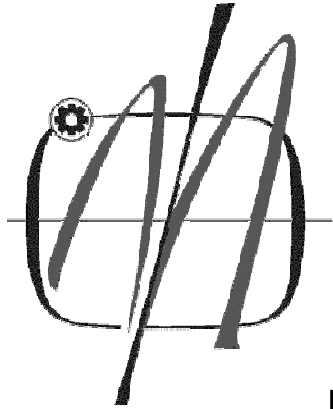


Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu



Eksperimenti i simulacije

Dr Aleksandar Marinković, vanredni profesor

Uvodno predavanje

Utorak 11.03.2015.

Eksperimenti i simulacije

- Pojmovi -



Ovi pojmovi su većita tema rasprava u filozofskim i naučnim krugovima

Francesco Guala (UK, 2001)

Semantički pogled na teoriju identifikuju teorije kao skupove modela.

Modele razmatra kao teorijske hipoteze, navodeći da su u određenom odnosu (od sličnosti, izomorfizam, analogiji) sa stvarnim objektima ili sistemima.

Simulacije mogu doneti nova znanja, kao što to čine i eksperimenti. Ali početna znanja neophodna za izradu simulacije nisu ista ona koja su potrebna za ralizaciju dobrog eksperimenta

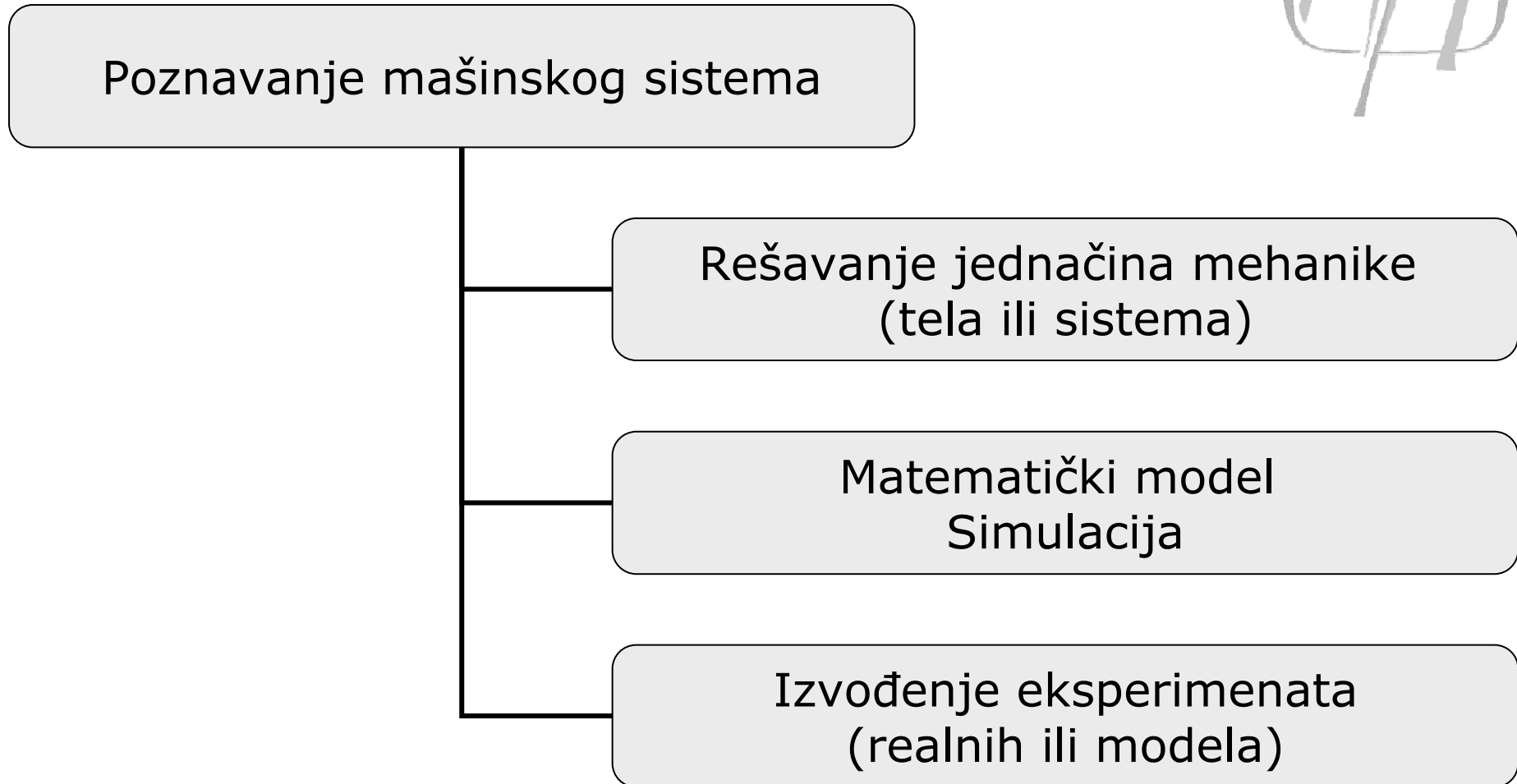
Eric Winsberg (USA, 2003)

Mnoge diskusije o simulacijama, uključujući i pojam "numerički eksperiment" pozivaju se na jaku korelaciju sa pojmom eksperimentisanja. S druge strane, mnogi autori simulacije pokušavaju da povežu sa primenom naučnih teorija.

