udar) izaziva takođe oscilovanje konstrukcije.

Vibraciono opterećenje se učestano menja u toku vremena (vibrira), najčešće periodično (Slika 1.5). Ovakvo opterećenje nastaje obično usled rada nekoliko mašina koje su povezane sa rotacijom ekscentrično postavljenih masa.



Slika 1.5 Harmonijsko periodično opterećenje

Vibraciono opterećenje koje se menja po sinusnom ili kosinusnom zakonu naziva se harmonijsko periodično opterećenje. Kada je srednja vrednost ovog opterećenja nula, ono se naziva oscilatorno opterećenje (Slika 1.6).



**Slika 1.6 Oscilatorno opterećenje**

Vibraciona opterećenja su nepovoljna zbog toga što i pri malim vrednostima intenziteta opterećenja može doći do loma konstrukcije, ako dođe do pojave rezonance. Do pojave rezonance dolazi onog trenutka kada se frekvencije opterećenja poklope sa nekom od sopstvenih frekvencija sistema.

Slučajna (stihijna, stohastička) opterećenja su takva opterećenja koja se kroz vreme menjaju potpuno nepravilno (Slika 1.7). Ona se javljaju pri dejstvu zemljotresa, kao i u nekim drugim slučajevima. Pri matematičkoj analizi ovih problema moraju se koristiti metode numeričke analize, kao i matematičke statistike i računa verovatnoće.



**Slika 1.7 Slučajno – stihijno opterećenje**

Dinamička temperaturna opterećenja nastaju pri naglom izlaganju konstrukcije dejstvu temperature (na primer pri požaru) izazivajući inercijalnu silu, pa dolazi do pojave njenog oscilovanja.

Dinamičko pomeranje oslonaca javlja se pri zemljotresima kada temelji konstrukcije dobijaju pomeranja, odnosno ubrzanja usled seizmičkih talasa, što

predstavlja najznačajniji vid dinamičkog opterećenja, od izuzetnog značaja u građevinskom konstrukterstvu.

Dinamičko opterećenje deluje složenije na konstrukciju od statičkog, pa je i Dinamika konstrukcija složenija od Statike (kao nauke) u izboru i strukturi metoda rešavanja problema.

Metode dinamičkog proračuna. Dinamički proračun konstrukcija sastoji se od određivanja unutrašnjih sila i pomeranja usled dinamičkih uticaja poznatih veličina i karaktera, ili od provere sistema na pojavu rezonancije pri periodično promenljivim opterećenjima. Postoji više metoda dinamičkog proračuna, ali se ipak sve one mogu svrstati u dve osnovne grupe i to:

- statičke metode;
- energetske metode.

Statičke metode se zasnivaju na činjenici da se problemi Dinamike konstrukcija mogu rešavati primenom Dalamberovog (D'Alambert) principa ili Langraževih (Lagranže) jednačina kretanja druge vrste, koje se mogu postaviti u obliku jednačina ravnoteže.

Energetske metode baziraju se na analizi promene kinetičke i potencijalne energije sistema u toku njegovog kretanja pod dinamičkim opterećenjem i činjenici da je zbir potencijalne i kinetičke energije sistema koji se kreće, pod dejstvom konzervativnih sila, u svakom trenutku vremena konstantna vrednost.

Podela sistema prema broju stepeni slobode.

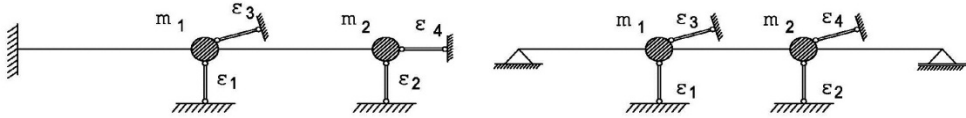
U Dinamici konstrukcija, pod brojem stepeni slobode nosača podrazumeva se broj nezavisnih parametara koji određuju pomeranje čvorova u kojima su koncentrisane mase jednog nosača. To znači da je broj stepeni slobode u dinamici konstrukcija određen minimalnim brojem elemenata koje treba dodati dinamičkoj rešetki sistema da bi se sprečilo pomeranje svih čvorova u kojima se nalaze koncentrisane mase.

Prema broju stepeni slobode dele se na:

- sisteme sa jednim stepenom slobode;
- sisteme sa dva i više stepeni slobode;
- sisteme sa beskonačno mnogo stepeni slobode.

