

Dinamičko ispitivanje konstrukcija

Dr. sc. Vladimir Sigmund

Dr. sc. Ivica Guljaš

Svojstva dinamičkih opterećenja

- nosivost konstrukcije

- čvrstoća, fleksibilnost i stabilnost konstrukcije izložene djelovanju dinamičkih opterećenja nije ista kao za statičko djelovanje opterećenja
 - čvrstoća materijala pri promjenjivu opterećenju ovisi o:
 - maksimalnom naprezanju ciklusa
 $\sigma_{\max}$ ili $\tau_{\max}$
 - minimalnom naprezanju ciklusa
 $\sigma_{\min}$ ili $\tau_{\min}$
 - srednjem naprezanju ciklusa
 σ_{sr}
 $= (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$
 - amplitudi ciklusa
 σ_{sr}
 $= \text{ABS}((\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2)$
 - koeficijentu asimetričnosti ciklusa
 $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$
 - karakteristikama ciklusa
 $\rho = \sigma_a / \sigma_{sr} = (1 - r) / (1 + r)$
- materijal izložen djelovanju ciklički promjenjivog opterećenja razara se pri naprezanju manjem od statičke čvrstoće materijala (umor materijala)
 - najveće naprezanje ciklusa pri kojem materijal može izdržati bez razaranja unaprijed zadano broj promjena ciklusa N pri danom koeficijentu asimetričnosti ciklusa se naziva vremenskom dinamičkom čvrstoćom materijala (Woehlerova krivulja)

– faktori koji utječu na dinamičku čvrstoću materijala su:

- koncentracija naprezanja
- apsolutne dimenzije elementa
- površinsko stanje elementa
- frekvencija ciklusa
- temperatura

– dinamička čvrstoća je $\gamma = \sigma_{dop} / \sigma_{rdop} > 1$

- podobnost konstrukcije za dinamička opterećenja

– tehnološka ograničenja nivoa vibracija

- osjetljivi instrumenti, tehnološki zahtjevi

– ograničenja nivoa vibracija radi subjektivnog doživljaja

- vibracije u zgradama i na mostovima
- fiziološka djelovanja na ljude

– ograničenja dopustivog područja frekvencija radi moguće rezonancije

- vlastite frekvencije tribina na stadionima
- vlastite frekvencije visokih dimnjaka

Svrha ispitivanja:

- Svrha dinamičkog ispitivanja:
 - odrediti dinamičke karakteristike konstrukcije (tonove, forme, prigušenje)
 - odrediti dinamički koeficijent za određeno opterećenje
 - odrediti frekvenciju i amplitude prisilnih vibracija
 - odrediti veličinu maksimalnog naprezanja u konstrukciji pri dinamičkom djelovanju
 - utvrđivanje osnovnih karakteristika dinamičkih procesa
 - utvrđivanje stanja konstrukcije
 - utvrđivanje dinamičkih karakteristika materijala
- Cilj
 - određivanje veličine dinamičkih opterećenja i njihova utjecaja na nosivost, fleksibilnost, trajnost;
 - ocjena mogućnosti smještaja određenih strojeva na konstrukciju;
 - utvrđivanje metoda za umanjenje djelovanja dinamičkih opterećenja;
 - utvrđivanje i praćenje stanja konstrukcija

- Faze:

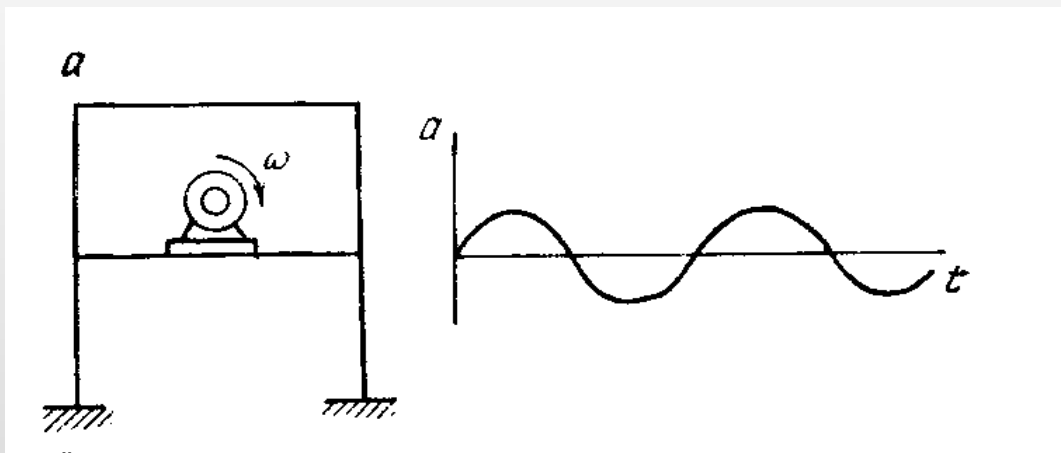
- projekt ispitivanja
- izvodjenje ispitivanja
- analiza rezultata ispitivanja
- izrada Izvještaja o ispitivanju
- prijedlog ev. potrebne sanacije ili rekonstrukcije

