

# UPRAVLJANJE TEHNOLOŠKIM PROCESIMA

Prof. dr Milovan Radulović  
MSc Luka Martinović

- Literatura:

- Slajdovi i materijali koji će biti objavljeni na web stranici predmeta za svaku temu;
- Božidar Matić, Projektovanje sistema automatske regulacije i upravljanja tehnološkim procesima;
- K. Astrom, T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning.
  
- Ispit: kolokvijum 50 bodova  
završni ispit 50 bodova

# Nastavne teme

- Uvod
- Metode eksperimentalne identifikacije objekta upravljanja
- Tehnički uslovi za regulacione sisteme
- Prosta regulaciona kontura
- Sinteza i podešavanje proste regulacione konture
- Složene upravljačke konture
- Princip formalnog projektovanja regulacionih kontura
- Upravljanje prelaznim stanjima kompleksnih objekata

# Upravljanje (industrijskim) procesima

Šta je zapravo upravljanje?

*Gouverner, c'est choisir*  
(Upravlјati, to znači odabirati)

*Duc de Levis (1764-1830)*

Izbor može biti nasumičan, intuitivan, informisan,  
"jedino moguć"...

a rezultat izbora neočekivan, očekivan, nepovoljan,  
željen,...

## Očekivani (željeni!) ishodi

- Razumijevanje teorije upravljanja kao primijenjene filozofije (a ne primijenjene matematike)
- matematički rezultati
  - nijesu identitet sa realnošću
  - zaboravljaju se
  - stalno se pojavljuju novi
- razumijevanje pristupa (filozofije) upravljanja, svijest o učinjenom kompromisu sa realnošću omogućava da se
  - sagleda opseg važenja rezultata
  - brzo obnove zaboravljeni teorijski rezultati
  - lako nauče novi
  - uspostavi veza sa drugim nepoznatim problemima

## UPRAVLJANJE I REGULACIJA KAO INTUITIVNA AKTIVNOST

"U intuiciji nema ničeg mističnog, već prije svega osećaja kako nešto treba da radi. "

- **Proces** je prirodna operacija koja se progresivno odvija kroz niz postepenih promjena koje slijede jedna drugu na relativno utvrđen način i vode ka određenom rezultatu ili ishodu, ili vještačka ili voljno izazvana progresivna operacija koja se sastoji od niza upravljanih akcija ili pokreta koji su sistematično usmjereni ka određenom rezultatu ili cilju
- Ukoliko se, na neki način, utiče na vrstu i redosled odvijanja promjena i krajnji ishod će biti drugačiji.
- Određujući vrstu spoljnog uticaja – *upravljanja* - čovjek zapravo, od mogućih ishoda, *odabira* onaj koji mu, iz nekog razloga, najviše odgovara.

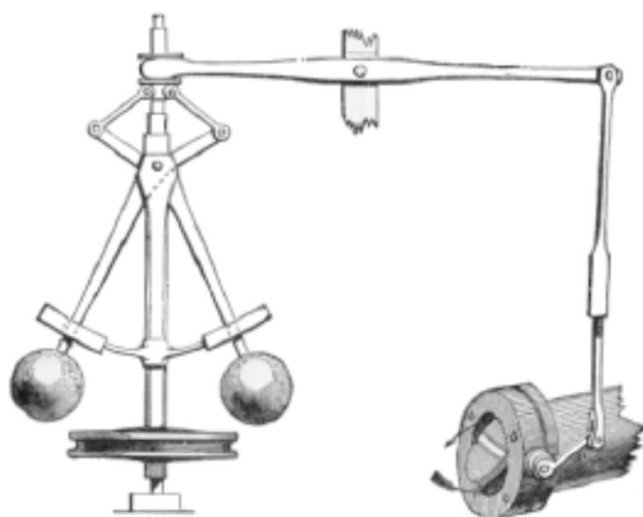
- Subjektivna procjena ishoda –  
upravljanje je individualna umjetnost koja je počivala na sposobnosti operatera da prepozna uslove pod kojima proces radi i da intuitivno odabere odgovarajuću upravljačku akciju.
- Mjerenje relevantnih parametara;  
upravljanje je i dalje intuitivno, ali se odluka donosi na osnovu objektivnih pokazatelja njenih posledica.
- Standardizovanje procedura izbora omogućava isključivanje čovjeka ⇒
  - o **Regulatori** – održavanje referentnih vrednosti, određivanje reference intuitivno
  - o **Sistemi automatskog upravljanja** – projektovanje kontrolera, oponašanje čovjeka (ili onoga što mi razumijemo u tom ponašanju)

## PRIMITIVNO DOBA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

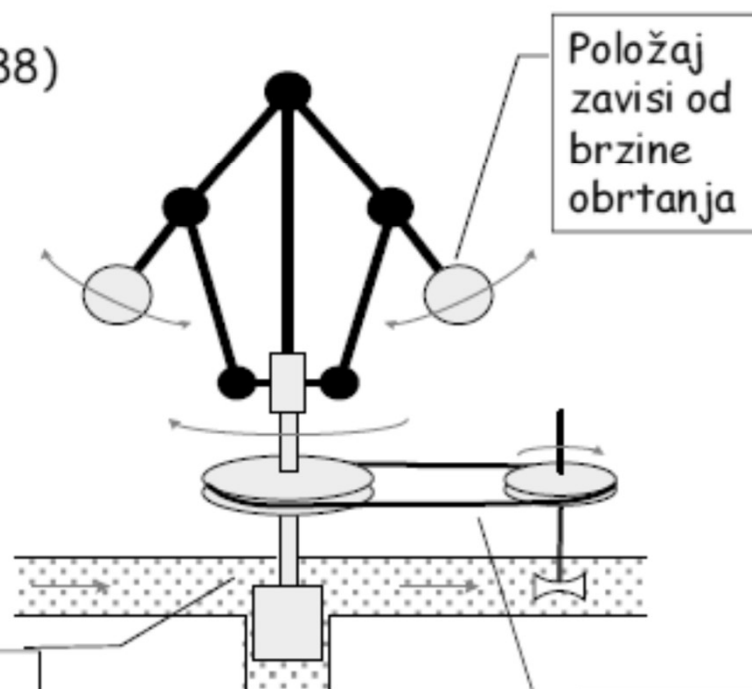
Industrijska revolucija - druga polovina XVIII veka

Regulator kao poseban uređaj ⇒

Vatov centrifugalni regulator (1788)



Protok zavisi od otvora u  
cevi (položaja ventila)



Položaj  
zavisi od  
brzine  
obrtanja

Brzina  
obrtanja  
zavisi od  
protoka

Matematički model regulatora - Maksvel 1868

Teorijska razmatranja povratne sprege - 1943. godina



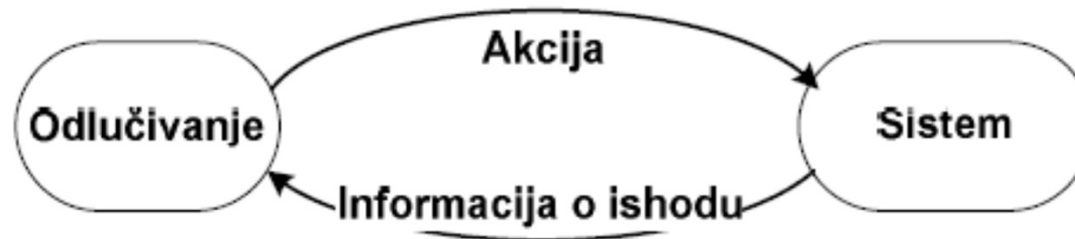
# KLASIČNO DOBA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

- Prvi i drugi svjetski rat – porast zahtjeva, interesa i ulaganja
- Osnovni problem – pozicioniranje artiljerijskog oružja
- Postavka problema upravljanja
  
- Upravljanje ima za cilj da u nekom zadanom vremenskom period obezbijedi željeni ishod
  
- Osnovno pitanje: kako promijeniti buduće ponašanje sistema
- Potrebno je
  - *specificirati željeni ishod*
  - *utvrditi moguće akcije kojima se utiče na ponašanje sistema*
  
- Zadatak projektovanja
  - *formiranje algoritma (kontrolera) pomoću koga će se odabrati akcija koja dovodi do željenog ishoda*

# KLASIČNO DOBA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

- Mogući pristupi u određivanju algoritma
  - *Uzaludni pokušaji (trial & error)* – zametno
  - *razumijevanje načina rada procesa* – eliminacija niza mogućih akcija
    - ✓ Proces donošenja odluka postaje rutina
    - ✓ konstrukcija uređaja koji donosi odluku
- Mogući pristupi u projektovanju kontrolera
  - *utvrde se fizički zakoni koji opisuju rad sistema i izračuna upravljanje* – nemogućnost korekcije pri odstupanju
- Zatvaranje povratne sprege
  - *Upravljanje na osnovu stvarnog, a ne očekivanog učinka*

(Norbert Wiener, *The Human Use of Human Beings*, 1947)



# KVANTIFIKACIJA KAO OSNOV PROJEKTOVANJA KLASIČNIH KONTROLERA

## *Od spektra pojmova do brojne ose*

- Upravljanje kao oponašanje čoveka
- Formalizacija principa povratne sprege zahtijeva preslikavanje:
  - moći opažanja - čula
  - spособnosti učenja i donošenja odluka na osnovu iskustva - ?
- Po analogiji sa modeliranjem dinamičkih procesa usvojen je simbolički jezik matematike
  - Čula zamijenjena mjernom opremom
    - spektar pojmova zamijenjen brojnim vrijednostima,
    - objektivizacija na račun bogatstva raznovrsnosti
- Mehanizam odlučivanja nije razmatran, sve je prepušteno povratnoj sprezi

## MATEMATIČKI MODEL PROCESA

- Matematički model procesa je funkcija kojom se skup dozvoljenih pobuda (U) procesa preslikava u ishode (Y)

$$Y = \mathcal{H}(U)$$

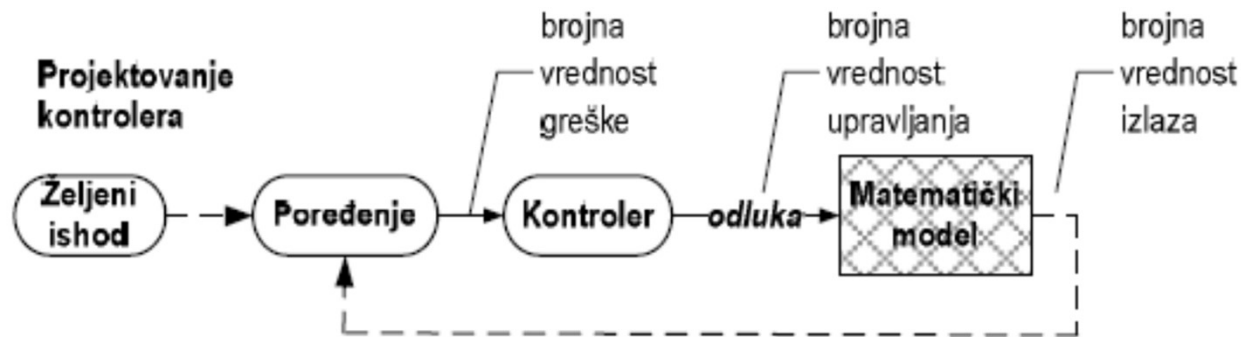
- Mehanički sistemi – modeli zasnovani na Njutnovim zakonima mehanike
- Analiza sistema svodi se na rešavanje diferencijalnih jednačina
  - Grafo-analitičke metode
  - Analogni računari
- Upravljanje na osnovu inverzije modela (kontroler u otvorenoj sprezi)

$$Y = \mathcal{H}(U) \quad \Rightarrow \quad U = \mathcal{H}^{-1}(Y)$$

$$U = \mathcal{H}^{-1}(Y_{\text{ref}}) \Rightarrow Y = \mathcal{H}\left(\mathcal{H}^{-1}(Y_{\text{ref}})\right) = Y_{\text{ref}}$$