Broj stepeni slobode jednog sistema određuje sa jedne strane njegova geometrija, a sa druge broj masa koje sačinjavaju taj sistem. U osnovi svi sistemi sa kontinualno raspodeljenom masom su sa beskonačno mnogo stepeni slobode. Međutim, u zavisnosti od masa nosača i korisnog opterećenja, vrlo često se može ili masa nosača potpuno zanemariti ili na neki drugi način približno uzeti u obzir, a time i broj stepeni slobode svesti na konačan.

Primeri: Zanemarujući sopstvenu težinu nosača, mase u ravni na Slici 1.8 imaju po dva stepena slobode.



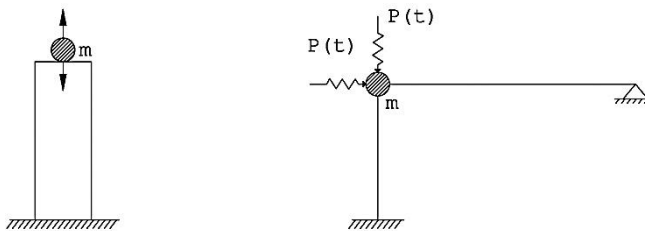
Slika 1.8 Sistemi sa dva stepena slobode

Zavisno od karaktera oscilacija, tj. od fizičkih osobina nosača, često se uzima u obzir pretpostavka da se pomeranja u pravcu ose štapa mogu zanemariti, što je ekvivalentno zanemarenju dejstva normalnih sila. Posle uvođenja ove pretpostavke broj stepeni slobode se smanjuje na po jedan stepen slobode svake mase, pa shodno tome sistemi na Slici 1.9 imaju po jedan stepen slobode.



Slika 1.9 Sistemi sa jednim stepenom slobode

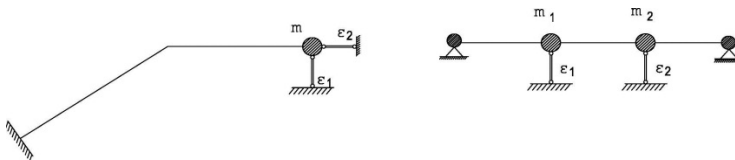
Međutim, zanemarenja pomeranja u pravcu ose štapa nisu uvek moguća, kao na primer kod sistema na Slici 1.10.



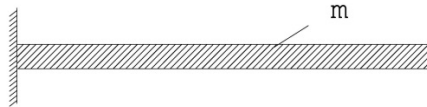
Slika 1.10 Sistemi kod kojih je dejstvo u pravcu ose štapa

S obzirom da kod primera na Slici 1.10 postoje pomeranja samo u pravcu ose štapa, tj. uzdužne oscilacije, to se one ne mogu zanemariti jer su jedine.

Primeri na Slici 1.11 su sistemi sa dva stepena slobode, dok je sistem na Slici 1.12 sa beskonačnim brojem stepeni slobode.



Slika 1.11 Sistemi sa dva stepena slobode sa jednom ili sa dve mase



**Slika 1.12 Sistem sa beskonačnim brojem stepeni slobode**

Oscilovanje sistema tj. čestice (mase). Svi realni nosači se pod uticajem bilo kakvog opterećenja deformišu, tj. mase se pomeraju. Pod dinamičkim opterećenjem mase nosača se takođe pomeraju, ali s obzirom na karakter opterećenja i pod pretpostavkom da je nosač sposoban da primi takvo opterećenje ta su pomeranja masa nosača najčešće oscilatorna kretanja oko položaja statičke ravnoteže. Prema načinu delovanja spoljašnjih uzroka koji ih izazivaju, ove oscilacije delimo na dve osnovne grupe:

- slobodne (sopstvene) oscilacije,
- prinudne oscilacije.

Slobodne (sopstvene) oscilacije nastaju kada se sistem na bilo koji način izvede iz stanja statičke ravnoteže, a zatim prepusti sam sebi. Nadalje na sistem ne deluju nikakve spoljašnje sile i on vrši slobodne ili sopstvene oscilacije.

Prinudne oscilacije su one oscilacije pri kojima sistem osciluje zajedno sa dinamičkim opterećenjem koje trajno ostaje na njemu i u tom slučaju je prinuđen da stalno vrši oscilacije uz prisustvo dinamičkog opterećenja.

Prema sredini u kojoj se događaju, oscilacije mogu biti:

- neprigušene – neamortizovane oscilacije,
- prigušene – amortizovane oscilacije.

Neprigušene oscilacije, za razliku od prigušenih, nastaju onda kada se u toku vremena ne pojavljuju nikakvi otpori sredine u kojoj se vrše ove oscilacije, ne pojavljuju se otporne sile, tj. sredina je idealna. U realnoj sredini takve oscilacije ne postoje, jer se javljaju otporne sile koje žele da spreče ili umanje ovo kretanje. Pod sredinom se podrazumeva medijum u kome se nalazi analizirani nosač. Takođe se i sam nosač, zavisno od unutrašnjih otpora i osobina materijala suprotstavlja oscilovanju.