- Projekt ispitivanja

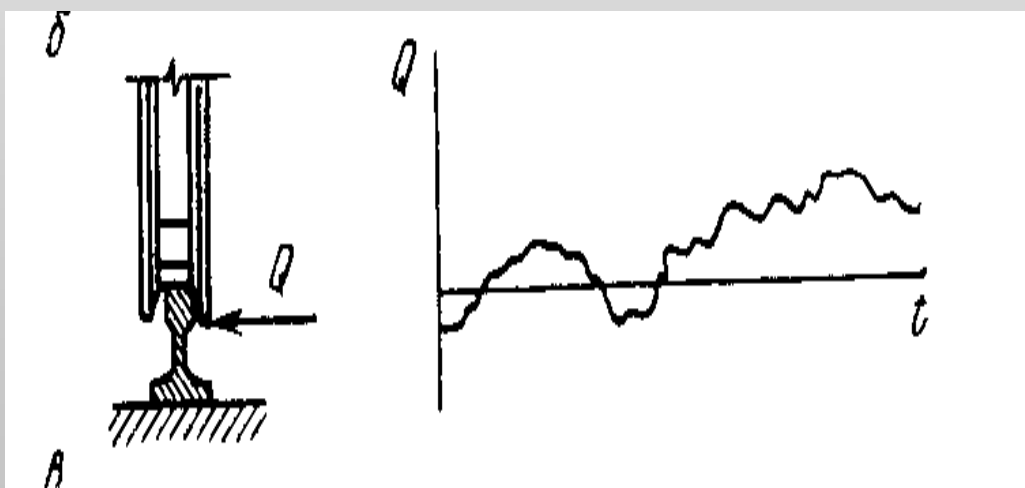
- definirati zadatak i opseg ispitivanja i uskladiti ga s mogućnostima
- prethodni pregled konstrukcije, analiza konstrukcijskog sustava, ocjena situacije
- odrediti način dinamičkog djelovanja na konstrukciju i mjesto na koje će se djelovati
- odabir parametara koji će se mjeriti, instrumenti i njihov razmještaj
- organizacijska shema ispitivanja
- poduzeti mjere za slučaj neželjenog tijeka ispitivanja

Vrste dinamičkih opterećenja

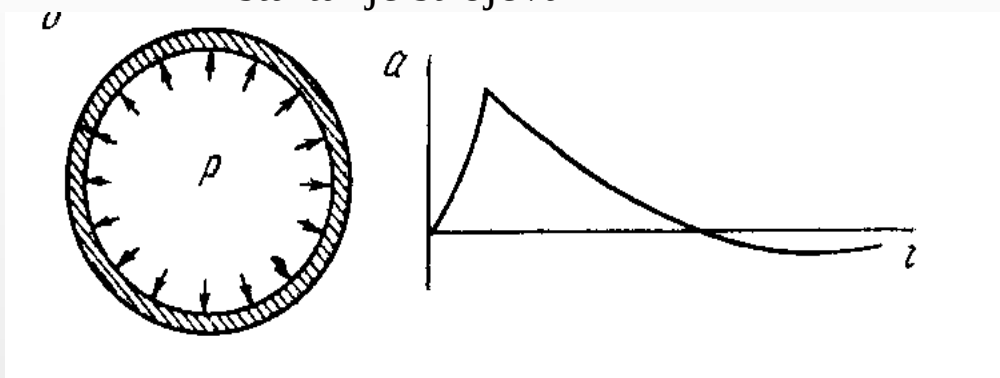
- dinamičko opterećenje može biti:
 - nepomično opterećenje
 - djeluje kontinuirano ili periodički mijenja svoju veličinu i iznos
 - strojevi, kompresori, vibracijski strojevi



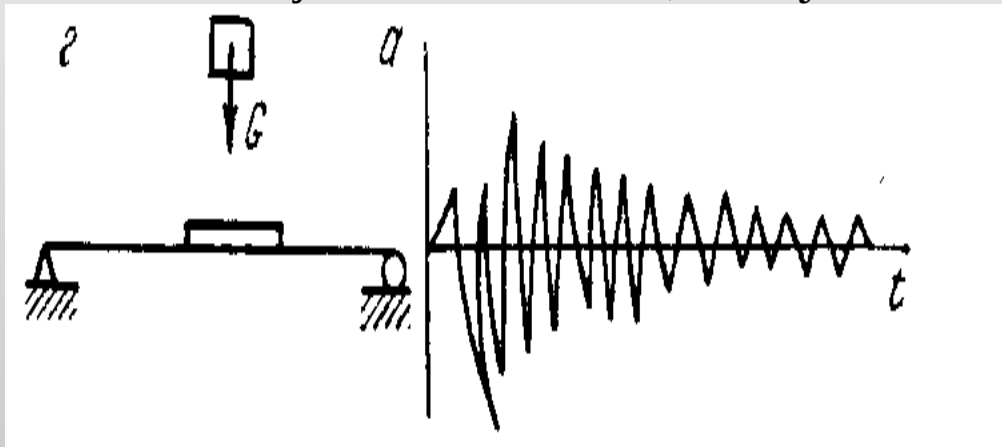
- pomično opterećenje



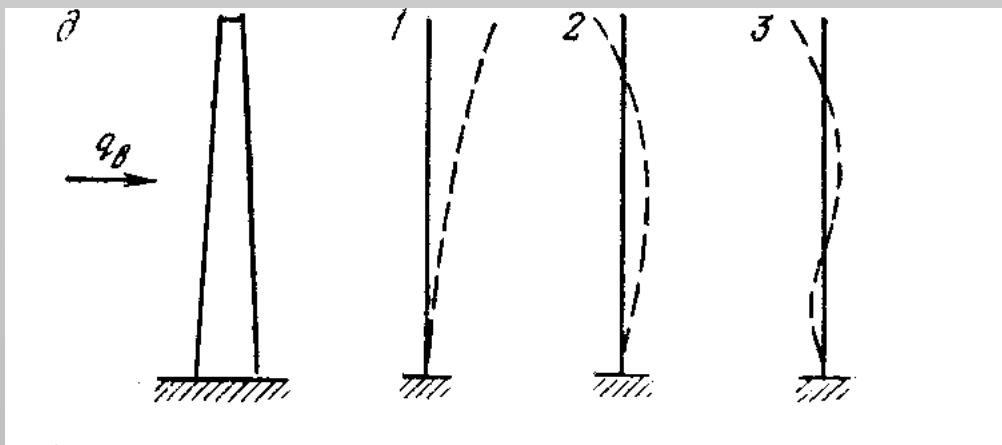
- impulsno opterećenje
 - djeluje trenutno i u kratkom vremenskom intervalu na konstrukciju
 - otvaranje ili zatvaranje zaporki na cjevovodu, startanje strojeva