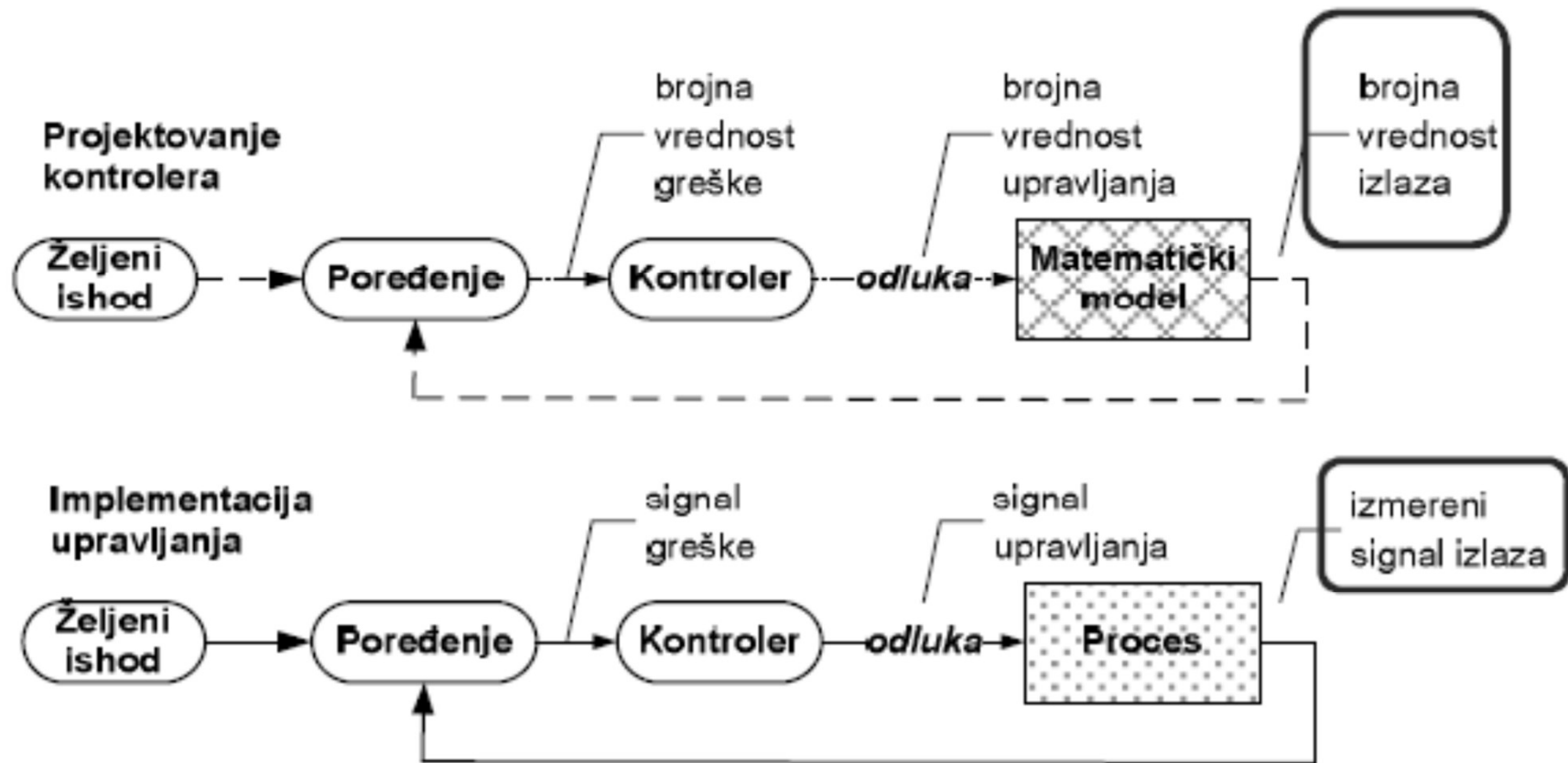
## SIGNAL GREŠKE I SIGNAL UPRAVLJANJA

- Kontroler u zatvorenoj sprezi – uređaj koji prima rezultat poređenja ostvarenog i željenog ishoda i na osnovu njega generiše pobudu procesa tako da se njegov ishod približi željenom
- *Poređenje* –
  - Ishod brojna vrijednost (rješenje diferencijalne jednačine)
  - Željeni ishod mora da bude brojna vrijednost – referentna veličina
  - *Signal greške* – razlika dvije brojne vrednosti



$$U = \mathcal{D}(E)$$

# PROJEKTOVANJE I IMPLEMENTACIJA



# OCJENA PERFORMANSE SISTEMA

- Poređenje rešenja
  - Egzistencija stacionarnog stanja
  - Tačnost u stacionarnom stanju
  - Trajanje prelaznog procesa
  - Izgled prelaznog procesa

## Osnovni problemi:

- Mehanizam rada sistema je nedovoljno poznat
- Merenja su neprecizna
- Cilj upravljanja nije najjasnije definisan

# POTRAGA ZA MEHANIZMOM ODLUČIVANJA

*Koliko i kakvih pravila koristi ljudski mozak*

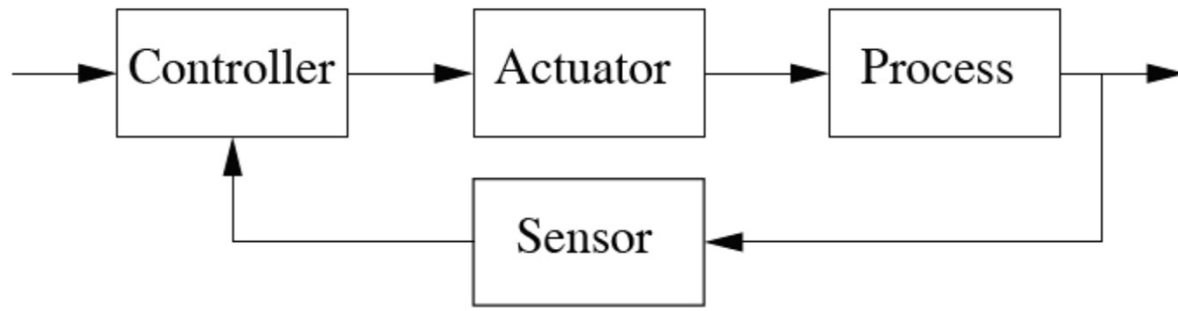
- Ograničena efikasnost povratne sprege
  - Pretpostavka da se se inteligentno ponašanje čoveka može opisati do mjere preciznosti koja bi omogućila da se ono simulira pomoću računara –  
*vještačka inteligencija* – potcijenjena težina problema  
Prepoznavanje oblika, neuralne mreže, ekspertski sistemi, sistemi odlučivanja itd.
  - Složeniji matematički model, drugačiji kriterijumi performanse, sofisticiraniji algoritmi upravljanja (*Savremeno doba automatike*)



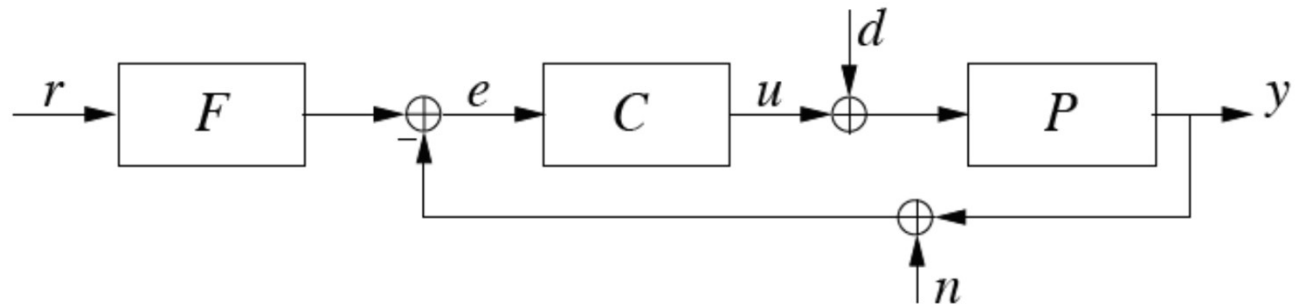


## SAVREMENI PERIOD AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

- Metode za identifikaciju matematičkog modela procesa
  - teorija stabilnosti
  - prostor stanja – optimalno upravljanje
  - impulsni sistemi
  - borba protiv poremećaja – adaptivno upravljanje
- Mikroračunari
  - diskretni modeli – prediktivno upravljanje
- Paradoks klasifikacije
  - Periodi se prate po teorijskim rezultatima a ne po primjeni –
  - preko 90% kontrolera koji rade u industriji zasnovano je na klasičnom projektovanju
  - rješenja iz “savremenog perioda” koriste se za izuzetno složene procese



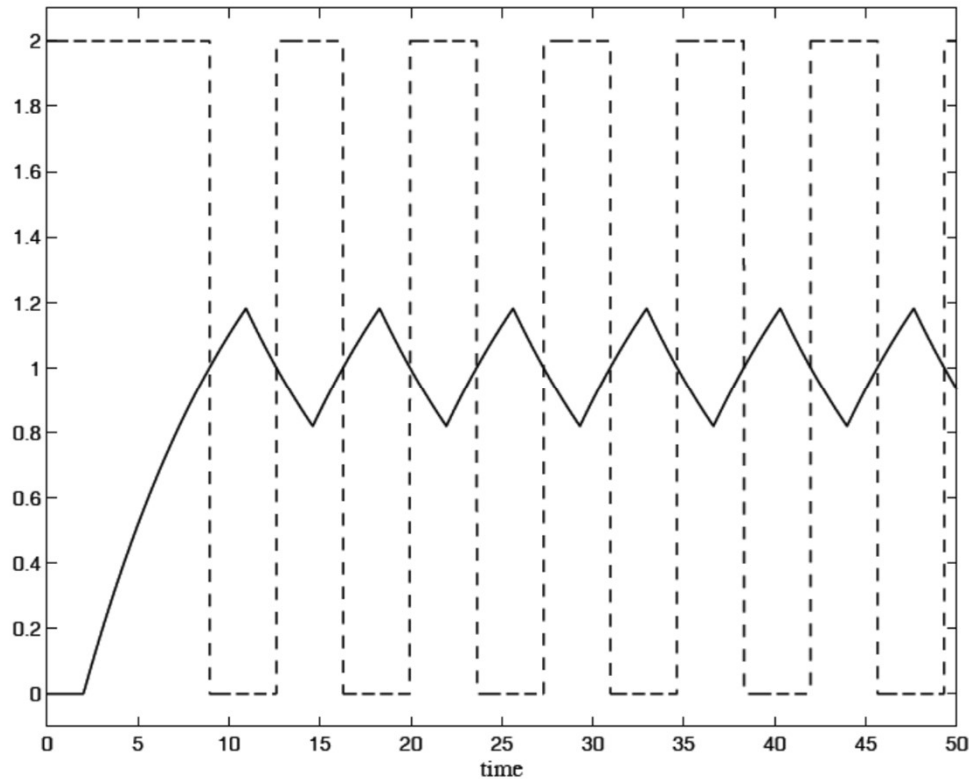
Tipične komponente feedback sistema



Šematski prikaz negativne povratne sprege

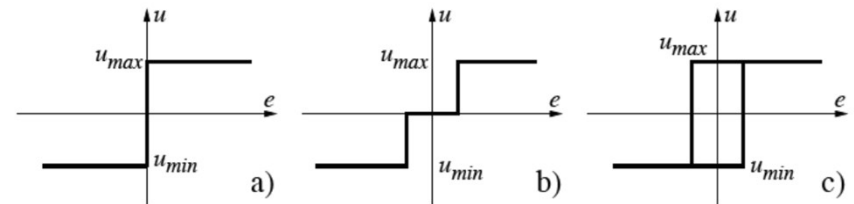
- Da bi se realizovala kontura sa negativnom povratnom spregom neophodno je raspolagati adekvatnim sensorima i aktuatorima kao i mehanizmom za provođenje upravljačkih akcija.
- Negativna povratna sprega ima zanimljive i korisne osobine:
  - Redukuje efekte poremećaja
  - Može učiniti sistem neosjetljivim na varijacije u procesu
  - Pomaže u kreiranju bolje definisanih relacija među varijablama sistema

# ON-OFF upravljanje



Primjer On–Off upravljanja.  
puna linija – procesna varijabla;  
isprekidana linija - upravljačka varijabla.

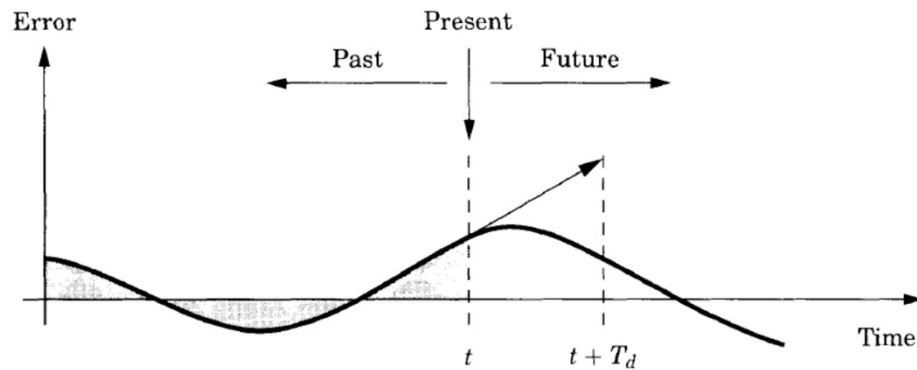
$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{if } e > 0 \\ u_{min} & \text{if } e < 0 \end{cases},$$



- a) Idealni ON-OFF kontroler
- b) Modifikovani sa mrtvom zonom - tropozicioni
- c) Modifikovani sa histerezisom

# PID kontroleri

- PID kontroler je najčešće rešenje za praktične probleme upravljanja. Iako su kontroleri sa proporcionalnim i integralnim delovanjem korišćeni od vremena kada su vjetrenjače i parne mašine bile dominantne tehnologije, trenutni oblik PID regulatora pojavio se sa pneumatskim kontrolerima 1930 -ih.
- Kontroleri su implementirani na mnogo različitih načina korišćenjem mehaničke, pneumatske, elektronske i računarske tehnologije.
- Razvoj se ubrzao kada su se pojavile implementacije mikroprocesora 1980 -ih. Jedan od razloga je bio taj što su kompjuterske implementacije omogućile dodavanje funkcija poput automatskog podešavanja i dijagnostike, koje su vrlo korisne za korisnike. Iz inženjerske perspektive, posebno je zanimljivo analizirati ono što se dogodilo tokom tehnoloških promjena, kada su neke važne karakteristike ponovo otkrivene, a druge dodate.