I sopstvene i prinudne oscilacije mogu biti neprigušene i prigušene.

Zemljotresno inženjrstvo izučava dejstvo seizmičkog opterećenja a to je stihijno kretanje, udari i vibracije usled delovanja zemljotresa. Pri ovome dolazi do dinamičkog pomeranja oslonca, tj. do pomeranja konstrukcije. Dinamičke metode za analizu prinudnih vibracija koje nastaju usled pomeranja tla izučavaju ponašanje odgovora dinamičkih modela, pa se tako došlo do nekih zaključaka o zavisnosti maksimalnog ubrzanja od perioda svojstvenih frekvencija. Takvim postupkom je dobijen niz tzv. „spektara odgovora” (odzivnih spektara, „response spectra”), koji pokazuju maksimalne amplitude u funkciji bilo pomeranja, bilo napona, bilo

ubrzanja itd. svih mogućih linijskih sistema sa jednim stepenom slobode u odnosu na neki dati uzrok, na primer pomeranje tla. Dakle, spektar odgovora pokazuje kako neki dinamički sistem reaguje pri različitim vrednostima sopstvenih frekvencija i odgovarajućeg prigušenja. Korišćenjem metode razvijanja prinudnih vibracija kod diskretnih sistema sa “n” stepeni slobode po sopstvenim oblicima (tonovima) i primenom spectra odgovora može se vršiti proračun objekata na zemljotresne uticaje.

Zemljotresno inženjerstvo je grana inženjerstva posvećena smanjenju, odnosno ublažavanju seizmičkog rizika kroz planiranje, projektovanje, građenje i upravljanje objektima i opremom čija se otpornost na zemljotres zahteva i uslovljava. To je jedna veoma kompleksna i široka oblast, sa mnogo specifičnosti u odnosu na ostala inženjerska područja, počev od socio-humanitarnih preko tehničkih do onih koje izražavaju ekonomsku moć zemlje, odnosno regiona sa aspekta prihvatljivog nivoa seizmičkog rizika. U vezi sa prethodnim treba naglasiti da racionalno planiranje i projektovanje objekata otpornih na zemljotres počiva na multidisciplinarnosti. Mnogo raznih disciplina uključeno je u ovu oblast kao što su: građevinsko-konstruktivno inženjerstvo, seizmologija, geologija, ekonomija, društvene nauke, arhitektura, prostorno-urbanističko planiranje, javna politika itd.

Prema navedenom potrebno je ispuniti dva najvažnija osnovna zahteva kod projektovanja seizmički otpornih objekata. Prvi zahtev je da u slučaju zemljotresa gubici ljudskih života, broj povređenih i ukupno oštećenje budu minimalni. Drugi zahtev je da troškovi opravke, odnosno rehabilitacije oštećenih objekata ne bi trebalo da prevaziđu uvećane troškove projektovanja, izgradnje i finansiranja. Napred navedeno moglo bi se preduprediti adekvatnijim konstruisanjem objekata otpornih na dejstvo seizmičkih uticaja.

## **5.12 Seizmički hazard kao najvažniji element seizmičkog rizika**

Za potrebe projektovanja i proračuna uticaja seizmičkih sila najvažniji je seizmički hazard maksimalnog horizontalnog ubrzanja oscilovanja tla za vreme zemljotresa. Seizmički hazard definisan je sa tri međusobno zavisna elementa, veličinom parametra oscilovanja tla, povratnim periodom i verovatnoćom realizacije takvog događaja, uzimanjem u obzir brojne podatke i primenu određenog matematičkog postupka. Nivo seizmičkog rizika predstavlja povredljivost objekta, odnosno urbanog elementa za odgovarajući povratni vremenski period, nivo i verovatnoću pobude. Često se u svakodnevnoj inženjerskoj praksi, ponekad i u stručnoj literaturi, poistovećuju pojmovi seizmičkog rizika i seizmičkog hazarda, iako ovi termini imaju sasvim različito značenje u definisanju zemljotresa kao prirodnog fenomena.