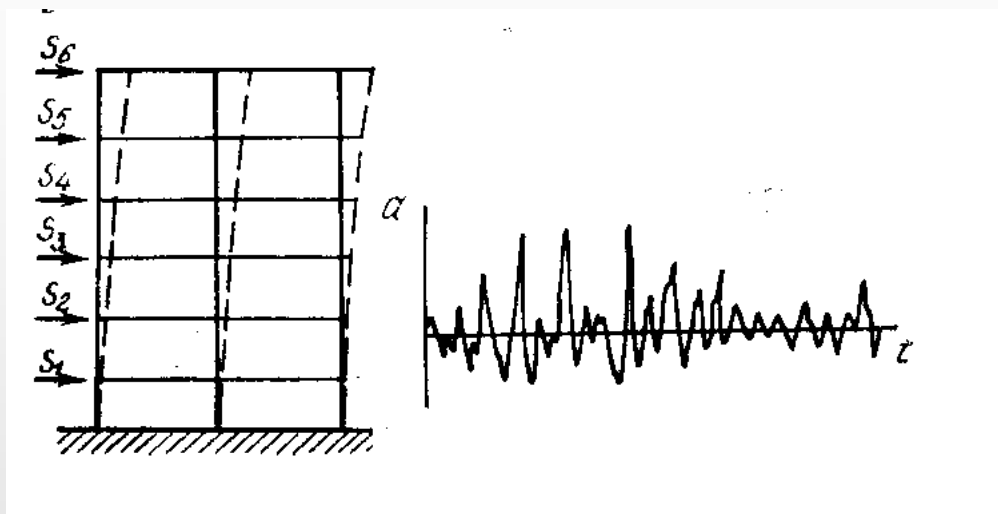
- udarno opterećenje
 - nagli pad tereta na konstrukciju
 - strojevi u kovačnicama, sletanje aviona



- dinamičko djelovanje vjetra



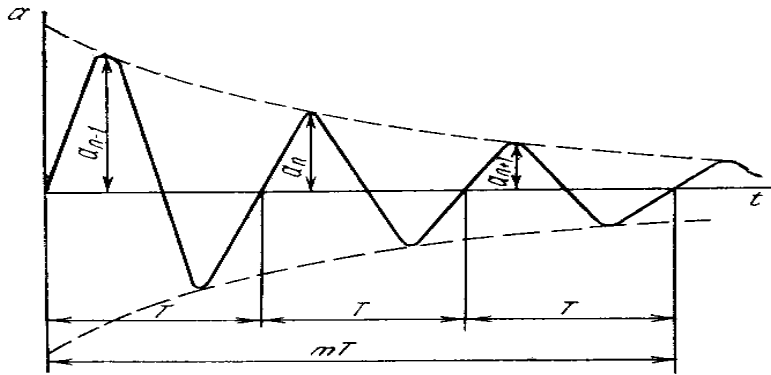
- seizmička opterećenja



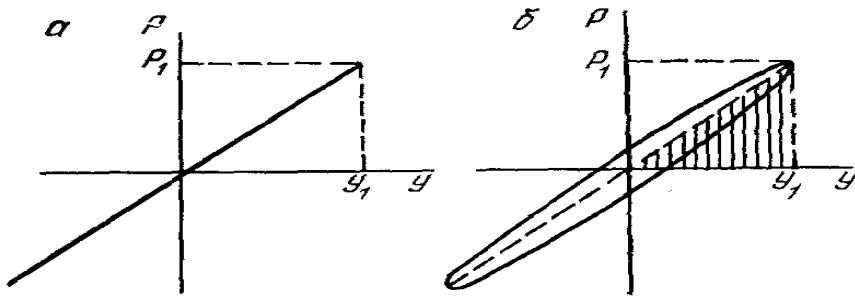
- kombinirana dinamička opterećenja

Dinamička svojstva

- slobodne oscilacije
 - vlastite frekvencije (periodi); forme; koeficijenti prigušenja



- slobodne prigušene oscilacije

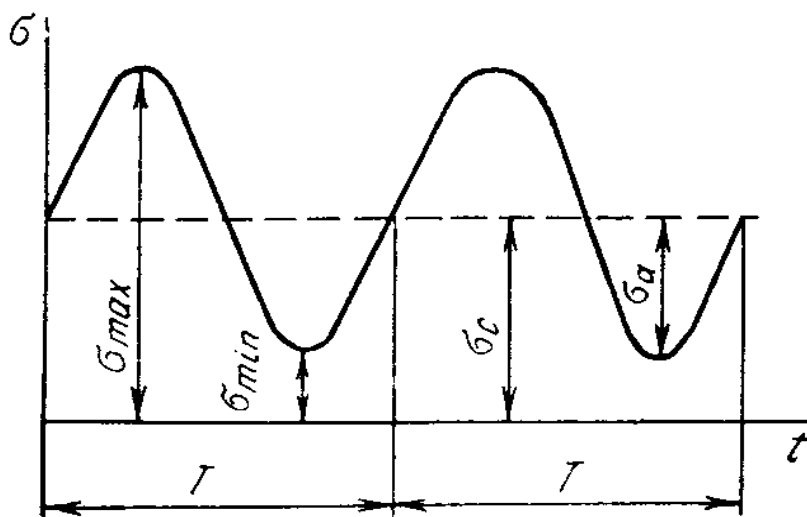


- dijagrami ponašanja materijala (elastični i elasto-plastični)
- vlastiti periodi T (vrijeme punog ciklusa)
- vlastite frekvencije $f=1/T$
- kružna frekvencija $\omega=2\pi/T$