- PID kontroler sprovodi upravljačke aktivnosti kao sumu tri izraza zasnovane na prethodnoj ( I –dejstvo), trenutnoj ( P-dejstvo) i budućoj (D – dejstvo) vrijednosti signala greške

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right).$$

- PID kontroler se razvio tokom vremenskog perioda koji se proteže na najmanje 250 godina. Korisno je imati neku perspektivu ovog razvoja da biste razumjeli mnoga pitanja. Tehnologija koja se koristila za implementaciju kontrolera prirodno se značajno promijenila tokom godina. Prvi kontroleri su bili mehanički uređaji (centrifugalni regulatori) koji su se koristili za upravljanje vetrenjače i parne mašine. Mjerenje ugaone brzine kombinovano je sa aknuacijom ventila.
- Do značajne promene je došlo tokom razvoja upravljanja industrijskim procesima. Tada su funkcije mjerenja, upravljanja i aknuacije odvojene i posebni uređaji su izvršavali odgovarajuće radnje u upravljačkoj konturi.
- Zanimljiva karakteristika je bio prenos signala i računanje obavljano pneumatski. Do velikog napretka došlo je kada su cijevi za prenos pritiska i nivoi pritiska standardizovani na 3-15 PSI. Ovo je omogućilo kombinovanje senzora, kontrolera i aknuatora različitih proizvođača.

- Na ovaj način je omogućeno da se regulatori mogu postavljati u u izdvojenim prostorijama koje su udaljene od senzora i aktuatora.
- Počevši od 1950 dostupne su elektronske verzije PID regulatora
- Upravljačke akcije su realizovane sa jednostavnim analognim računarima baziranim na operacionim pojačavačima.
- Prenos signala je takođe standardizovan kao strujni signal u opsegu 4 -20 mA. Reprezentujući nulu sa nenultom vrijednošću struje bilo je značajno sa aspekta dijagnostike.
- Značajan napredak se dogodio kada su za implementaciju regulatora počeli da se koriste digitalni računari. To je omogućilo razvoj centralizovanih sistema upravljanja, jer je bilo isplativo samo u velikim sistemima.
- Uvođenjem mikroprocera 1970-tih bilo je moguće implementirati i jednostavne regulatore pomoću računara.
- Danas se doživljavamo druge tehnološke promjene. Analogne implementacije ponovo se pojavljuju u mikro mehaničkim električnim sistemima (MEMS), i digitalni kontroleri se realizuju pomoću FPGA tehnologija čime se povećava značajno brzina uzorkovanja (sampling period).

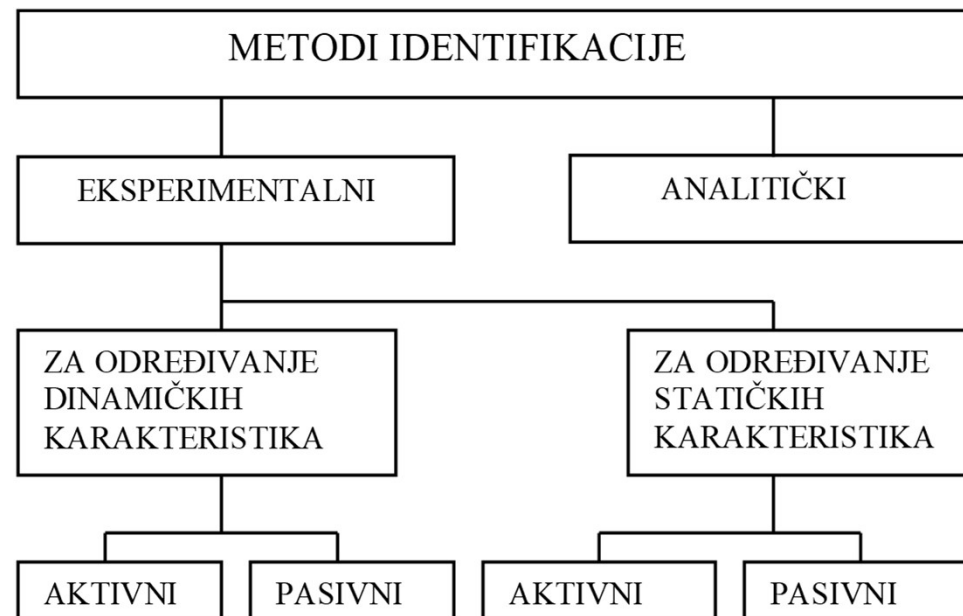


- PID regulatori su se široko koristili u ranom period razvoja upravljanja 1870- tih do 1920. Savremeni oblik PID regulatora pojavio se tokom razvoja upravljanja industrijskim procesima 1930-tih i 1940-tih godina. PPID regulator je i dalje standardni alat za rješavanje problema upravljanja industrijskim procesima.
- U detaljnoj studiji o stanju tehnike u upravljanju industrijskim procesima od strane proizvođača električnih mjernih instrumenata u Japanu prezentovano je da je više od 90% upravljačkih kontura bile PID tipa
- Prema analizama u SAD pokazano je da postoji više od 8 miliona industrijskih objekata u: petrohemiji, industriji papira, energetici i metalnoj industriji. Svaki objekat ima između 500 i 5000 regulacionih petlji od kojih je 97% PID tipa
- Optičke memorije za CD i DVD sadrže tri PID petlje za upravljanje brzinom rotacije, pozicioniranje i praćenje zapisa.
- Veoma veliki je broj knjiga u kojima se razmatra problem podešavanja PID regulatora.
- Zbog velikog broja PID regulatora i njihove široke upotrebe i dalje postoje značajna istraživanja u poboljšanju praktične realizacije.

- Najbolji primjer koji opravdava navedeno je izrada projekta revizije upravljačkog sistema u fabrici papira u Kanadi
  - Fabrika ima 2000 upravljačkih petlji
  - 97% je zasnovano na PI regulatoru
  - 20% petlji je radilo dobro
  - 30% je radilo loše zbog lošeg podešavanja parametara regulatora
  - 30% je radilo loše zbog problema sa izvršnim organima (ventili i drugi elementi)
  - Preostalih 20% petlji je imalo problem sa sensorima, loš izbor učestanosti odabiranja, loši ili nepostojeći filtri za antialiasing
- Slična zapažanja su data u drugim analizama:
  - 30% regulatora radi u ručnom režimu rada
  - 20% petlji radi sa parametrima koje je postavio proizvođač
  - 30% petlji radi loše zbog problema sa sensorima i aktuatorima

# EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA OBJEKATA

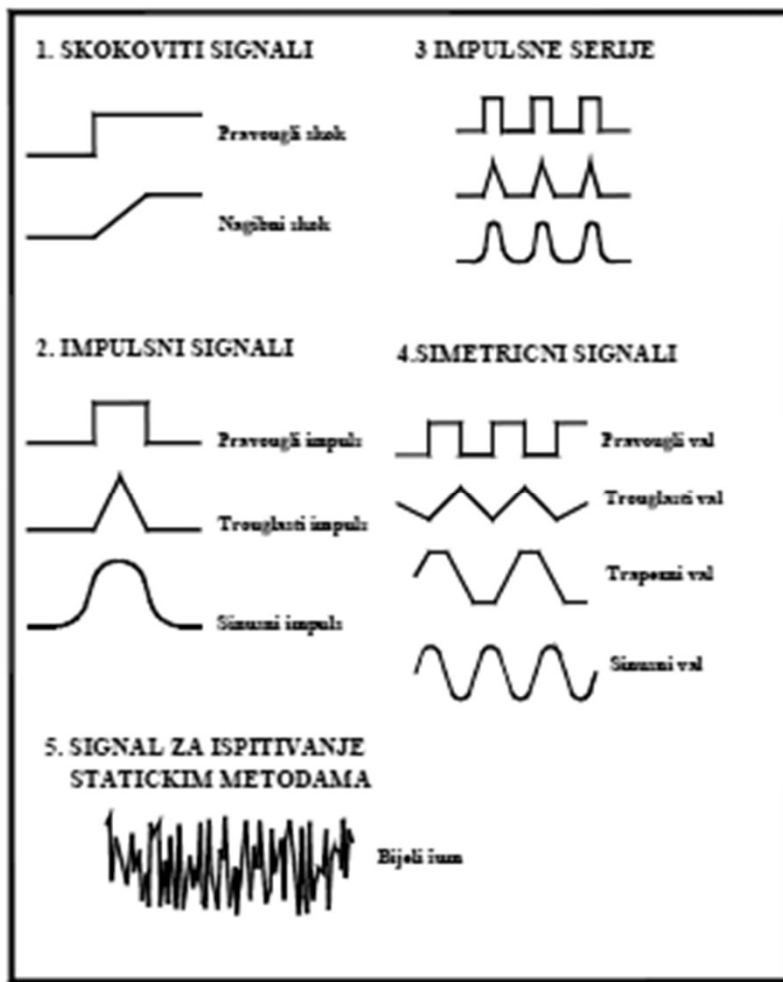
- Pod identifikacijom objekta se podrazumjeva proces pronalaženja skupa formula, tablica i grafova koji kvantitativno opisuju statičke i dinamičke veze među veličinama (matematički model) objekta kojim se želi upravljati.



- Tačan matematički model karakteriše dinamiku procesa kao i njegovu statiku, tj. periode vremena kada su vremenski izvodi nezavisnih i zavisnih veličina jednaki nuli. Često je dobijanje tačnog modela za složene procese veoma teško, a rezultati se dobijaju u glomaznoj i za praktične svrhe teško iskoristivoj formi. Zato se dopuštaju uprošćavanja, koja se sastoje u tome da se objekat smatra linearnim u oblasti male promjene veličina koje ulaze u model. U tom slučaju se model može predstaviti u vidu statičke karakteristike koja opisuje cijeli dijapazon radnih režima i skupa dinamičkih karakteristika iz kojega svaka približno opisuje dinamička svojstva u režimima objekta koji odgovaraju nekom dijelu statičke karakteristike
- Postojeće metode identifikacije, u zavisnosti da li je za dobijanje modela potrebno eksperimentalno djelovanje na postojeći objekat ili ne, se dijele na eksperimentalne i analitičke.
- Ovdje će biti razmatrane eksperimentalne metode. Analitičke metode zasnovane su na izučavanju fizičkih i hemijskih procesa koji teku u objektu u stvari odražavaju nivo naučnih saznanja u odgovarajućim oblastima i omogućavaju dobijanje modela koji kvalitativno opisuje pojave koje se dešavaju u objektu.
- Međutim, najčešće, tako dobijen model traži eksperimentalnu provjeru. Tako se do najtačnijeg modela dolazi kombinovanim analitičko-eksperimentalnim metodama.

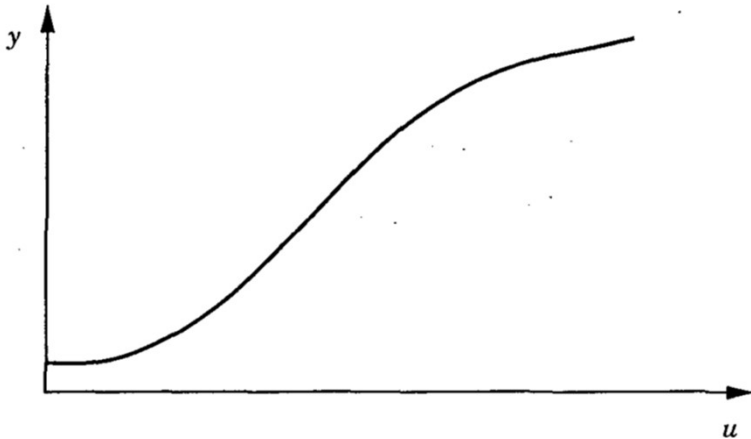
- Eksperimentalne metode određivanja dinamičkih i statičkih karakteristika mogu se podijeliti na aktivne i pasivne. Korišćenje aktivnih metoda traži uvođenje u toku eksperimenta specijalnih djelovanja na objekat koja izazivaju promjene izlaznih veličina. Te promjene se koriste kao polazne informacije koje nakon određene obrade daju model objekta.
- Pasivne metode koriste informacije koje se dobijaju posmatranjem objekta u njegovoj normalnoj eksploataciji. Nikakva specijalna djelovanja na objekat pri tome nisu potrebna.
- Pri sprovođenju aktivnog eksperimenta za određivanje dinamičkih karakteristika na ulaz ispitivanog objekta daju se ispitna djelovanja (ispitne smetnje) određene forme. Za pouzdano određivanje karakteristika neophodno je ponoviti, a nekada i nekoliko puta, eksperiment. U tom slučaju tačnost uveliko zavisi i od tačnosti ponavljanja ispitne smetnje. Tačno manuelno ponavljanje je često teško ostvariti, te da se ne bi dobilo rasipanje rezultata zbog nejednakih ispitnih smetnji najpouzdanija je upotreba specijalnih generatora standardnih formi ispitnih signala.