To je dovelo do mišljenja mnogih da se pojam **simulacije okarakteriše tako da se nalazi negde između teorije i eksperimenta**. Koristi termin "simulacija", za definisanje sveobuhvatnog procesa postavljanja modela, njegove transformacije i rešavanja uz pomoć računara. **Simulacije** su dakle zasnovane na modelima koji uključuju pretpostavke koje su usvojene prilikom njegovog formiranja, a za uzvrat one predstavljaju modele određenih pojava.

Eksperimenti i simulacije tehničkih sistema

- mesto i koralacija -

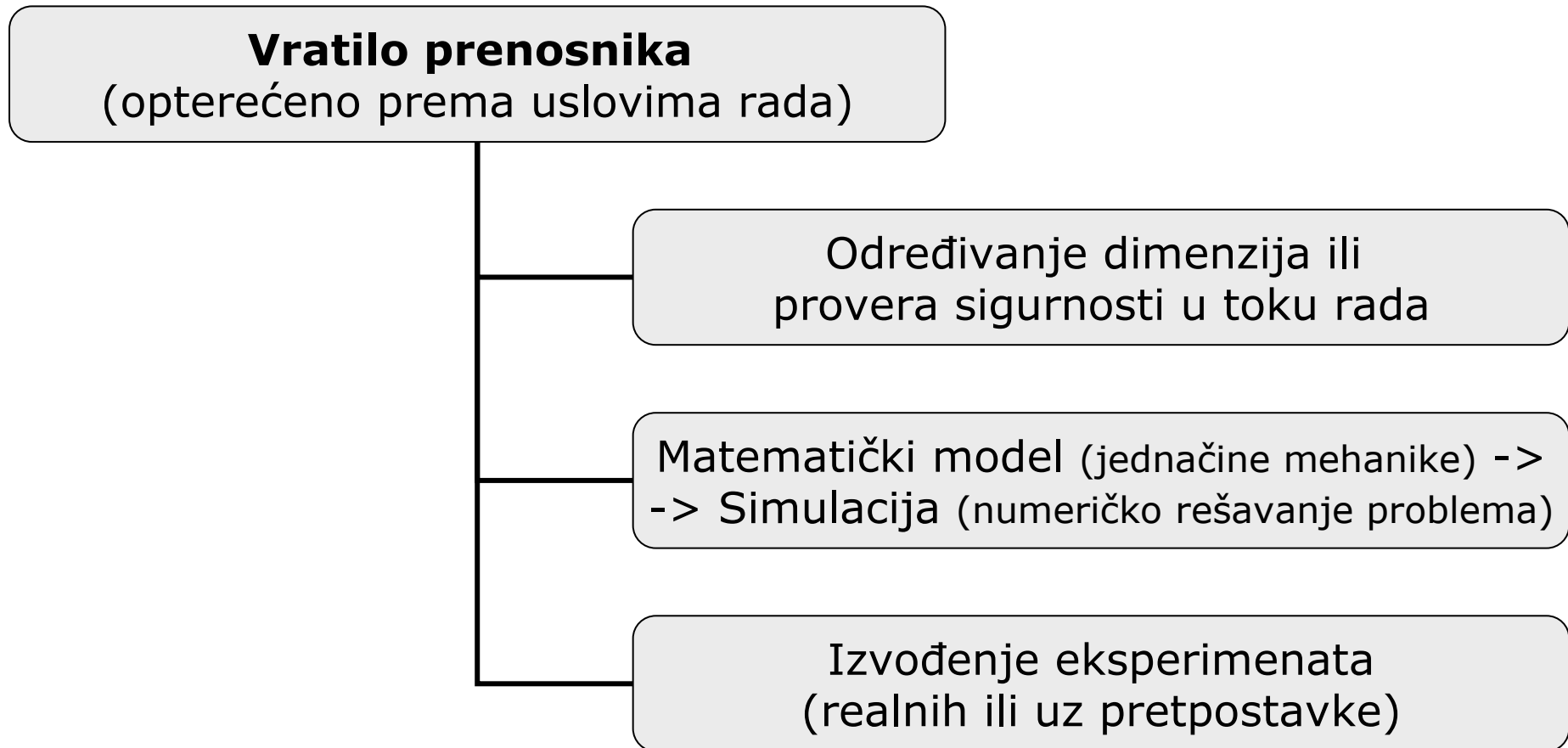


Postoji često manja ili veća zavisnost sve tri vrste analize sistema

Eksperimenti i simulacije tehničkih sistema

- Primer 1 -

Primer: analiza ponašanja vratila u toku eksploatacije



Eksperimentalna istraživanja mašinskih sistema

- Potreba i prednosti-



Savremeni mašinski sistemi su često veoma **složeni** i ne omogućavaju uvek određivanje čvrstoće kao što je slučaj kod prostih nosača, ploča ili omotača, pa se **nedovoljno tačno mogu primeniti teorije** mehanike i otpornosti. Ovi elementi i sistemi su obično izloženi složenim kretanjima, nestacionarnim temperaturnim i naponskim stanjima, rade u korozionim sredinama itsl.