Pristup u borbi protiv ove nepogode (stihije) odvija se u tri pravca i to: svestrano izučavanje prirode samog fenomena („ognjišna seizmologija“), izučavanje interakcije geološke sredine, zemljotresa i objekata („površinska seizmologija“) i izučavanje građevinskih konstrukcija u uslovima dinamičkog opterećenja („zemljotresno inženjstvo“). Izučavanje ovog veoma složenog fenomena podrazumeva multidisciplinarni i u isto vreme interdisciplinarni pristup. Sam proces pojavljivanja zemljotresa sa statističkog aspekta predstavlja jedan stohastički proces, odnosno matematički model datog fizičkog sistema koji se menja u saglasnosti sa zakonom verovatnoće (Lomnitz, 1976). Kao metoda za proračun seizmičkog hazarda, koji uključuje i primenu Poisson-ovog modela generisanja potresa, usvojena je metoda Algermisena (UNESCO, 1975). Poisson-ov statistički proces predstavlja stohastički proces koji izražava položaj pojedinog slučajnog događaja (u ovom slučaju zemljotresa) u vremenu pa se koristi pri proračunu seizmičkog hazarda:

$$P = \frac{m^x \cdot e^{-m}}{x!} \quad (1)$$

Ista takva formula koristi se kod određivanja verovatnosti pojave (n) zemljotresa, određene magnitude (M) u vremenu (t), koja se piše u obliku:

$$P_{(n,t,\lambda)} = \frac{[\lambda(n)t]^n \cdot e^{-\lambda(M)t}}{n!} \quad (2)$$

gde je:

$P_{(n,t,\lambda)}$  - verovatnoća pojave (n) potresa magnitude veće ili jednake (M)

n - broj zemljotresa,

- m - broj ponovljivih slučajeva,  
 $\lambda$  - srednja veličina broja zemljotresa određene magnitude u jedinici vremena (1 godina).

Na taj način ( $\lambda$ ) je jednako (N).

Pošto je veza između učestanosti pojavljivanja, odnosno broja zemljotresa (N) i magnitudee (M) data izrazom:

$$\log N = a - bM \quad (3)$$

$N = 10^{(a-bM)}$ , a  $N = \lambda$ , dobija se:

$$P_{(n,t,\lambda)} = \frac{[10^{(a-bM)} \cdot t]^n \cdot e^{-10^{(a-bM)}}}{n!} \quad (4)$$

gde je:

- N - broj potresa određene magnitude M za određeni broj godina,  
 $a, b$  - konstante relacije koje karakterišu datu žarišnu oblast.

Za određivanje verovatnoće pojave zemljotresa najvažnije je odrediti odnos između magnitude zemljotresa i učestanosti pojavljivanja zemljotresa.

Poisson-ov model, kako je već rečeno, se najčešće koristi kod proračuna seizmičkog hazarda, odnosno određivanja verovatnoće pojave akceleracije. U tom slučaju umesto magnitude (M), uzima se akceleracija izazvana tom magnitudom, a odnos između njih određuje se odgovarajućom atenuacionom funkcijom.

Zemljotres se ne može sprečiti ali se njegove posledice mogu umanjiti. Seizmički rizik se definiše kao očekivani stepen gubitaka prouzrokovanih efektima zemljotresa: rušenjem i oštećenjem objekata, povredama i gubicima ljudskih života, direktnim i indirektnim ekonomskim, funkcionalnim, socijalnim i drugim štetama. Seizmički hazard definiše se kao deo prirodnog hazarda i predstavlja verovatnoću pojavljivanja zemljotresa odgovarajućih karakteristika (intenzitet, brzina, ubrzanje oscilovanja tla itd.) u određenom periodu na određenom mestu.

$$F_{(n,a,t)} = \frac{\lambda(a) \cdot t^n \cdot e^{-\lambda(a)t}}{n!} \quad (5)$$

Znači verovatnoća da se u vremenu (t) dogodi (n) akceleracija sa iznosom većim ili jednakim ( $a$ ), data je izrazom (5).

Osnovni integrativni aspekti smanjenja seizmičkog rizika, tretirajući ih istovremeno i kao bitne elemente jedinstvenog integralnog koncepta, mogu se označiti: 1) utvrđivanje seizmičkog hazarda, 2) aseizmičko projektovanje, 3) prostorno-urbanističko planiranje, 4) mitigacija (umanjenje) seizmičkog rizika, 5) pripremljenost na zemljotres i 6) upravljanje seizmičkim rizikom, kako bi se



neprihvatljiv rizik smanjio na prihvatljive nivoe. Prilikom zaštite od dejstva zemljotresa mora se imati poseban osvrt na neka relevantna etička pitanja koja su u neposrednoj vezi sa zemljotresnim inženjersvom i seizmičkim rizikom uopšte, što se čini iz veoma opravdanih i krajnje aktuelnih razloga, jer je čovekov život neponovljiv, nemerljiv i neprocenljiv.

Eksperimentalno ispitivanje objekta u prirodnoj veličini vrši se pomoću generatora vibracija, ambijent vibracijama ili na vibro platformi.