Na slici su pokazane neke od najčešće korišćenih formi ispitnih signala.



Osim eksperimentalnih i analitičkih metoda, očigledno je da široke mogućnosti daju kombinovane analitičko – eksperimentalne metode. Obično primjena čistih analitičkih ili pasivnih eksperimentalnih metoda dovodi do modela koji u opštim crtama pravilno odražavaju procese u objektu, ali bez kvantitativne tačnosti. Tada se aktivnim metodama pristupa utačnjavanju brojčanih iznosa koeficijenata modela dobijenog analitičkim ili pasivnim eksperimentalnim putem.

# Statički model



- Svako modelovanje procesa treba započeti utvrđivanjem statičkog modela.
- Može se koristiti za određivanje opsega upravljačkog signala potrebnog za promjenu izlaznog procesa u željenom opsegu, za podešavanje veličine aktuatora i za izbor rezolucije senzora.
- Takođe se može koristiti za procjenu da li su varijacije statičkog pojačanja toliko velike da se moraju uzeti u obzir u dizajnu upravljanja.
- Statički model se može dobiti eksperimentalno na nekoliko načina. Prirodan postupak je da se ulaz drži na konstantnoj vrijednosti i mjeri se vrijednost izlaza u ustaljenom stanju (steady – state). Time se dobija jedna tačka na procesnoj karakteristici. Eksperiment se ponavlja za puni opseg promjene ulaza.

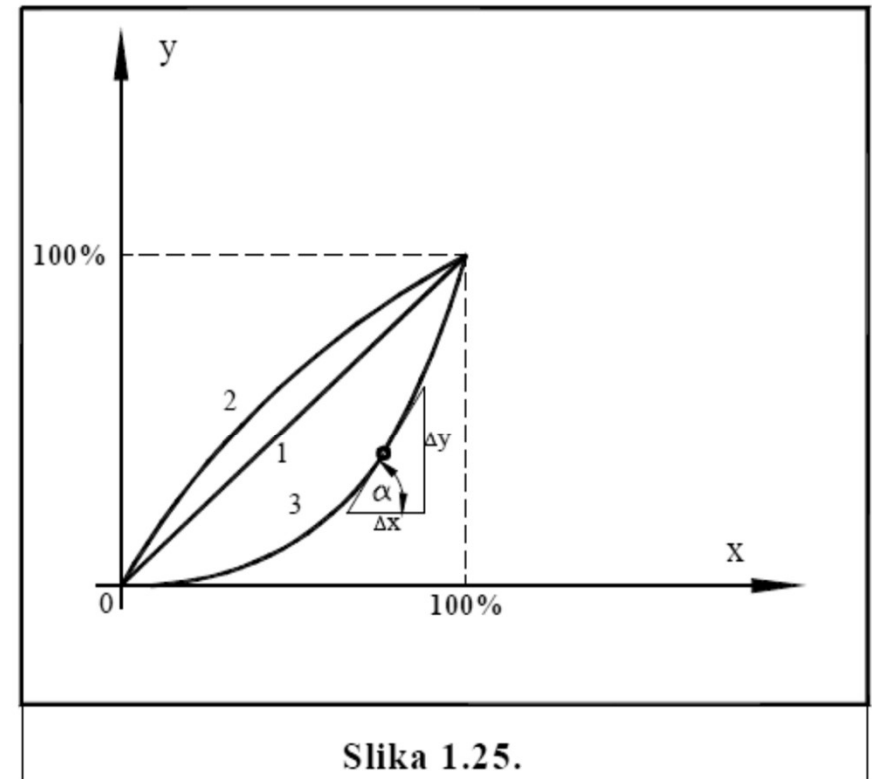
# Statički model

- Statičke karakteristike objekta su sadržane u dinamičkim karakteristikama i mogu se dobiti kao rezultat dinamičke identifikacije bilo kojeg tipa jednostavnim prelazom  $t \rightarrow \infty$ .
- U slučaju da je potrebno imati samo statičke karakteristike objekta, a dinamičke za taj slučaj nijesu interesantne, nije racionalno pristupati dinamičkoj identifikaciji, te nakon dobivanja rezultata prelazom  $t \rightarrow \infty$  odbaciti ogroman dio informacija sadržanih u dinamičkim karakteristikama i iskoristiti samo mali preostali dio – statičke karakteristike.
- Daleko je racionalnije izvršiti samo statičku identifikaciju objekta i kao rezultat dobiti statičke karakteristike direktno.
- Pri tome se primjenjuju posebne metode, razvijene za identifikaciju statičkih karakteristika.



# Statički model

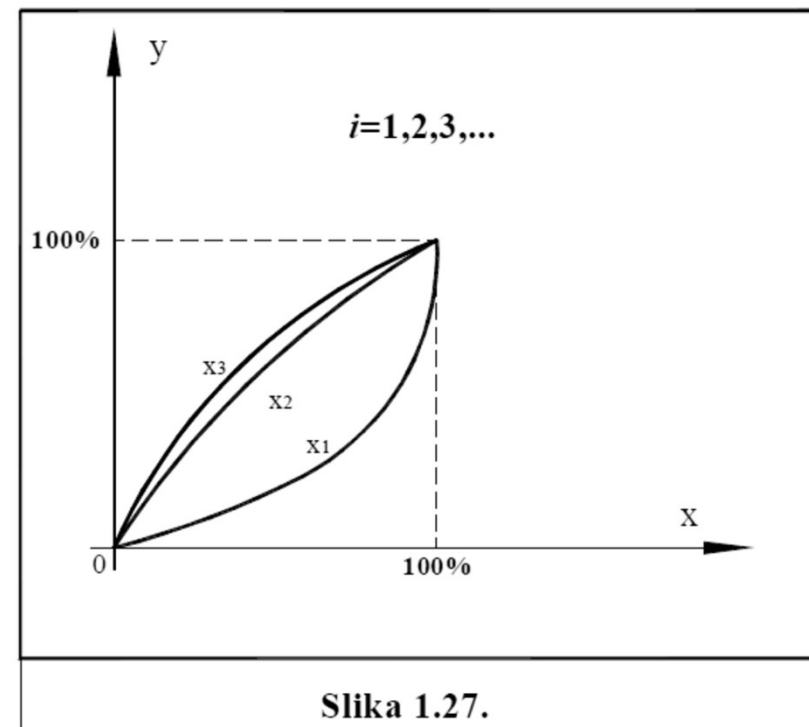
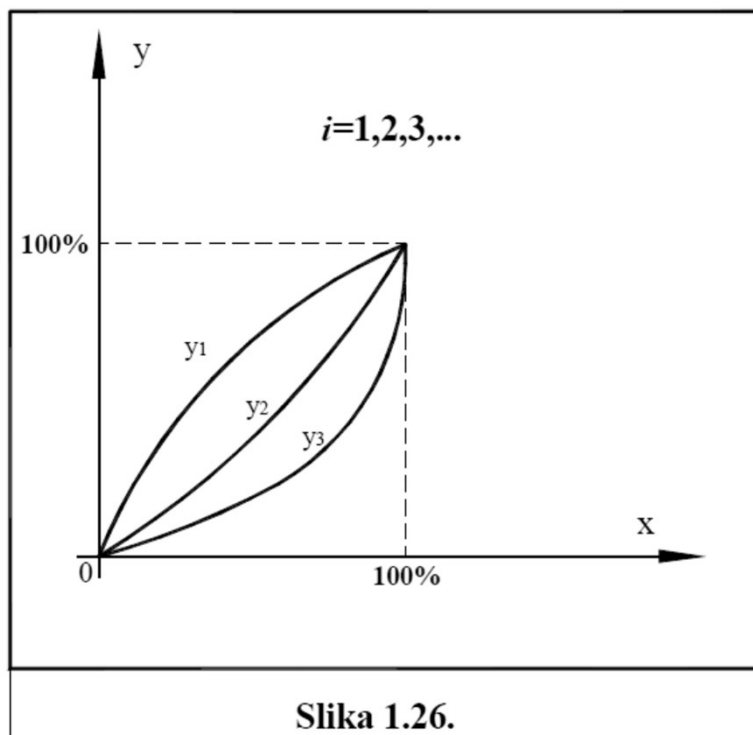
- Funkcijska zavisnost između ulazne i izlazne veličine objekta u stacionarnom stanju ili statička karakteristika može se snimiti najjednostavnije kod objekta sa jednom ulaznom i jednom izlaznom veličinom.
- U tom slučaju se dobije karakteristika koja može biti linearna ili nelinearna. gdje je 1. linearna, 2. nelinearna konveksna i 3. nelinearna konkavna karakteristika.
- Nagib tangente u bilo kojoj tački karakteristike definiše pojačanje objekta u toj radnoj tački.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = k_{ob} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

# Statički model

- U slučaju da jedna ulazna veličina djeluje na nekoliko izlaznih veličina, objekt se tada opisuje familijom statičkih karakteristika (sl. 1.26.), kao i u slučaju da nekoliko ulaznih veličina djeluje na izlaznu veličinu (1.27.).



# Statički model

- Za slučaj jedna ulazna – jedna izlazna veličina snimanje statičkih karakteristika je veoma jednostavno. Ulazna veličina  $x$  se mijenja u skokovima  $\Delta x$  unutar puno opsega, te se nakon smirenja prelaznog procesa izvrši očitavanja izlazne veličine
- Pri tome se procedura može i automatizovati. Kao ulazna veličina  $x$  se upotrijebi nagibna funkcija koja se istovremeno vodi na  $x$  ulaz, a izlazna veličina  $y$  na  $y$  ulazu  $xy$  registratora.
- Pri tome je važno pogodno izabrati brzinu promjene nagibne funkcije, pošto prebrza promjena može unijeti, uslijed dinamike ispitivanog objekta, prividnu nelinearnost.
- Često se umjesto nagibne funkcije upotrebljava trouglasti talas. Ako je frekvencija trouglog talasa previsoka, prividna nelinearnost se manifestuje kao histerezis.
- Ali, ako je objekat sa čistim kašnjenjem, ova automatizacija mjerenja nije provediva, te se snimanje mora provesti tačku po tačku sa obavezanim čekanjem smirenja prelaznog procesa.

# Statički model

- Nešto je složenija identifikacija statičkih karakteristika objekta sa više ulaza  $x_i$  koji utiču na jedan izlaz  $y$ :

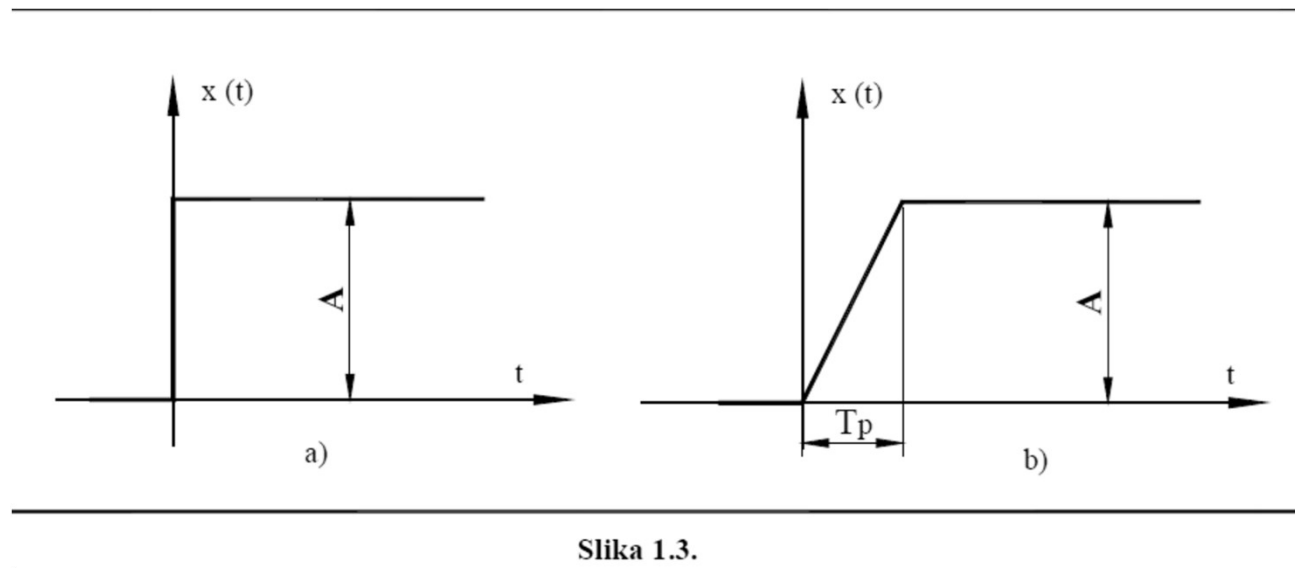
$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

pri čemu je funkcija  $f$  nelinearna.