Radne površine mašinskih sistema su često razdvojene slojem ulja. Klasično rešavanje zadatka **hidrodinamičke teorije podmazivanja**, gde između površina postoji neprekidni „uljni film“ pokazuje se često nepotpunim. Razlog je što se u obzir ne uzimaju tehnološki nedostaci i elastične deformacije elemenata, promenljivost radne temperature i viskoznosti ulja. U pitanju je i podmazivanja stvarnih, hrapavih radnih površina, zatim rad tankih slojeva ulja uz uzajamno dejstvo sa materijalima u kontaktu. Hidrodinamička teorija podmazivanja u stvari opisuje idealizovane modele kliznih ležaja, a postojeća teorija habanja još ne omogućava procenu radnog veka mašinskih elemenata i sistema, sa neophodnom tačnošću dimenzija i oblika u realnim uslovima eksploatacije.

Eksperimenti i simulacije tehničkih sistema

- Primer 2 -

Primer: analiza rada poroznih kliznih ležaja

Iz Navije-Stoksovih, integracijom se dobija Reynoldsova jednačina u opštem obliku

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 (U_1 + U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12 (V_2 - V_1)$$

uz pretpostavke:

- Viskoznost fluida je konstantna, Njutnovski fluid,

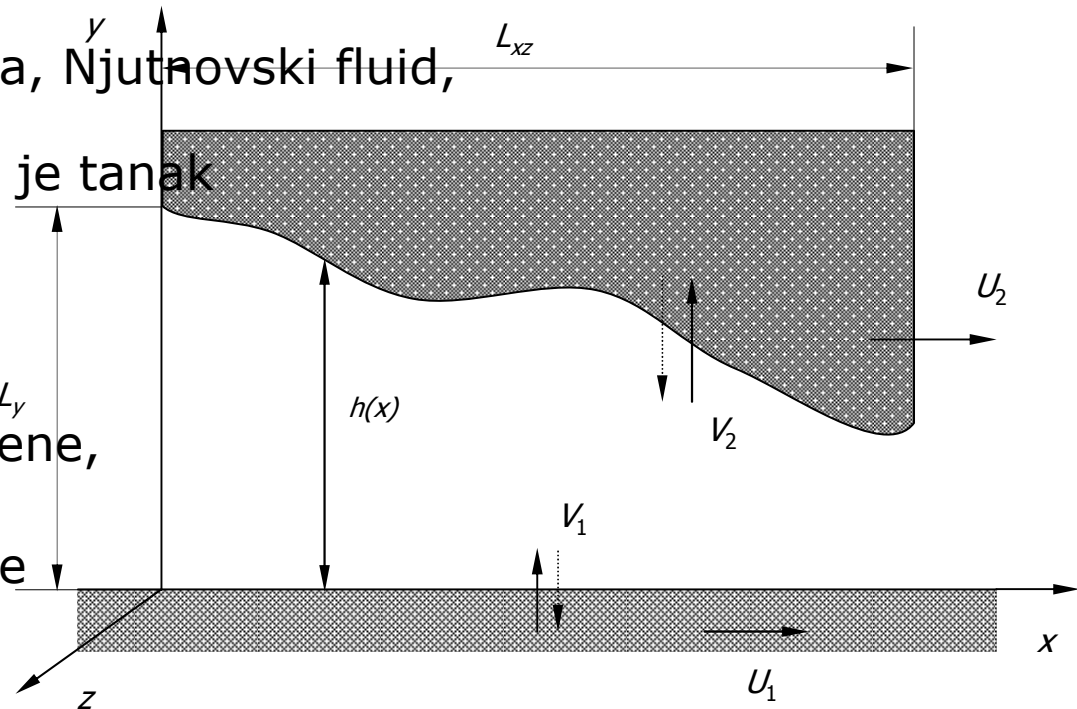
- Sloj fluida je za podmazivanje je tanak

$$(L_y / L_{xz}) \rightarrow 0$$

- Zapreminske sile su zanemarene,

- Zanemarene su inercijalne sile

$$Re \ll 1$$



Eksperimenti i simulacije tehničkih sistema

- Primer 2 -

Posle transformacije i uvođenja više pretpostavki dobija oblik modifikovane Reynoldsove parcijalne diferencijalne jednačine:

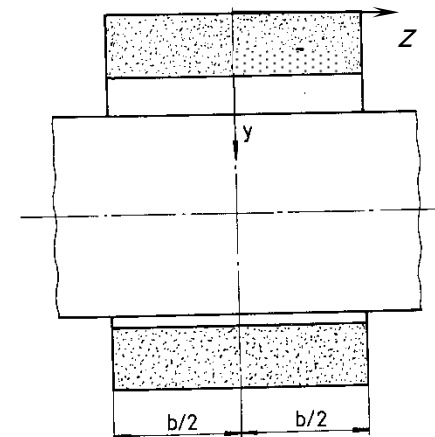
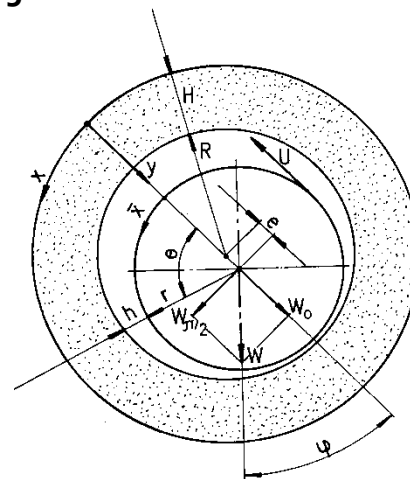
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\Phi}{\eta} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y} \right)_y$$

Prema hidrodinamičkoj teoriji kratkog ležaja

$$\frac{\partial p}{\partial x} \ll \frac{\partial p}{\partial z}$$

Dobija se sledeći izraz kao osnova za matematički model za dalje istraživanje i proračun