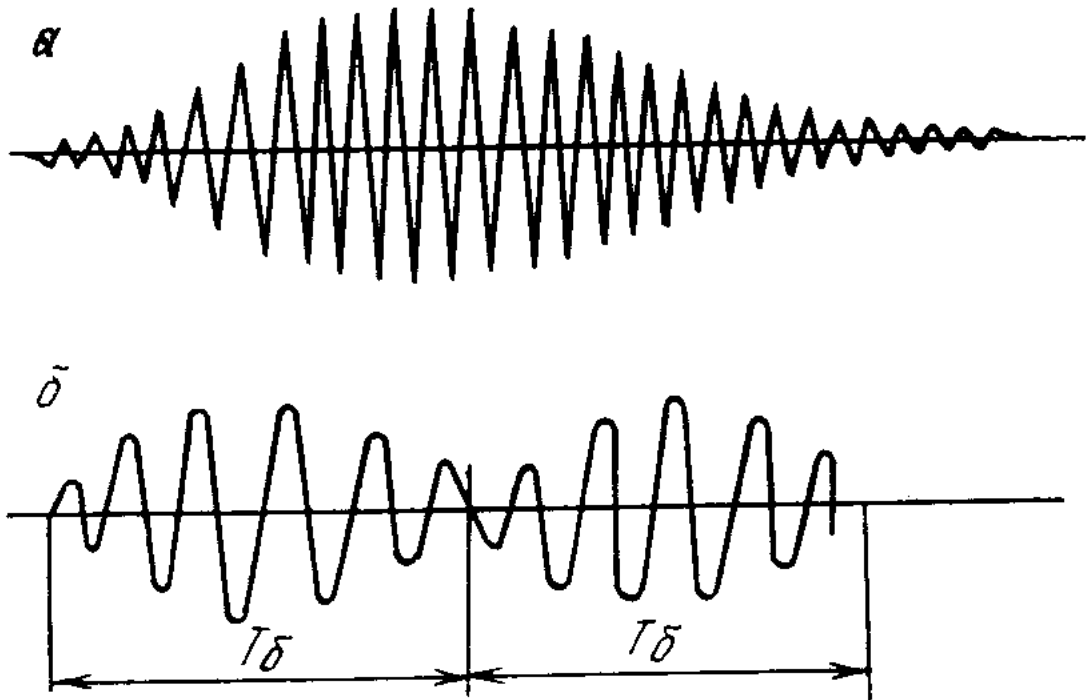
- Prigušenje vibracija nastaje usljed vanjskih i unutarnjih otpora
- logaritamski dekrement prigušenja
 $\delta = \ln(a_n / a_{n+1})$
- koeficijent prigušenja $\alpha = \delta / T = \ln(a_n / a_{n+1}) / T$
- koeficijent utrošene energije $\Psi = \Delta W / W = 2\delta$
- koeficijent neelastične energije $\gamma = \delta / \pi = \psi / (2\pi)$
 - koeficijent prigušenja se utvrđuje eksperimentalno i ovisi o materijalu i načinu opterećivanja