- Temelj eksperimentalne identifikacije u ovom slučaju je metod Boks–Wilsona. Ovaj metod omogućava pomoću specijalnog eksperimenta određivanje jednačinee hiperavni ili hiperpovršine drugog reda koja približno opisuje u objektu stvarno postojeću zavisnost u okolini nekog skupa argumenta  $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0}$  koji se naziva baznom tačkom.

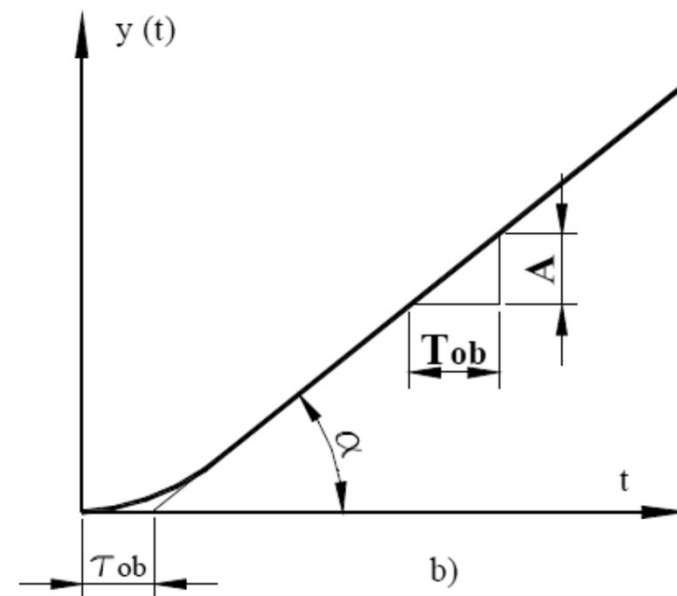
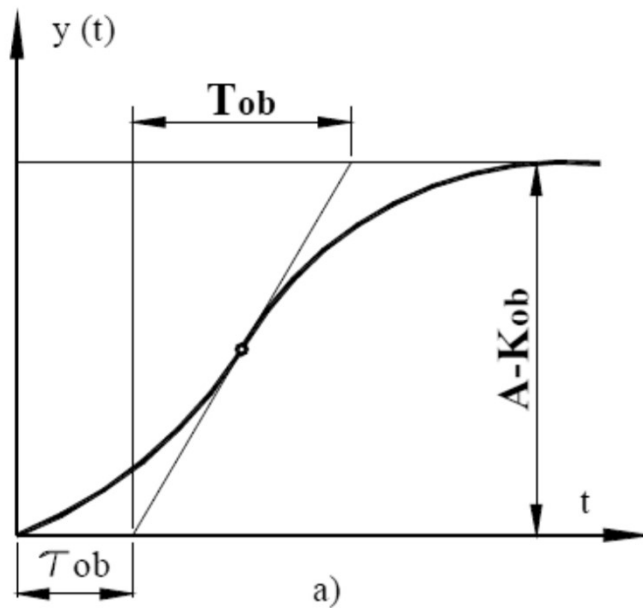
# Dinamički model - Metod odskočne funkcije

- Najrasprostranjenija forma ispitnog djelovanja na objekat je odskočna funkcija prikazana na sl. 1.3. Odskočna ispitna funkcija se definiše kao trenutna promjena ulazne veličine ispitivanog objekta (odskočna pravougaona funkcija) ili postepena promjena sa jednolikom brzinom (nagibni skok). Ako je veličina amplitude **A** ispitne funkcije jednaka jedinici, tada se ispitna funkcija naziva jediničnom.



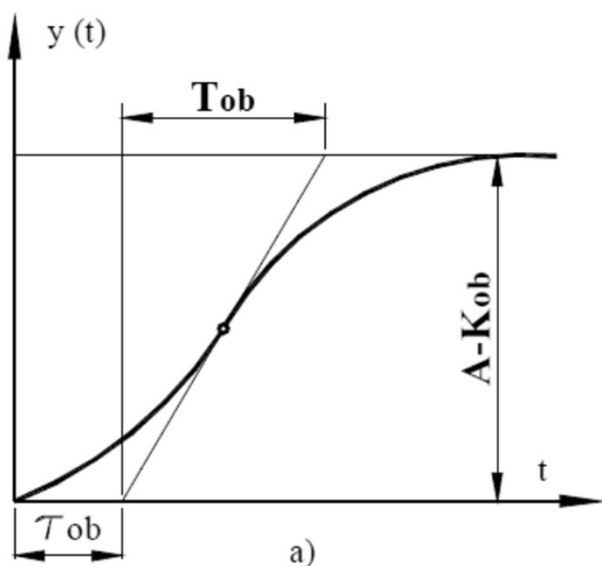
Slika 1.3.

- Reakcija  $y(t)$  ispitivanog objekta na ispitno djelovanje  $x(t)$  naziva se vremenskom karakteristikom ili odzivom objekta, pri uslovu da se u momentu uvođenja ispitnog djelovanja objekat nalazio u stanju mirovanja.
- Bez obzira na raznolikosti dinamičkih svojstava tehnoloških procesa koji se podvrgavaju regulisanju, može se ukazati na činjenicu da su im vremenske karakteristike obično monotone funkcije vremena tipa prikazanog na sl. a. i b, gdje se razmatraju odzivi na ispitnu funkciju tipa 1.3.a.



- U prvom slučaju odziv vremenom stremi nekom novom stacionarnom stanju. Takvi objekti su dobili naziv objekta sa samoizravnavanjem ili statički objekti.
- U drugom slučaju objekt nema svojstvo da poprimi novo stacionarno stanje i takvi objekti se nazivaju objekti bez svojstva samoizravnanja ili astatski objekti.
- U početnom dijelu vremenske karakteristike zapaža se više ili manje izraženo kašnjenje. Kod tehnoloških procesa kašnjenje se uglavnom objašnjava ili transportnim efektom ili postojanjem u objektu nekoliko kapaciteta odvojenih jedan od drugoga u kojima se akumulira energija ili materijal, a takođe i postojanjem raspodijeljenih kapaciteta. Moguća je kombinacija transportnog i kapacitivnog kašnjenja.

- Analiza oznaka sa sl..a pokazuje da tangenta u točki infleksije odziva u presjeku sa starim i novim stacionarnim stanjem definira dva parametra odziva, i to  $\tau_{ob}$  i  $T_{ob}$ . Treba napomenuti da se početak odziva računa od momenta skoka ispitnog delovanja na ulazu u objekat. Prema tome:
  - $\tau_{ob}$  je interval vremena određen momentom skoka ispitne funkcije i presjekom tangente povučene u tački infleksije sa starim stacionarnim stanjem odziva
  - $T_{ob}$  je interval vremena određen presjecima tangente povučene u tački infleksije sa starim i novim stacionarnim stanjem.

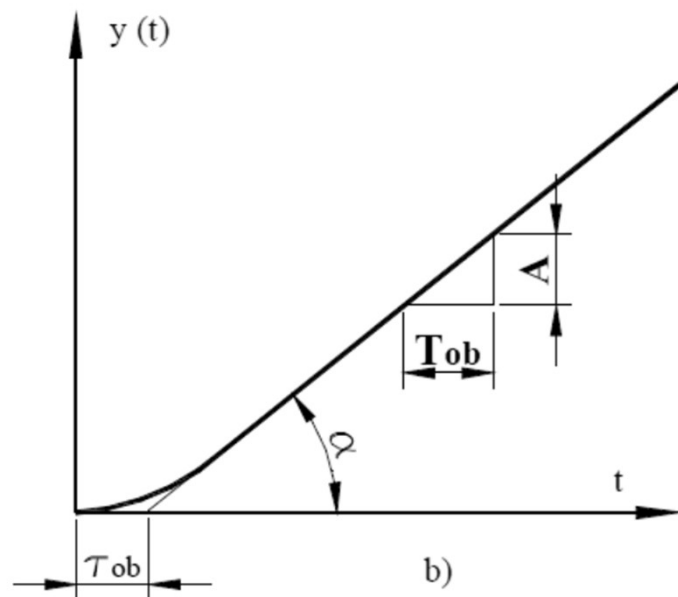


Amplituda odziva definiše pojačanje objekta kao veličinu promjene izlazne veličine objekta pri prelazu iz starog u novo stacionarno stanje pri jediničnoj ulaznoj ispitnoj funkciji:

$$k_{ob} = \frac{Y(\infty) - Y(0)}{A}$$



- Navedene definicije se ne mogu direktno primijeniti na odziv astatkog objekta s obzirom da ne egzistira novo stacionarno stanje, te se uvode za vremensku konstantu i pojačanje uslovne oznake, dok se  $\tau_{ob}$  određuje kao i kod statičkih objekata. Tako se uvodi uslovna vremenska konstanta  $\check{T}_{ob}$  koja je jednaka vremenu potrebnom za promjenu odziva za jedinicu pri jediničnoj skokovitoj ispitnoj funkciji. Uvjetno pojačanje  $\bar{k}_{ob}$  se definiše kao odnos stacionarnog stanja brzine promjene odziva i veličine amplitude ulazne ispitne funkcije.



$$\bar{k}_{ob} = \frac{\dot{Y}(\infty)}{A}$$

$$\bar{k}_{ob} = \frac{1}{\bar{T}_{ob}}$$

- Ovakvim izborom definicija veličina  $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$  i  $\tau_{ob}$ , odnosno  $\bar{k}_{ob}$ ,  $\bar{T}_{ob}$  i  $\tau_{ob}$  stvorena je mogućnost da se složeni, mnogokapacitivni objekat, koji se inače opisuje diferencijalnom jednačinom visokog reda, opiše aproksimativno kao blok prvog reda (statički ili astaticki) sa elementom čistog kašnjenja.
- Ovo omogućava da se procedura identifikacije svede samo na traženje eksperimentalnim putem tri broja ( $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$  i  $\tau_{ob}$ ) odnosno dva broja ( $\bar{k}_{ob}$  i  $\tau_{ob}$ ) pri unaprijed fiksiranoj strukturi modela izraženoj prenosnim funkcijama:

$$W_{ob}(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} e^{-s\tau_{ob}}$$