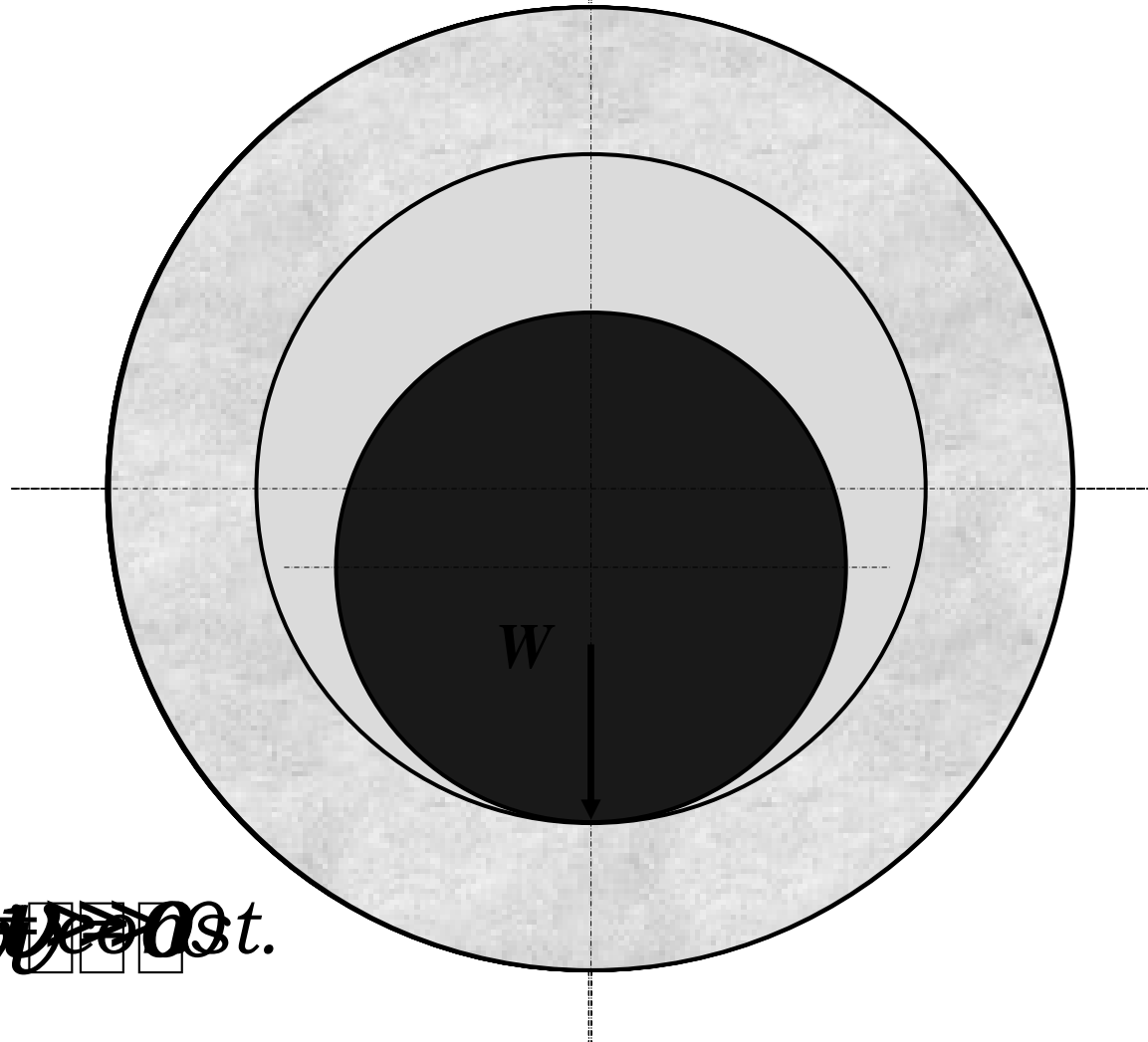
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\Phi}{\eta} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y} \right)_{y=H}$$



Eksperimenti i simulacije tehničkih sistema

- Primer 2 -

Razlog za masovnu primenu je način podmazivanja poroznih ležaja



~~Ustav~~st.

Eksperimenatalna istraživanja mašinskih sistema

- Potreba i prednosti-

Razmatranje takvih **idealizovanih mehanizama** omogućava dobijanje teoretskih funkcija parametara projektovanih mašinskih sistema. Teoretske zavisnosti mehaničkih parametara mehanizama i mašina **ponekad se bitno razlikuju od stvarnih**, koje nastaju u realnim uslovima (na primer, česta je pojava vibracija i torzionih oscilacija).

Zato je uporedo sa razvojem teoretskih metoda sinteze i analize **neophodno izučavanje i razvoj metoda eksperimentalnog ispitivanja** mašinskih elemenata, mehanizama i sistema, kao i tehničkih sistema uopšte

Analiza daje **pet osnovnih parametara čije je merenje neophodno** za svestrano eksperimentalno ispitivanje mehanizama, a to su:

- pomeranja,
- brzine,
- ubrzanja (maksimalne vrednosti i vremena nastajanja ubrzanja),
- sile i
- obrtni momenti.

Veličine deformacija, napona, neravnomernosti kretanja, stepena korisnog dejstva i oscilacija određuju se pomoću rezultata merenja ovih pet osnovnih mehaničkih parametara.