• Prinudne vibracije

- nastaju pod djelovanjem vanjskih sila

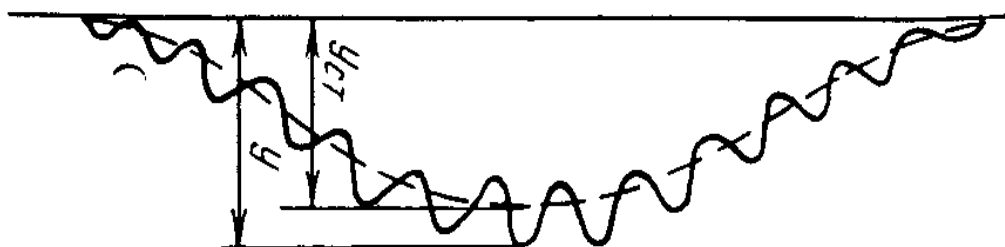


- period prinudnih vibracija je jednak periodu pobude

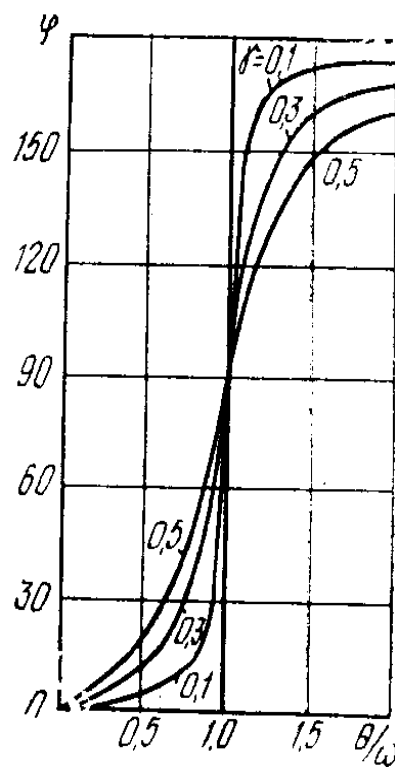
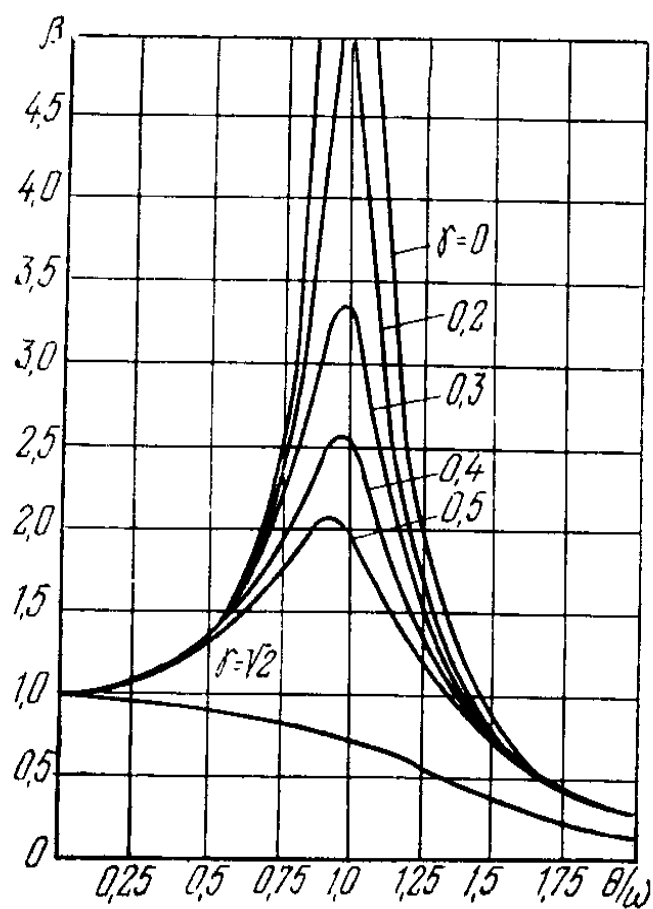


- rezonancija i pulziranje
 - kada je frekvencija pobude bliska ili jednaka svojstvenoj frekvenciji konstrukcije dolazi do pojačanja amplituda oscilacija (rezonancija)
 - kada je konstrukcija pobuđena s pobudom koja sadrži dvije bliske frekvencije dolazi do pojave pulziranja

- dinamički koeficijent



- rezonantna krivulja i faze između pobude i odgovora



– Dinamički koeficijent

- predstavlja odnos između maksimalnog dinamičkog i statičkog odgovora

□ $\beta = y/y_{st}$

- pri djelovanju pobude najveći dinamički koeficijent (bez učešća prigušenja) je

□ $\beta = 1/(1 - \theta^2/\omega^2)$ θ = vlastita frekvencija pobude; ω = vlastita frekvencija

- a uz učešće prigušenja

□ $\beta = 1/\sqrt{(1 - \theta^2/\omega^2)^2 + \gamma^2 * \theta^2/\omega^2}$

- za $\theta/\omega \ll 1$ koeficijent β je približno jednak 1 i amplituda prinudnih vibracija je približna statičkoj.
 - za $\theta/\omega = 1$ koeficijent β teži ka beskonačnosti (rezonancija).
 - za $\theta/\omega = \sqrt{(1 - \gamma^2/2)} \leq 1$ koeficijent $\beta = 1/(\gamma \sqrt{(1 - \gamma^2/4)})$ (na slici)
 - prigušenje utječe na smanjenje dinamičkog koeficijenta i to najviše u području rezonancije
- građevinske konstrukcije treba projektirati tako da ne dolaze u područje rezonancije.

Pobude osciliranja ispitivane konstrukcije

- vlastito opterećenje (koje postoji na konstrukciji)
 - strojevi, agregati, ventilatori daju periodične prisilne pobude
 - transportni uređaji, kranovi, pneumatski čekići daju opterećenje općeg karaktera
- prinudno opterećenje (koje se ostvaruje dodatnim sredstvima)
 - padajući teret
 - naglo odbačeni teret
 - udar
 - pobuđivač vibracija
 - sinkronizirana pobuda grupe ljudi
 - kidanje veze
 - vibroplatforma za seizmička ispitivanja dijelova i modela konstrukcija
- ambientalno (pobude koje djeluju u okolini)
 - vjetar, promet, valovi

Pribor za mjerenje

- Naprave koje parametre oscilatornog gibanja prikazuju u vidljivoj formi
- Instrumenti za mjerenje
 - vremena
 - frekvencije
 - ubrzanja
 - brzine
 - pomaka
 - deformacije
 - Podjela instrumenata prema načinu djelovanja:
 - optički
 - marke, mjerni mikroskop, stroboskop, kamere
 - mehanički
 - mikroure, vibrograf, palograf, tastograf, seizmograf
 - električni
 - induktivni, kapacitivni, potenciometerski, otporni, piezoelektrični

- Podjela instrumenata prema načinu bilježenja
 - vizuelni
 - mehanički
 - električni

- Izvođenje ispitivanja
- Držati se plana ispitivanja tijekom ispitivanja
 - pregled i snimak konstrukcije prije nanošenja opterećenja
 - dobra veza instrumenata i konstrukcije
 - posmatranje konstrukcije nakon rasterećenja i detaljni pregled konstrukcije
- Pratiti funkcioniranje instrumenata i kvalitetu izmjerenih podataka

Analiza rezultata:

- tijekom ispitivanja da bi se utvrdilo ponašanje konstrukcije i kvaliteta zabilježenih podataka
- nakon ispitivanja kada se na osnovi ispitivanja određuju dinamičke veličine
 - amplituda, brzina, ubrzanje, period, frekvencija, dinamički koeficijent, prigušenje, deformacija, naprezanje itd.