$$W_{ob}(s) = \frac{\bar{k}_{ob}}{s} e^{-s\tau_{ob}}$$

# komentar

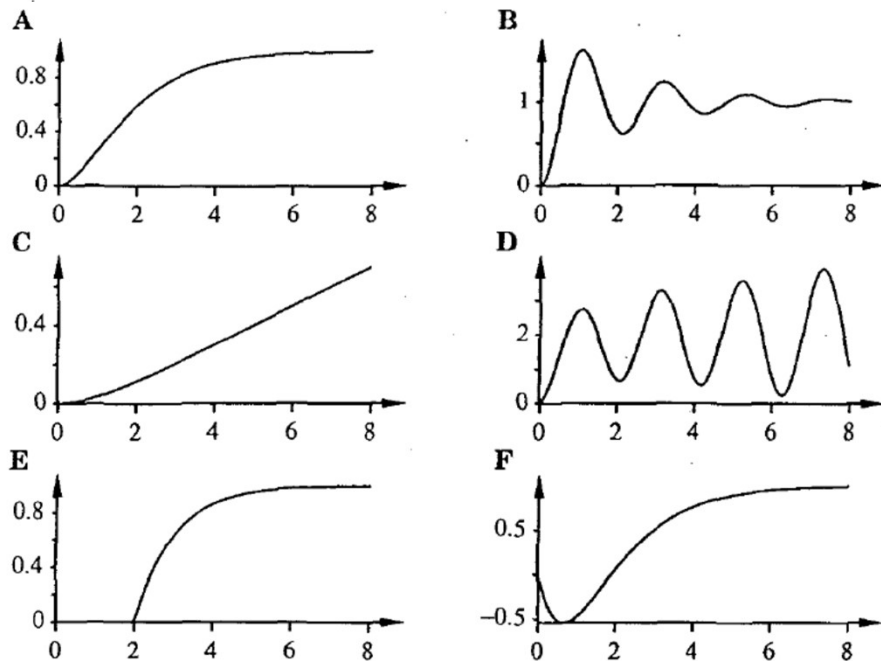
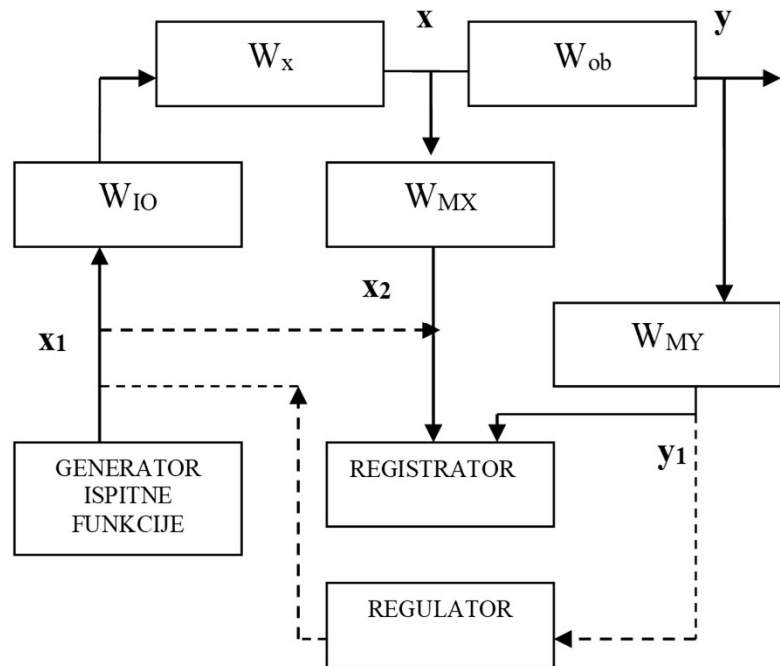


Figure 2.5 Open-loop step responses.

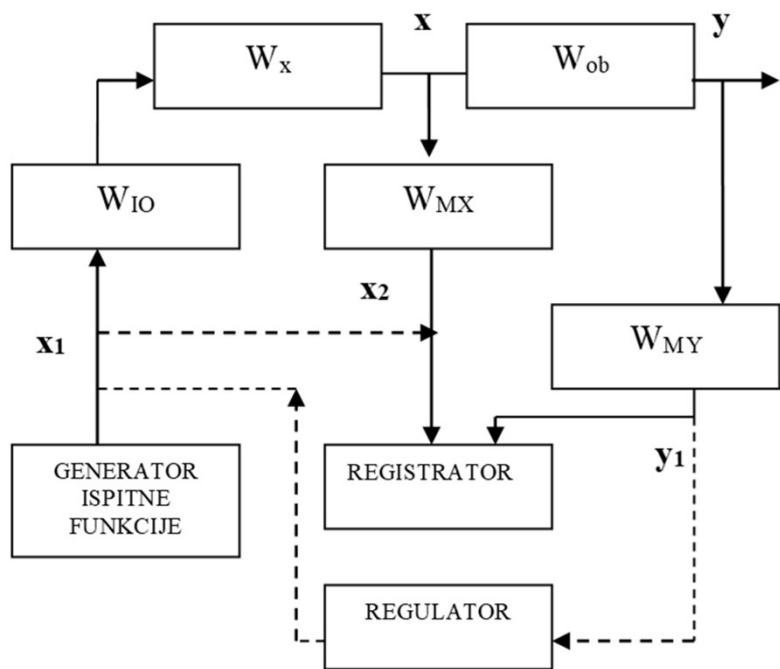
- Na slici su prikazani najčešća dinamička ponašanja na jediničnu step promjenu manipulative promjenljive.
- Kod stabilnih sistema odziv na step pobudu vodi ka novom stanju konstantne vrijednosti.
- Proces A se kreće monotono ka novom stacionarnom stanju i uobičajen je u industrijskim procesima
- Proces B nije uobičajen u procesnom upravljanju. Pojavljuje se kod upravljanja koncentracije recirkulacionih fluida. U mehaničkim sistemima ovaj odziv je čest gdje god imamo elastične materijale (osovine kod servo sistema, konstrukcije sa oprugama i sl.)
- A i B su stabilni, C i D nestabilni
- Sistem C je integrirajući proces –nivo, pritisak u zatvorenim posudama..., Karakteriše ih skladištenje mase ili energije
- Proces E karakteriše veliko vrijeme kašnjenja – transportno kašnjenje
- Proces F tzv. neminimalne faze (nivo vode u kotlovima reaguje na ovaj način nakon step promjene protoka napojne vode)

# Tehnika izvođenja eksperimenta



- Za identifikaciju objekta  $W_{ob}$  potrebno je korelirati veličinu  $x$  kao ulaz i veličinu  $y$  kao izlaz objekta. Pošto zbog dinamike mjernih i registracionih uređaja, to nije moguće izvesti direktno, kao rezultat eksperimenta dobiju se veličine  $x_2$  i  $y_1$ .
- Da bi eksperiment bio uspješan, voma je važno da on otpočne u trenutku kada se objekat nalazi u stacionarnom stanju. Pošto se inercionost tehnoloških procesa kreće u veoma širokim granicama (vremenske konstante u opsegu od dijelova sekunde do preko jednog sata), to je i trajanje stacionarnog stanja, za punu uvjerenost da ono stvarno egzistira, veoma različito za pojedine objekte. Kako se obično prije eksperimenta raspolaže sa nekim apriornim informacijama o očekivanoj dinamici objekta, to se i trajanje stacionarnog stanja određuje po približnoj relaciji.
- $\Delta t_{stac} \approx (2T_{ob})_{očekivano}$

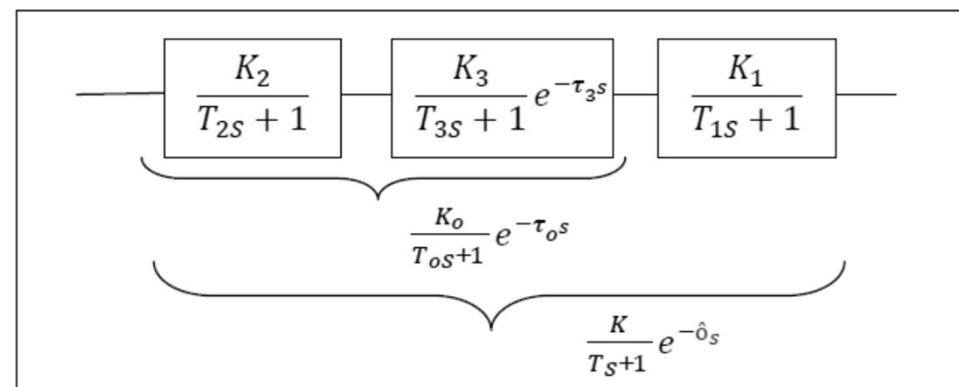
- Ispitna funkcija  $x$  ima dimenziju [% hoda izvršnog organa].
- Veličina amplitude  $A$  step funkcije se bira prema kompromisnom kriterijumu, koji zahtijeva amplitudu dovoljno veliku, da bi se vremenska karakteristika objekta mogla izdvojiti od uvijek prisutnih šumova, ali da pri tome uslovi rada tehnološkog procesa ne budu znatnije narušeni. Pošto je step ispitna funkcija trajna smetnja, to se amplituda obično ograničava na:  
$$A \approx (5 - 15)\% \text{ efektivnog hoda izvršnog organa}$$
- Pod efektivnim hodom izvršnog organa se podrazumjeva hod unutar koga izvršni organ ima svojstvo upravljanja nad objektom. Kod loše odabranih izvršnih organa, efektivni hod je samo dio stvarnog hoda. Važno je da efektivni i stvarni hod budu jednaki.



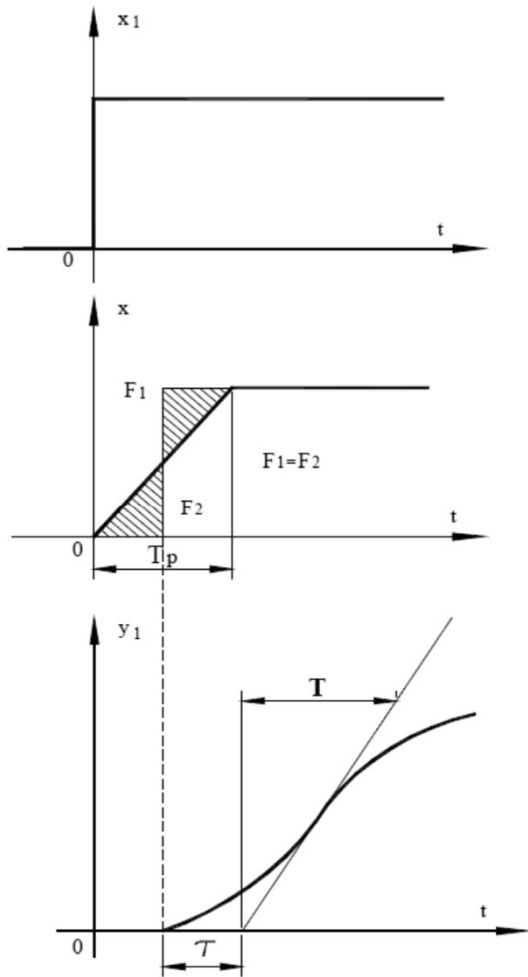
$$W_{ob}(s) = \frac{\frac{k_{obš}}{T_{obš} \cdot s + 1} e^{-s\tau_{obš}}}{W_{MY}(s) \cdot W_{IO}(s) \cdot W_X(s)}$$

$$W_{ob}(j\omega) = \frac{\frac{k_{obš}}{T_{obš} \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau_{obš}}}{W_{MY}(j\omega) \cdot W_{IO}(j\omega) \cdot W_X(j\omega)}$$

Tablica 1 omogućava veoma jednostavno da se na osnovu podataka o  $k$ ,  $T$ ,  $\tau$ , koji su rezultat identifikacije, uz poznate podatke o  $k_1, T_1$  i  $k_2, T_2$  koje daju proizvođači transmitera i izvršnih organa, eliminiše njihov uticaj, te da se kao rezultat dobiju podaci o  $k_3, T_3, \tau_3$  koji opisuju sam objekat. Procedura eliminacije se sastoji od dva koraka. Najprije se izdvoji transmieter, a onda se iz "ostatka" opisanog sa  $k_0, T_0, \tau_0$  eliminiše izvršni organ.