Eksperimentalna istraživanja mašinskih sistema

- Osnovna podela-



Eksperimentalna istraživanja se sprovode **u raznim fazama stvaranja mašinskog sistema**, počev od razvoja, pa preko izrade, do eksploatacije, tako da se primenjena ispitivanja se mogu svrstati na:

1. **Razvojna istraživanja** (prototipa ili novih ideja i inovacija)

Cilj razvojnih ispitivanja je da konstruktori dobiju informaciju o ispravnosti predviđenih rešenja koja su osmislili. Ona obuhvataju ispitivanja potpuno nove konstrukcije, ali moraju sadržati:

- studiju i analizu ranije izvedenih sličnih konstrukcija,
- izradu i ispitivanje prototipa i "nulte" serije,
- verifikaciju konstrukcije i tehnologije izrade.

U razvojna ispitivanja spadaju i inovaciona ispitivanja mašinskih sistema, čiji zadatak je da provere nova rešenja, poboljšanja ili usavršavanja konstrukcije.

Razvojna ispitivanja su vezana za laboratorijske uslove i izvode se u razvojnim centrima i institutima uz simulaciju eksploatacionih uslova.

Eksperimenatalna istraživanja mašinskih sistema

- Osnovna podela-



2. **Proizvodni eksperimenti ili ispitivanja**

(odnose se na međufazna, ali i završna ispitivanja)

Ova ispitivanja se obavljaju u toku procesa proizvodnje mašinskog sistema, kao međufazna i završna ispitivanja kvaliteta konstrukcije.

Izvode se u radioničkim uslovima, u za to određenim prostorima izolovanim od spoljnih uticaja.

Cilj ovih eksperimenata i ispitivanja je da se prikupe podaci o tačnosti elemenata, sklopova i celog sistema, kao i informacije o mogućnostima ugradnje i funkcionalnosti sklopova i cele mašine, ali i da se ukaže na određene greške, nedostatke i nedozvoljena odstupanja.

Eksperimenatalna istraživanja mašinskih sistema

- Osnovna podela-



3. **Eksploataciona istraživanja** na samom sistemu (ispitivanja u periodu uhodavanja i ispitivanja pri ustaljenom režimu rada).

Eksploataciona istraživanja i ispitivanja se izvode u radnim uslovima, na terenu, u proizvodnim halama, u pogonu, u specijalizovanim institucijama – servisima za kontrolu tehničke ispravnosti, ili u laboratorijskim uslovima uz simulaciju realnih režima rada.

Na taj način se dobijaju informacije o ponašanju mašinskog sistema u toku rada, parametrima ekonomičnosti, mogućnostima preopterećenja, opravdanosti primene ponuđenog konstruktivnog rešenja, kao i provere predložene tehnologije izrade itsl.

Eksperimentalna istraživanja tehničkih sistema

- Podela prema postupcima ispitivanja -



Prema **postupcima ispitivanja** se mogu podeliti na:

- hemijska,
- fizička,
- mehanička i
- tehnološka ispitivanja.

Ispitivanja se, **prema stanju ispitivanih uzoraka**, dele na:

- ispitivanja sa razaranjem - mašinski elementi se pri ispitivanju uništavaju i
- ispitivanja bez razaranja - mašinski elementi pri ispitivanju ostaju nepromenjeni (mogu se posle završenog ispitivanja ponovo koristiti).

Prema **načinu delovanja opterećenja**, sva mehanička ispitivanja mogu se podeliti na:

- statička (inače najčešća, izvode se dejstvom konstantnog opterećenja ili opterećenja koja lagano rastu) i
- dinamička (kod kojih se javljaju opterećenja koja se menjaju u toku radnog veka po određenom zakonu, ili koja deluju udarno).

Eksperimentalna istraživanja tehničkih sistema

- Podela prema dužini ispitivanja -

Ispitivanja se mogu podeliti na:

- kratkotrajna (pri kojima se fiksira stanje objekta u datom momentu)
- dugotrajna (gde se kontroliše proces promene stanja objekta u (određenom vremenskom periodu))

Pri **kratkotrajnim ispitivanjima** je potrebno odgovarajuće vreme za dostizanje određenog temperaturnog stanja i izvođenje samog merenja.

U ta ispitivanja spadaju ispitivanja po kriterijumima:

- osnovne tačnosti,
- tvrdoće pri jediničnim opterećenjima,
- krutosti,
- otpornosti na vibracije.

Dugotrajna ispitivanja su ispitivanja koja se najčešće obavljaju na:

- habanje,
- koroziju,
- rad pod opterećenjem do pojave loma ili oštećenja većeg dela sistema.

Eksperimentalna istraživanja tehničkih sistema

- dugotrajni eksperimenti i ispitivanja -



Opšti princip koji ima mogućnost da se realizuje sa mašinama za dugotrajna ispitivanja je **unutrašnje opterećenje**. Ovo je naročito prisutno pri ispitivanju reduktora, menjača, kao i iz njih sastavljenih zatvorenih kinematskih kola. Kolo se podvrgava unutrašnjem opterećivanju putem **deformacije elastičnog sistema** (obično uvijanjem torzionog vratila ili zaokretanjem oboda spojnice za opterećivanje - teretnice).

Metod uređaja sa zatvorenim kolom opterećenja u poslednje vreme uspešno je primenjen **i na prenosnike sa klizanjem** (npr, kaišni prenosnici).