Izvještaj o ispitivanju

- Po završenom ispitivanju i obradi rezultata mjerenja pristupa se izradi zaključnog izvještaja koji sadrži:
 - shemu konstrukcije sa prikazom položaja opterećenja i fazama opterećenja
 - shemu konstrukcije sa prikazom mjernih mjesta
 - rezultati mjerenja: numerički i grafički
 - usporedba mjernih rezultata sa normativima i analitičkim vrijednostima: numerički i grafički
- zaključak o stanju konstrukcije:
 - Ispitivanje je dobro provedeno i vidljivo je slaganje rezultata svih mjernih parametara, tj. veličine mjerenja su rezultat mjerenja na konstrukcije a ne greške mjerenja;
 - Konstrukcija odgovara zahtjevima eksploatacije:
 - naprezanja u konstrukciji ne prelaze dopuštena za određeno dinamičko opterećenje
 - izmjerene amplitude i frekvencije vibracija ne utječu na tehnološke postupke i fiziološki su bezopasne po ljude
 - dinamički koeficijent je unutar izračunom predviđenih granica
 - vlastite frekvencije konstrukcije se ne podudaraju sa prinudnim frekvencijama strojeva

Prijedlog sanacije

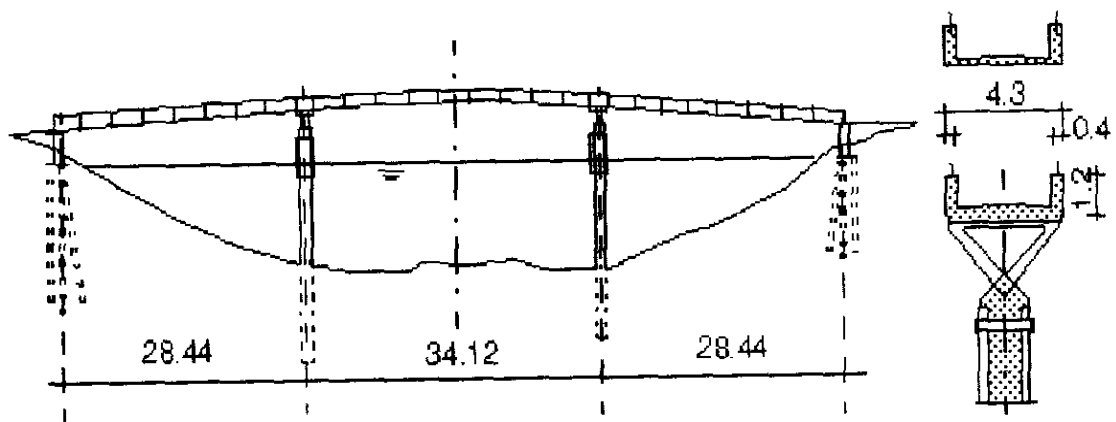
- Ukoliko su rezultati mjerenja negativni potrebno je dati prijedlog potrebitih zahvata za sanaciju, tj.
 - smanjivanje izvora dinamičkog opterećenja
 - reduciranje prijenosa dinamičkog djelovanja na konstrukciju
 - mijenjanjem dinamičkih svojstava konstrukcije promjenom masa ili krutosti
 - Po obavljenoj sanaciji potrebno je ponoviti ispitivanje.
-
- Svako dinamičko mjerenje služi i kao referenca o karakteristikama konstrukcije
 - vlastite frekvencije, vlastite forme i koeficijenti prigušenja su karakteristični za pojedine konstrukcije i njihovo stanje;
 - promjenama u krutosti i stanju konstrukcije dolazi i do promjena dinamičkih karakteristika.

Ispitivanje pješačkog mosta

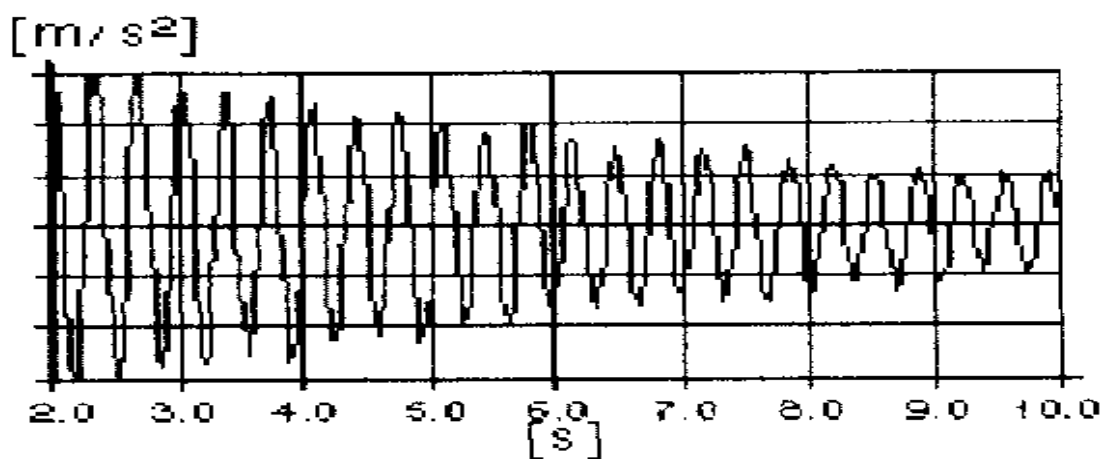
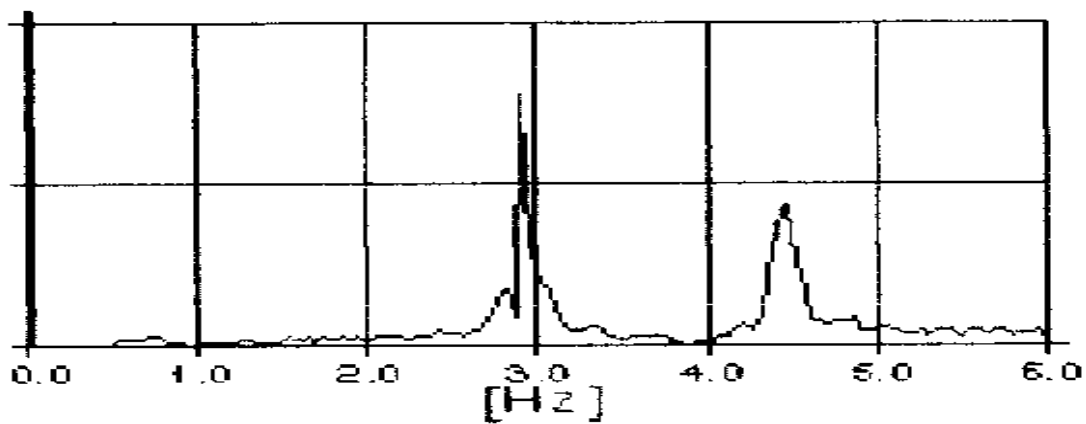
- Pješački most raspona $l=90\text{m}$ izgrađen je od prefabriciranih betonskih elemenata. Radi njegove velike vitkosti neophodno je bilo njegovo dinamičko ispitivanje, koje je onda rezultiralo i u izmjenama u projektu.
 - rasponi su $28\text{m}-34\text{m}-28\text{m}$ i proistekli su iz dinamičkog izračuna
 - vitkost je $1/28$
 - 1. vlastita frekvencija mosta je bila 2Hz što je blisko vrijednosti pobude od pješaka (rezonancija)
 - izmjenom odnosa raspona izmjenjena je i 1. vlastita frekvencija na 2.4Hz
 - ostvarivanjem veze grede i stupova frekvencija je podignuta na ca. 3Hz čime se izašlo iz rezonantnog područja