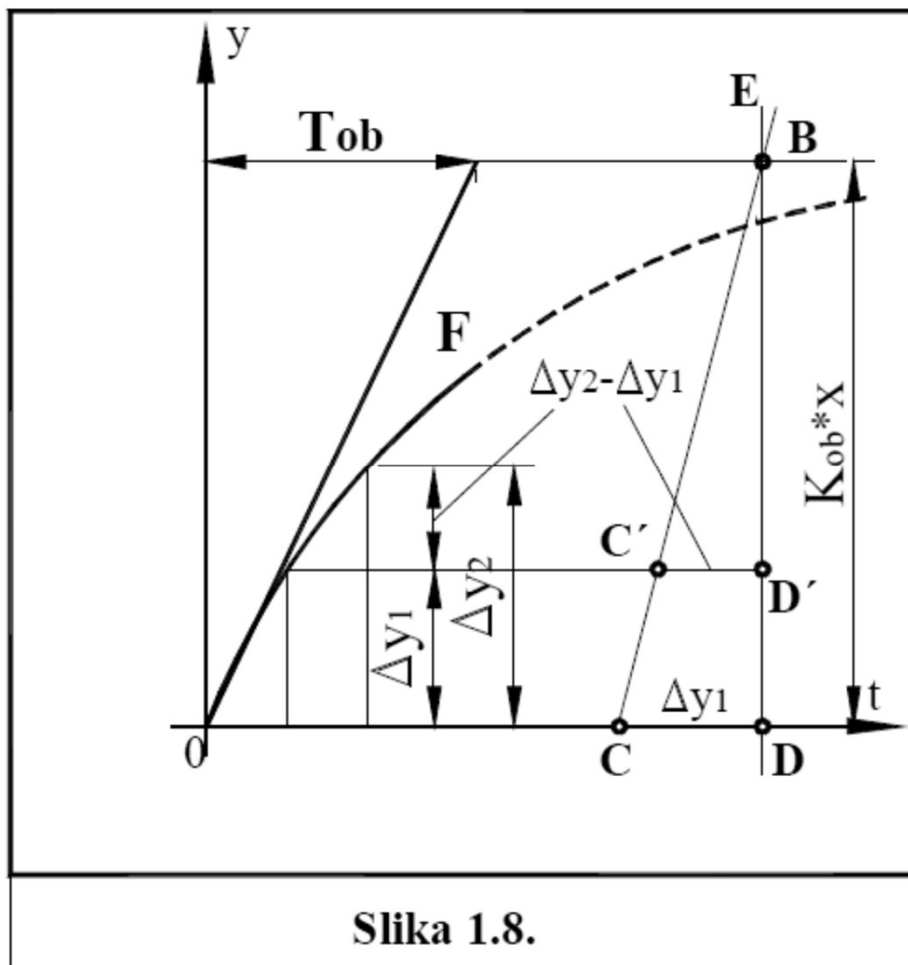
$\tau/T$ →	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	$\downarrow \frac{T_0}{T}$
$\downarrow \frac{T_1}{T}$	$\downarrow \frac{\tau_0}{T}$																			
0.010	0.090	0.140	0.190	0.240	0.290	0.340	0.390	0.440	0.490	0.540	0.590	0.640	0.690	0.740	0.790	0.840	0.890	0.940	0.990	0.99985
0.015	0.085	0.135	0.185	0.235	0.285	0.335	0.385	0.435	0.485	0.535	0.585	0.635	0.685	0.735	0.785	0.835	0.885	0.935	0.985	0.99967
0.020	0.080	0.130	0.180	0.230	0.280	0.330	0.380	0.430	0.480	0.530	0.580	0.630	0.680	0.730	0.780	0.830	0.880	0.930	0.980	0.99942
0.025	0.076	0.126	0.176	0.226	0.276	0.326	0.376	0.426	0.476	0.526	0.576	0.626	0.676	0.726	0.776	0.826	0.876	0.926	0.976	0.99910
0.030	0.070	0.120	0.170	0.220	0.270	0.320	0.370	0.420	0.470	0.520	0.570	0.620	0.670	0.720	0.770	0.820	0.870	0.920	0.970	0.99872
0.035	0.066	0.116	0.166	0.216	0.266	0.316	0.366	0.416	0.466	0.516	0.566	0.616	0.666	0.716	0.766	0.816	0.866	0.916	0.966	0.99826
0.040	0.062	0.112	0.162	0.212	0.262	0.312	0.362	0.412	0.462	0.512	0.562	0.612	0.662	0.712	0.762	0.812	0.862	0.912	0.962	0.99774
0.045	0.057	0.107	0.157	0.207	0.257	0.307	0.357	0.407	0.457	0.507	0.557	0.607	0.657	0.707	0.757	0.807	0.857	0.907	0.957	0.99717
0.050	0.052	0.102	0.152	0.202	0.252	0.302	0.352	0.402	0.452	0.502	0.552	0.602	0.652	0.702	0.752	0.802	0.852	0.902	0.952	0.99652
0.055	0.048	0.098	0.148	0.198	0.248	0.298	0.348	0.398	0.448	0.498	0.548	0.598	0.648	0.698	0.748	0.798	0.848	0.898	0.948	0.99582
0.060	0.043	0.093	0.143	0.193	0.243	0.293	0.343	0.393	0.443	0.493	0.543	0.593	0.643	0.693	0.743	0.793	0.843	0.893	0.943	0.99505
0.065	0.039	0.089	0.139	0.189	0.239	0.289	0.339	0.389	0.439	0.489	0.539	0.589	0.639	0.689	0.739	0.789	0.839	0.889	0.939	0.99423
0.070	0.035	0.085	0.135	0.185	0.235	0.285	0.335	0.385	0.435	0.485	0.535	0.585	0.635	0.685	0.735	0.785	0.835	0.885	0.935	0.99336
0.075	0.031	0.081	0.131	0.181	0.231	0.281	0.331	0.381	0.431	0.481	0.531	0.581	0.631	0.681	0.731	0.781	0.831	0.881	0.931	0.99242
0.080	0.027	0.077	0.127	0.177	0.227	0.277	0.327	0.377	0.427	0.477	0.527	0.577	0.627	0.677	0.727	0.777	0.827	0.877	0.927	0.99143
0.085	0.022	0.072	0.122	0.172	0.222	0.272	0.322	0.372	0.422	0.472	0.522	0.572	0.622	0.672	0.722	0.772	0.822	0.872	0.922	0.99039
0.090	0.018	0.068	0.118	0.168	0.218	0.268	0.318	0.368	0.418	0.468	0.518	0.568	0.618	0.668	0.718	0.766	0.818	0.868	0.918	0.98931
0.095	0.014	0.064	0.114	0.164	0.214	0.264	0.314	0.364	0.414	0.464	0.514	0.564	0.614	0.664	0.714	0.764	0.814	0.864	0.914	0.98816
0.100	0.010	0.060	0.110	0.160	0.210	0.260	0.310	0.360	0.410	0.460	0.510	0.560	0.610	0.660	0.710	0.760	0.810	0.860	0.910	0.98698
0.150	--	0.024	0.074	0.124	0.174	0.224	0.274	0.324	0.374	0.424	0.474	0.524	0.574	0.624	0.674	0.724	0.774	0.824	0.874	0.97272
0.200	--	--	0.042	0.092	0.142	0.192	0.242	0.292	0.342	0.392	0.442	0.492	0.542	0.592	0.642	0.692	0.742	0.792	0.842	0.95996
0.250	--	--	0.002	0.052	0.102	0.162	0.202	0.252	0.302	0.352	0.402	0.452	0.502	0.552	0.602	0.652	0.702	0.752	0.802	0.93736
0.300	--	--	--	0.023	0.073	0.123	0.173	0.223	0.273	0.323	0.373	0.423	0.473	0.523	0.573	0.623	0.673	0.723	0.773	0.89086
0.350	--	--	--	0.005	0.055	0.105	0.155	0.205	0.255	0.305	0.355	0.405	0.455	0.505	0.555	0.605	0.655	0.705	0.755	0.86618
0.400	--	--	--	--	0.032	0.082	0.132	0.182	0.232	0.282	0.332	0.382	0.432	0.482	0.532	0.582	0.632	0.682	0.732	0.82270



Slika 1.7.

- Nekada nije potrebna tačnost koju implicira opisani postupak eliminacije, nego je dovoljno odstraniti samo uticaj konačnog vremena prelaza  $T_p$  punog hoda izvršnog organa, što se može učiniti prema sl. 1.7.





Slika 1.8.

- U slučaju da uslovi rada objekta, na kome se izvodi eksperiment, ne dopuštaju završetak eksperimenta, tj. porast vremenske karakteristike do novog stacionarnog stanja, potrebno je izvršiti rekonstrukciju nedostajućeg dijela karakteristike. Postupak rekonstrukcije prikazan je na sl. 1.8. i svodi se na pronalaženje ordinate  $DB$  koja definiše novo stacionarno stanje odziva koje dalje omogućava određivanje  $K_{ob}$  i  $T_{ob}$ .

Dokaz je jednostavan:

$$\Delta y_1 = k_{ob}(1 - e^{-\Delta t/T_{ob}})$$

$$\Delta y_2 = k_{ob}(1 - e^{-2\Delta t/T_{ob}})$$

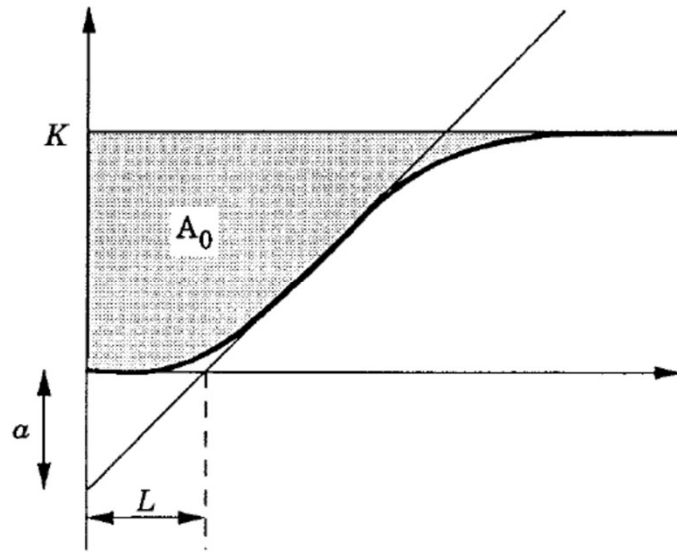
$$D'D'' \equiv D'C' = \Delta y_2 - \Delta y_1$$

$$DD' \equiv DC = \Delta y_1$$

Iz sličnosti trouglova  $CDB$  i  $C'D'B$  slijedi:

$$\frac{BD}{BD - DD'} = \frac{DC}{D'C'}$$

# Dvo parametarski model



**Figure 2.6** Graphical determination of a two-parameter model from a step response for a stable system with a monotone step response.

- Najjednostavniji parametarski model procesa ima dva parametra. Jedan je procesno pojačanje a drugi obuhvata ponašanje u vremenu

$$T_{ar} = \frac{A_0}{K}$$

$$A_0 = \int_0^{\infty} (s(\infty) - s(t)) dt$$

$$G_{2a}(s) = \frac{K}{1 + sT_{ar}}$$

$$G_{2b}(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL}$$

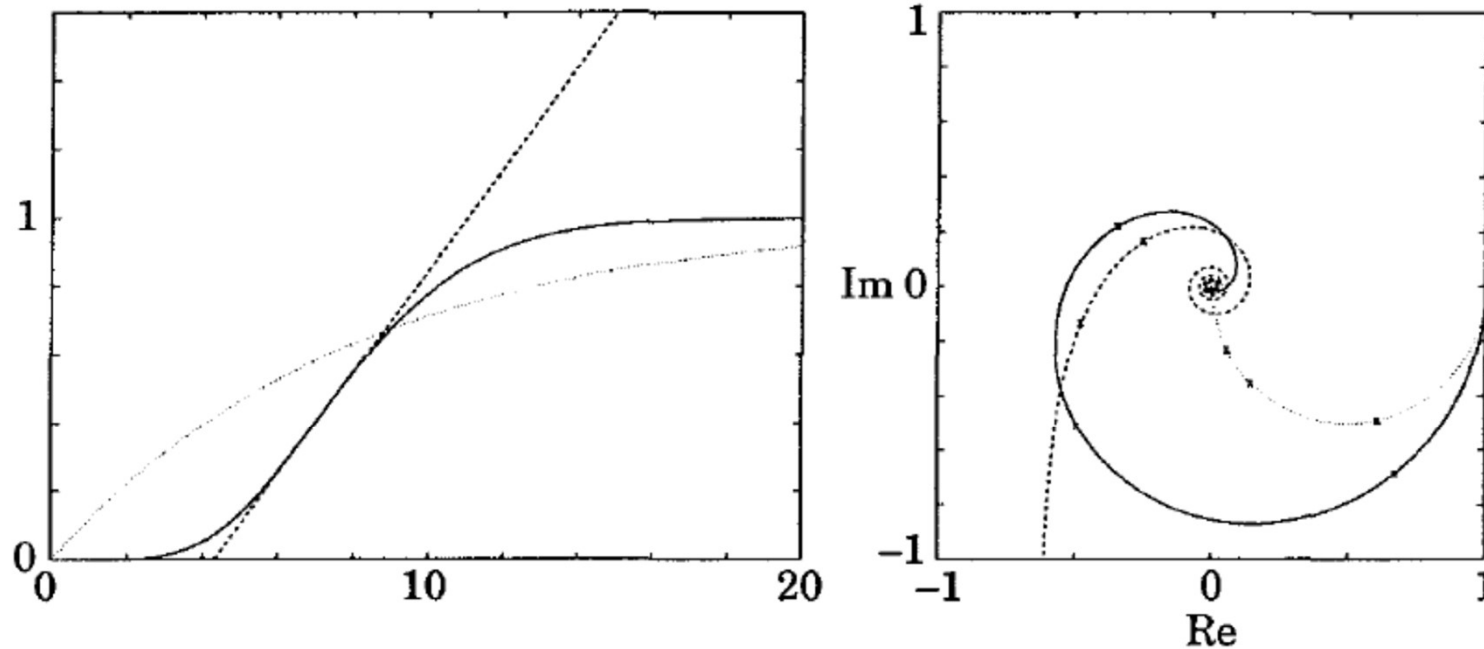
- Posmatrajmo funkciju

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$$

Njeni modeli su:

$$G_{2a}(s) = \frac{1}{1+8.0s}$$

$$G_{2b}(s) = \frac{0.64}{4.3s} e^{-4.3s}$$



**Figure 2.7** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s+1)^8$  (solid line) and the two-parameter models  $G_{2a}(s)$  (dotted line) and  $G_{2b}(s)$  (dashed line).