Opterećenje se reguliše prinudnom promenom klizanja variranjem prenosnog odnosa jednog od prenosnika koji ulaze u kolo.

Pri ispitivanju **spojnica** jedan deo spojnice je postavljen na šuplje vratilo u kome je smešteno torziona vratilo koje zatvara kolo.

Pri ispitivanju **navojnih** veza primenjuju se dve navrtke koje su opterećene silom sabijanja opruge, postavljene između njih.

Pri ispitivanju **ležaja** opterećenje se može ostvariti u vidu sile pritiska između njih.

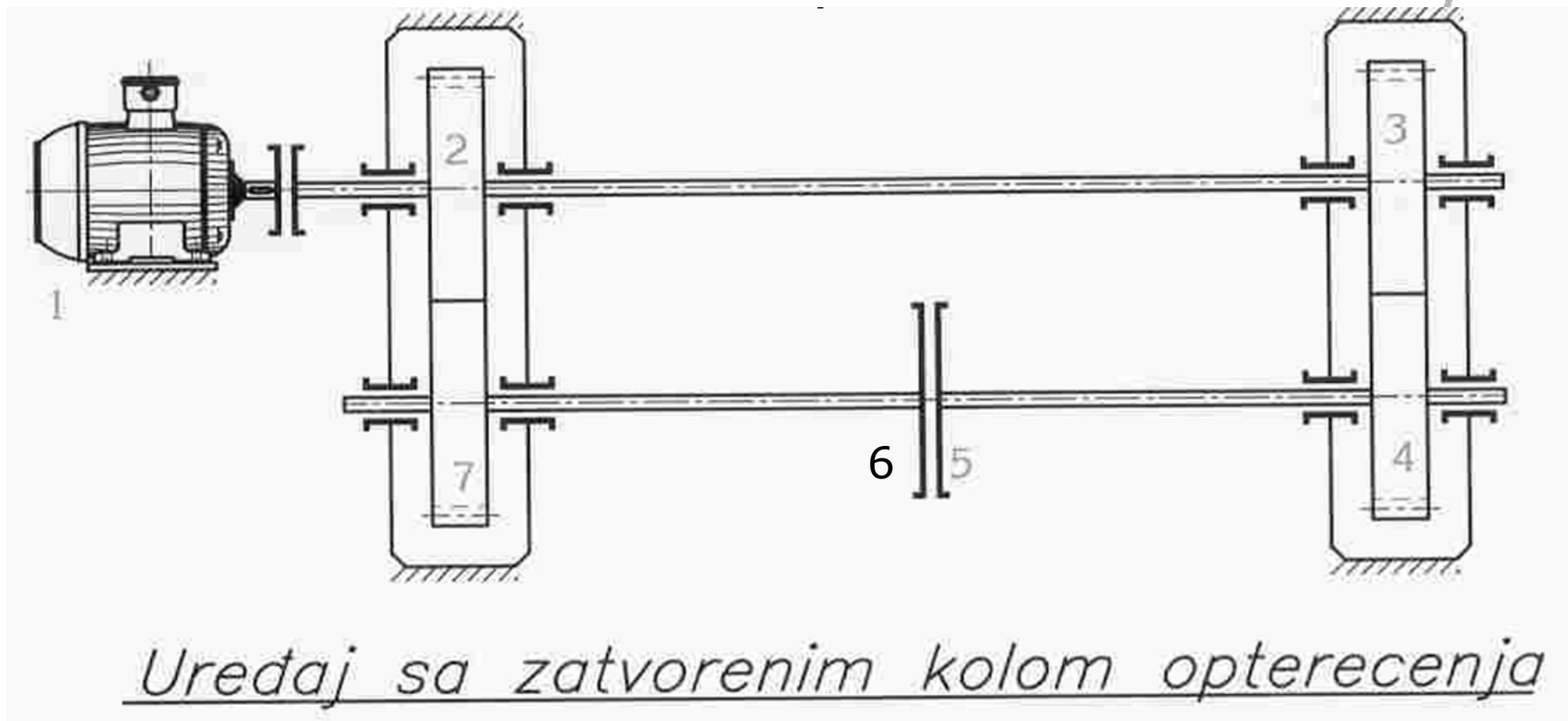
Eksperimentalna istraživanja tehničkih sistema

- Primer 3 – zatvoreno kolo snage -

Princip zatvorenog kola opterećenja objasnićemo na jednom prostom uređaju za ispitivanje zupčanika, čija je šema data na slici. Da bi se smanjila snaga potrebna za ispitivanje zupčastih prenosnika koriste se uređaji sa zatvorenim kolom opterećenja. Elektromotor (1) pokreće dva para zupčanika (2-7 i 3-4) pri čemu su pogonski zupčanici spojeni kontinualnim vratilom, a gonjeni vratilom sastavljenim iz dva dela. Oba dela na svojim krajevima imaju prirubnice (5 i 6). Ukoliko se jedna prirubnica zaokrene za neki ugao u odnosu na drugu, u sistemu će se **uspostaviti moment uvijanja** srazmeran ostvarenoj deformaciji sistema. Spajanjem prirubnica ceo sistem sa zupčastim parovima je prethodno opterećen obrtnim momentom. U toku rada svaki od dva para zupčanika prenosi snagu srazmernu obrtnom momentu i ugaonoj brzini. Kako **u sistemu postoje gubici** usled sila trenja (u ležajevima, između bokova zubaca, otpora ulja), usled deformacionog rada pri sprezanju (koji se najvećim delom vraća), mora da se uvede, radi njihovog savlađivanja, dopunska **spoljna energija od elektromotora**.