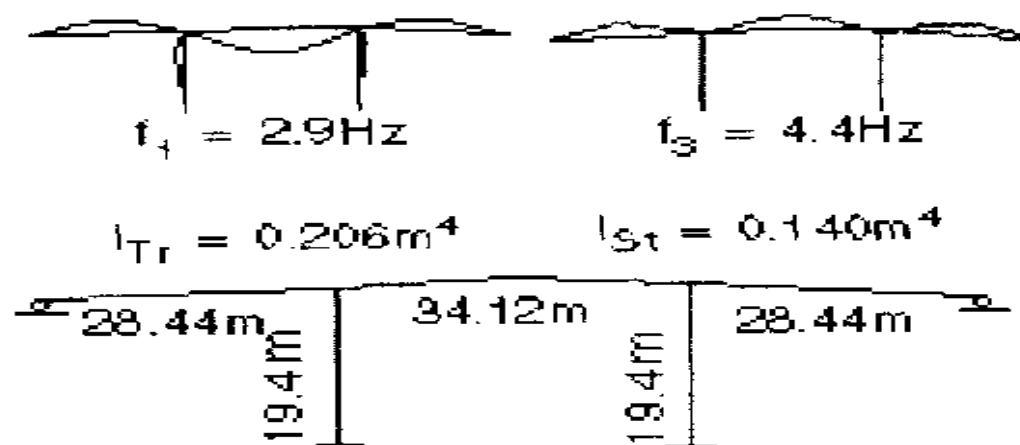
- rezultati dinamičkog ispitivanja

- cilj: identifikacija sustava i verifikacija dinamičkog proračunskog modela
- Ispitivanje za identifikaciju sustava:
 - slobodni pad vreće sa 50kg pijeska sa visine od 1m na sredini raspona
 - pobuda izazvana kretanjem ljudi
- Rezultati ispitivanja:
 - $f_1=2.9\text{Hz}$; $f_3=4.4\text{Hz}$
 - $\xi_1=1.1\%$ (relativno visok iznos koji se pripisuje brojnim fugama)

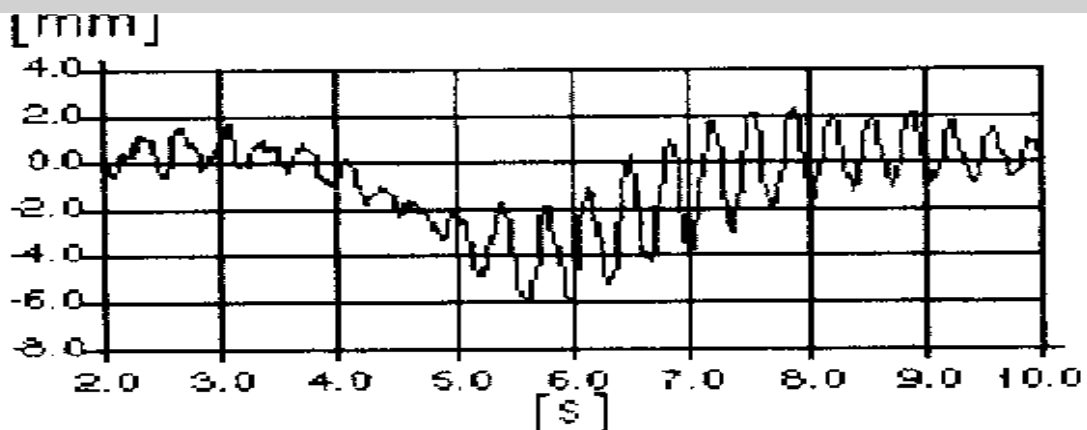
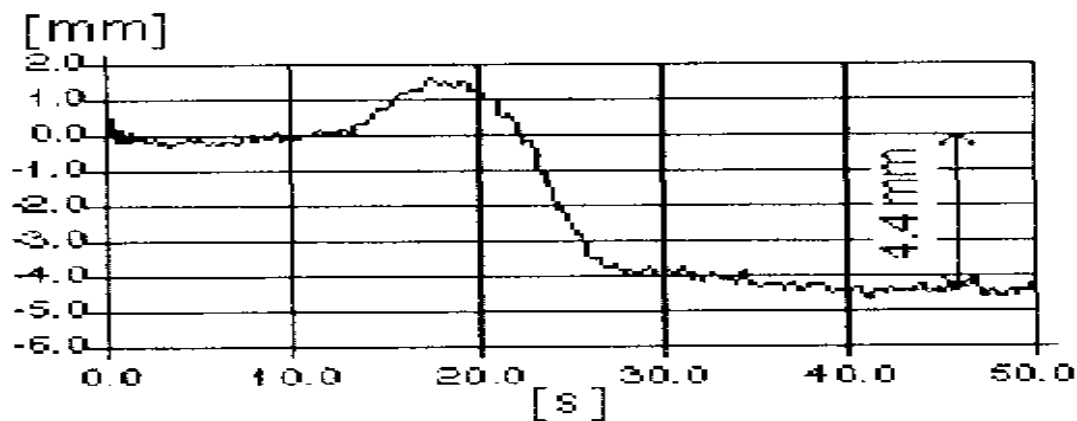