Eksperimentalna istraživanja tehničkih sistema

- Primer 3 – zatvoreno kolo snage -



Eksperimenatalna istraživanja tehničkih sistema

- ... još podela -

Prema **uslovima u kojima se odvijaju istraživanja** delimo ih na:

- ispitivanja u uslovima okoline,
(normalni uslovi temperature, pritiska i vlažnosti vazduha)
- ispitivanja u delimično poremećenim ili promenjenim uslovima
(npr. na sniženim ili povišenim temperaturama, u drugoj sredini,
u uslovima povećane vlažnosti vazduha, korozije itsl.)
- ispitivanja u ekstremnim uslovima okoline
(na ekstremnim temperaturama, vakuumu)

Cilj ovih ispitivanja je utvrđivanje **uticaja spoljašnjih uslova rada** na posmatrane karakteristike ispitivanog mašinskog elementa ili sistema.

Prema **nameni samog ispitivanja**, odnosno koja je svrha istraživanja u opštem smislu ih možemo podeliti na:

- prijemna,
- procesna,
- eksperimentalno-istraživačka,
- naučno-istraživačka i
- specijalna ispitivanja itd.

Eksperimenatalna istraživanja tehničkih sistema

- netipični eksperimenti i ispitivanja -

Ispitivanja sa akumuliranjem oštećenja zahtevaju duže vreme ispitivanja. Pošto je potrebno obezbediti dobijanje dovoljno brze ocene pouzdanosti, javlja se **problem ubrzanog ispitivanja**, koji je sve više aktuelan.

Ubrzavanje ispitivanja se postiže sledećim osnovnim načinima (ili njihovim kombinacijama):

- obezbeđenjem neprekidnosti procesa ispitivanja,
- povećanjem broja opterećenja ili brzine klizanja,
- povećanjem napona ili izuzimanjem onih napona koji ne utiču ili vrlo malo utiču na vek trajanja,
- povećanjem uticaja radne sredine (prljanje, korozija i slično),
- povećanjem tačnosti merenja,
- korišćenjem statističkih metoda obrade rezultata ispitivanja uz iskorišćenje zakonomernosti dobijenih pri ranijim ispitivanjima.

Pri ubrzanom ispitivanju **karakter otkaza** elementa **obavezno** se mora zadržati **isti kao što je u eksploataciji**. Ubrzana ispitivanja su naročito pogodna kod upoređivanja i za proveru stabilnosti kvaliteta proizvodnje.

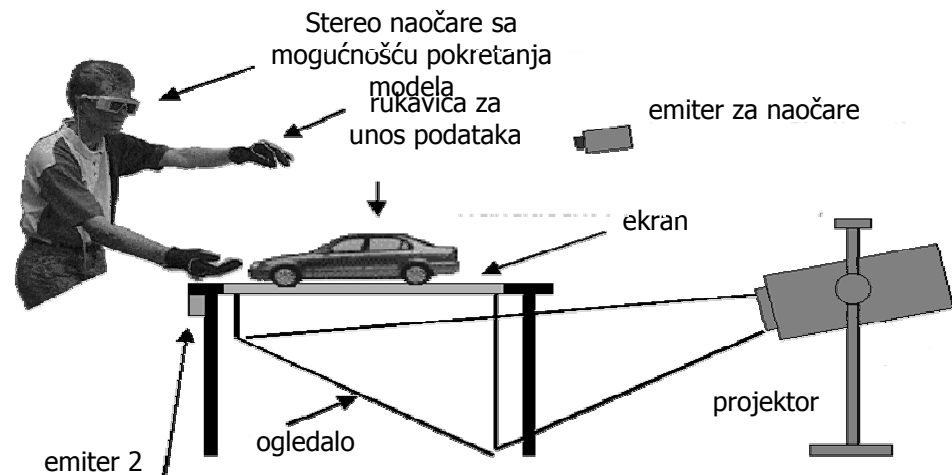
Pri korišćenju ovih ispitivanja za ocenu resursa neophodno je definisati **koeficijent prelaza** na osnovu usklađivanja sa rezultatima

19/25 eksploatacionih posmatranja, ili možda dužih ispitivanja.

Eksperimenatalna istraživanja tehničkih sistema

- netipični eksperimenti i ispitivanja -

Ispitivanja na mašinskim elementima **velikih dimenzija** pokazala su se skupim, jer zahtevaju velike snage i laboratorije velikih površina. Zato se ogroman broj ispitivanja izvodi na **epruvetama ili modelima** sa umanjenim dimenzijama. Za rezultate koji bi nam koristili za stvarno ponašanje elementima koristi se teorija sličnosti, a takođe vrše se i specijalna ispitivanja za određivanje uticaja koeficijenta srazmere. Primer su virtuelni eksperimenti izvedeni savremenim metodama virtuelne realnosti (VR), kao što je recimo istraživanje koeficijenta opstrujavanja profila u avio ili auto industriji.



Metodologija eksperimentalnih istraživanja



Ispitivanja mašinskih konstrukcija, mašinskih sistema, sklopova i elemenata sprovode se po posebnim postupcima – **metodologijama**.

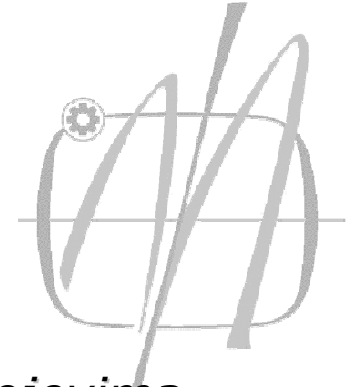
U nekim slučajevima su metodologije ispitivanja su tačno utvrđene, a neke i **standardizovane** (npr. ispitivanje sudova pod pritiskom, ispitivanje emisije izduvnih gasova, ispitivanje kvaliteta zavarenih spojeva, kontrola tačnosti izrade tupčanika itd.).

Ove metodologije mogu biti obuhvaćene internim, nacionalnim ili međunarodnim standardima, najčešće se definišu za svaki pojedinačni slučaj ispitivanja, ali one **u opštem slučaju sadrže:**

- cilj ispitivanja
- način pripreme objekta koji se ispituje
- način merenja potrebnih mernih veličina, potrebne karakteristike uređaja
- način ugradnje mernih uređaja i postavljanje merne opreme
- režim rada i uslovi pod kojim treba da se obavi ispitivanje
- postupak sprovođenja merenja, način prikazivanja rezultata, prikupljanje podataka i obrada rezultata merenja.

Eksperimenti i merenje

- uvodne napomene -



Ako možete da merite ono o čemu govorite i da to izrazite brojevima onda i nešto znate o tome; ali ako niste u stanju da izrazite brojevima vaše znanje je siromašno i nezadovoljavajuće.

Lord Kelvin

Postoji samo nekoliko veličina koje se ne mogu raščlaniti na jednostavnije na primer, dužina, masa, vreme, temperatura, količina elektriciteta. Pravilnim izborom jedinica tih veličina i jednostavnim matematičkim operacijama izvode se jedinice svih drugih složenih veličina. Skup takvih, međusobno povezanih jedinica zove se *sistem mernih jedinica* ili **merni sistem**.

Mere i merne jedinice



Mera bilo koje fizičke veličine sastoji se iz dva dela:

- **jedinice** koja je odabrana kao standard za upoređivanje fizičke veličine i
- **broja** koji pokazuje kvantitativni odnos konkretne merene veličine prema standardu, to jest jedinici.

Izvedene jedinice Međunarodnog sistema.

Od osnovnih izvode se jedinice složenih veličina pomoću definicijskih jednačina. Tako je ubrzanje definisano kao promena brzine u vremenu, dakle:

$$\text{jedinica ubrzanja} = \frac{\text{jedinica brzine}}{\text{jedinica vremena}}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

osnovne jedinice SI sistema

Naziv		Znak	Jedinica veličine
fonetski	etimološki		
metar	mètre	m	dužina
kilogram	kilogramme	kg	masa
sekunda	seconde	s	vreme
amper	ampère	A	jačina električne struje
kelvin	kelvin	K	termodinamička temperatura
mol	mole	mol	količina materije
kandela	candela	cd	jačina svetlosti

Tačnost merenja i greške



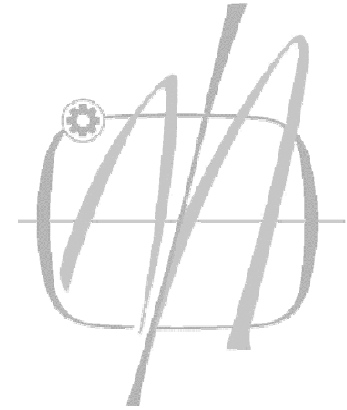
Prilikom merenja svake veličine nastaje izvesna **greška, kao razlika stvarne i izmerene vrednosti** merne veličine.

Na tačnost rezultata istraživanja utiču greške nastale prilikom merenja merne veličine. Stoga je potrebno detaljno razmotriti prirodu njihovog nastajanja i uzroke kako bi se utvrdila veličina greške i uticaj na pouzdanost rezultata. Pošto se pri većem broju merenja dobijaju različiti rezultati, dakle vrednost greške se menja i po znaku i intenzitetu, izmerena vrednost merne veličine poseduje i grešku merenja sa utvrđenim granicama odstupanja i verovatnoćom da se greška nalazi u tim granicama.

Klasifikacija grešaka merenja:

- slučajna greška (ne mogu se predvideti, pa se radi veliki broj merenja)
- sistematska greška (nedovoljna tačnost metode ili greška instrumenta, pa treba primeniti tačnije uređaje ili izvršiti baždarenje postojećih)
- individualna greška (u funkciji je izvršioca merenja)
- gruba greška merenja (spada u slučajne greške i više puta je veća od srednje vrednosti greške ε , gruba greška je ona veća od 3ε)
- greška pri posrednom merenju merne veličine** (kada se merna veličina javlja u obliku funkcije više promenljivih direktno merenih veličina)

Tačnost merenja i greške



Računski zadatak: određivanje greške pri posrednom merenju merne veličine (urađeni računski primeri)

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$$

$\Delta y = y - y_0$ - apsolutna greška

$x_1; x_2; x_3; \dots x_n$ - merene veličine

$\frac{\Delta y}{y} = \varepsilon_y$ - relativna greška

$\Delta x_1, \Delta x_2 \dots \Delta x_n$ - relativne greške merenih veličina

Opšti izraz za izračunavanje veličine relativne greške

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \cdot (\Delta x_1)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \cdot (\Delta x_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \cdot (\Delta x_n)^2}$$