- uzdužni i poprečni presjek mosta
- frekventni spektar pomaka na $l/2$
- slobodne oscilacije na $l/2$

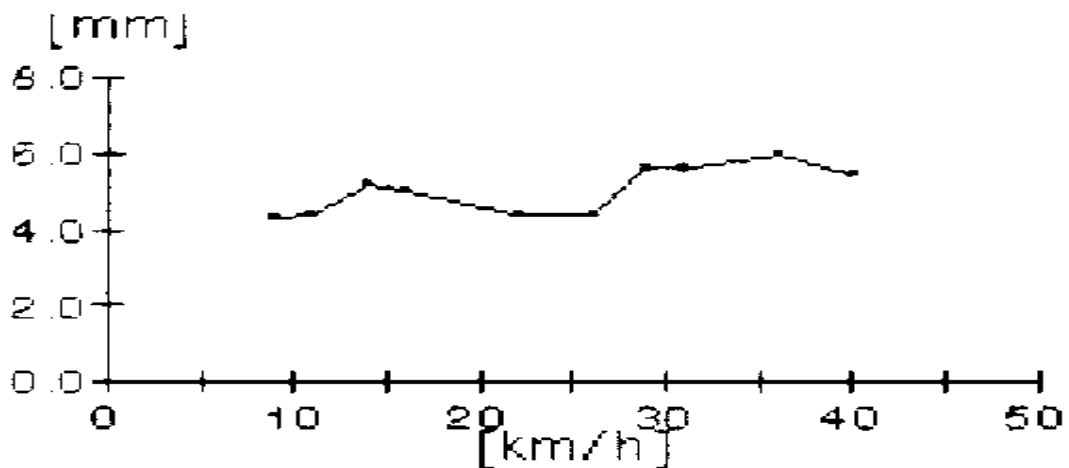
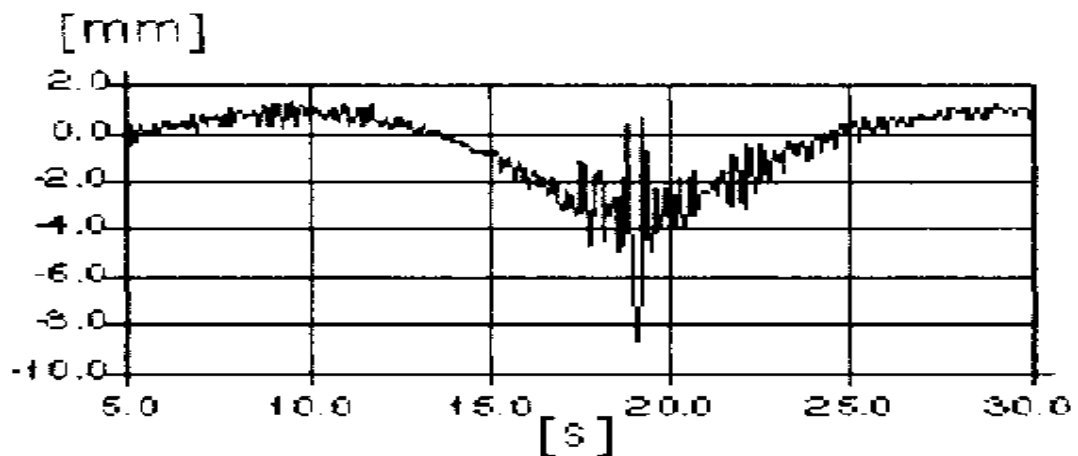




- vlastite forme osciliranja
- pomaci pri statičkom opterećenju
- pomaci na $l/2$ pri prelazu vozila



- pomaci na $l/2$ pri prelasku vozila preko daske
- pomaci na $l/2$ pri prelasku vozila i raznim brzinama



• Zaključci ispitivanja

- Vlastita frekvencija mosta iznosi $f_1=2.9\text{Hz}$ što je izvan područja koje pobuđuju pješaci (1.6 do 2.4Hz)
- Visok koeficijent viskoznog prigušenja (1.1%) uzrokovan brojnim fugama smanjuju rezultirajuće amplitude osciliranja
- most ne može doći u rezonantno područje poskakivanjem ljudi
- most ne može doći u rezonantno područje pri prelasku vozila brzinom do 40km/h