# Troparametarski model

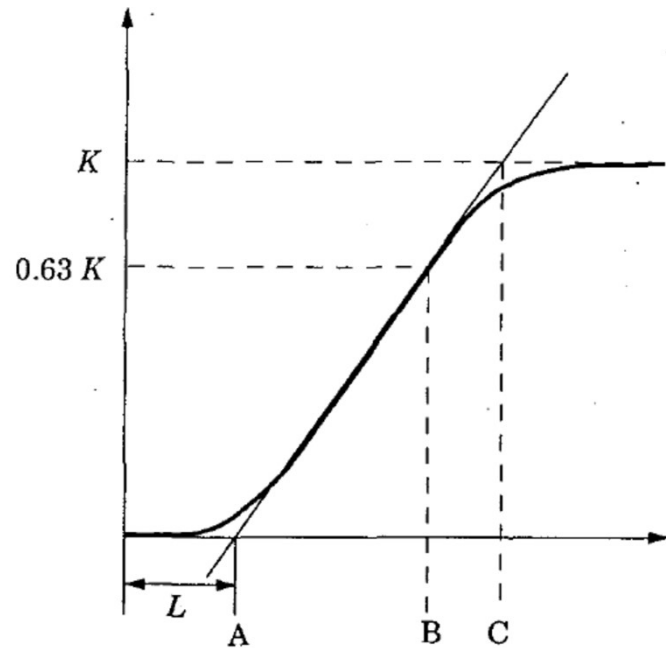


Figure 2.8 Graphical determination of three-parameter models for systems with a monotone step response.

- Bolji rezultati se postižu povećanjem broja parametara

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{-sL} \quad s(t) = K \left( 1 - e^{-(t-L)/T} \right)$$

$$T_{ar} = \frac{\int_0^{\infty} (s(\infty) - s(t)) dt}{K} = L + T$$

$$\tau = \frac{L}{L + T} = \frac{L}{T_{ar}}$$

**Kako se određuje T ?**

prvi način kao distancu AC

drugi način kao rastojanje AB

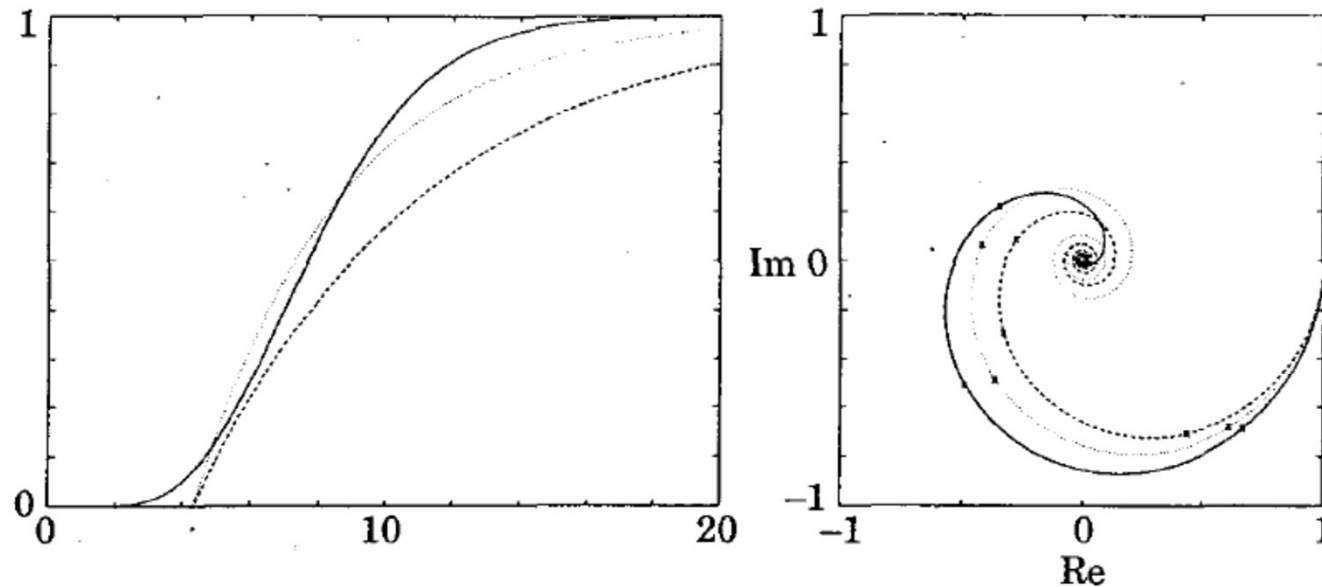
- Posmatrajmo funkciju

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$$

$$G_{3a}(s) = \frac{1}{1+6.7s} e^{-4.3s}$$

$$G_{3b}(s) = \frac{1}{1+4.3s} e^{-4.3s}$$

- Njeni modeli su:



**Figure 2.9** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s+1)^8$  (solid line) and the three-parameter models  $G_{3a}(s)$  (dashed line) and  $G_{3b}(s)$  (dotted line).

# Poboljšani troparametarski model

$$G(s) = \frac{K}{(1 + sT)^2} e^{-sL}$$

$$s(t) = K \left( 1 - \left( 1 + \frac{t-L}{T} \right) e^{-(t-L)/T} \right)$$

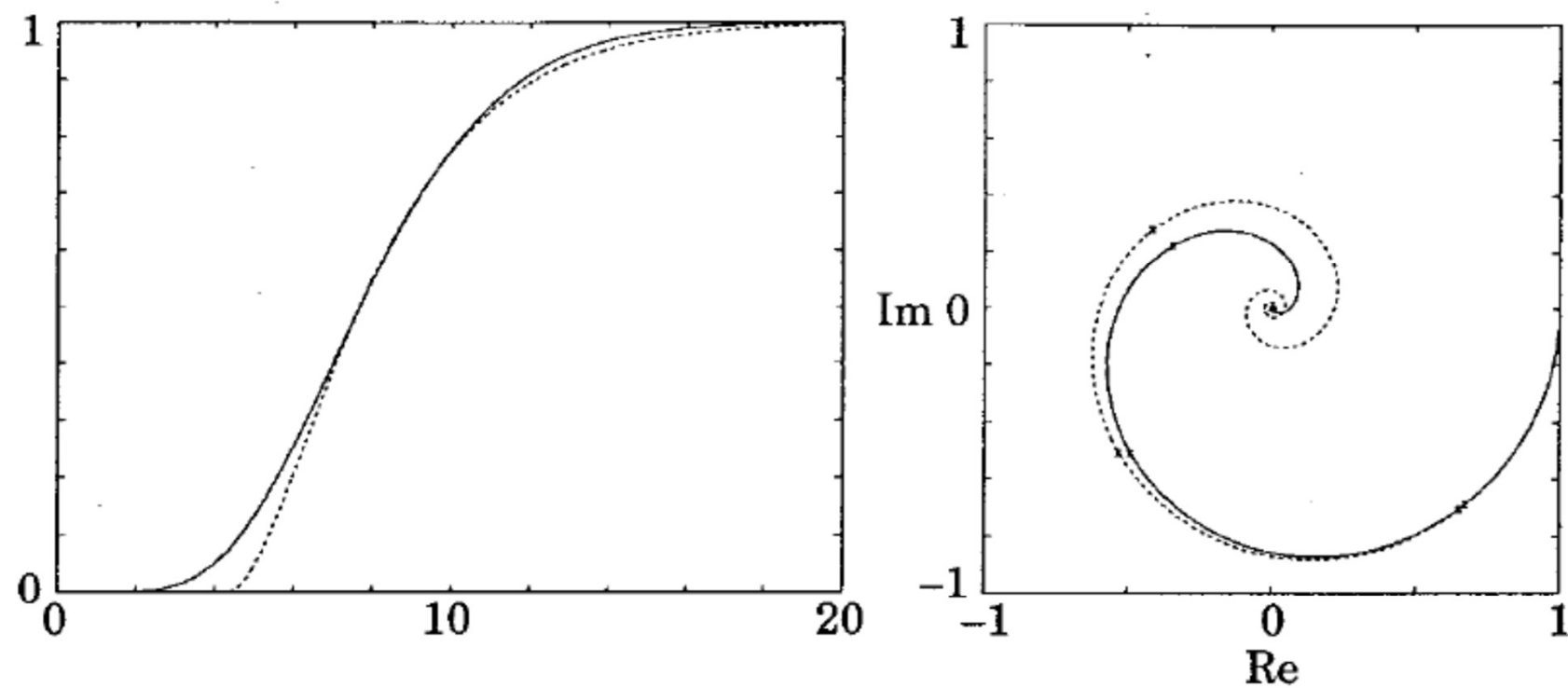
Posmatrajmo funkciju

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)^8}$$

Ovo je sada novi model.

$K$  i  $\tau$  su određeni kao u prvom slučaju dok su dvije identične vremenske konstante određene numeričkim rješavanjem gornje jednačine. Kao dodatni uslov je korišćena tačka  $s(8,6)=0,63$

$$G_{3c}(s) = \frac{1}{(1 + 2.0s)^2} e^{-4.3s}$$



**Figure 2.10** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s+1)^8$  (solid line) and the three-parameter model  $G_{3c}(s)$  (dashed line).

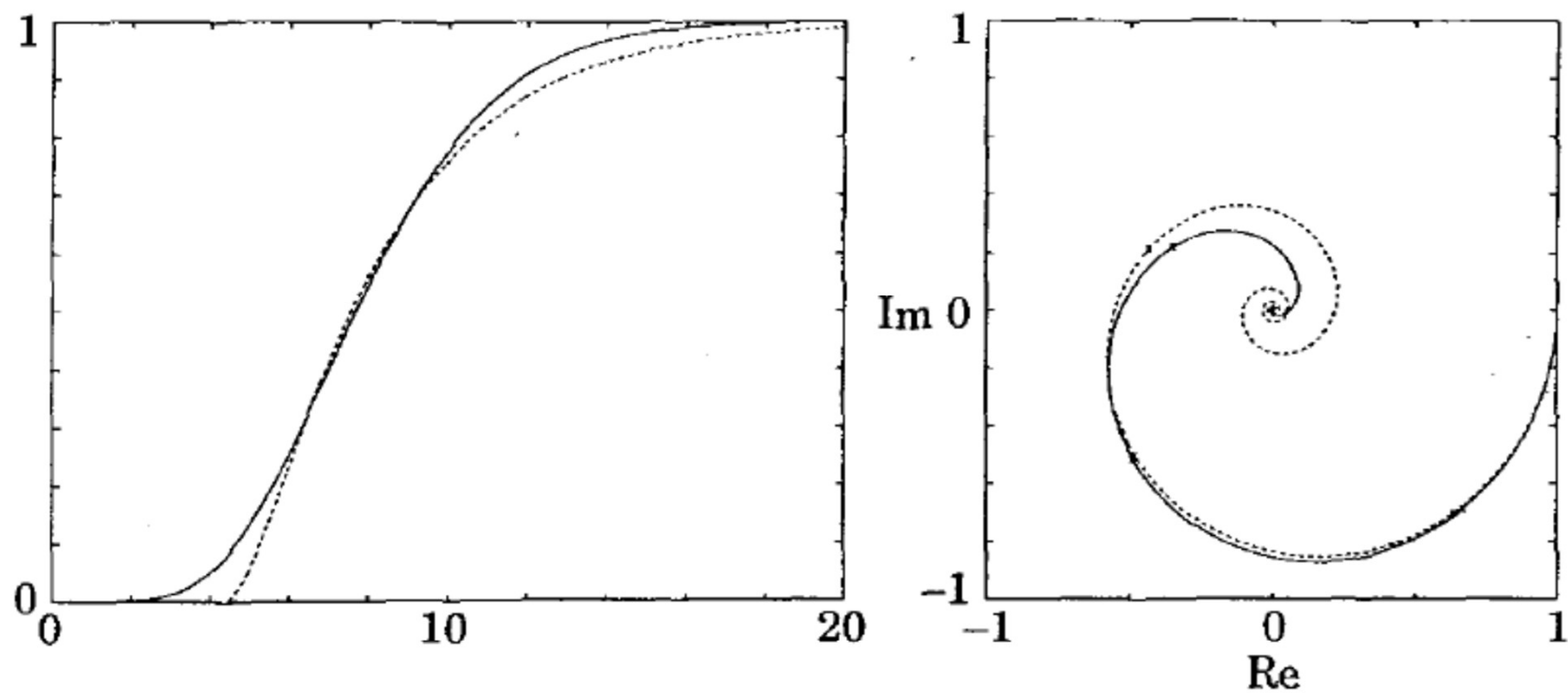
# Četvoroparametarski model

$$G(s) = \frac{K}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} e^{-sL} \quad s(t) = K \left( 1 + \frac{T_2 e^{-(t-L)/T_2} - T_1 e^{-(t-L)/T_1}}{T_1 - T_2} \right) \quad T_1 \neq T_2$$

- K i L se i u ovom slučaju određuju na isti način kao ranije. T1 i T2 se određuju na osnovu dvije tačke step odziva. U našem primjeru kada step odziv uzima 33% i 67% vrijednosti u ustaljenom stanju. To na kraju rezultira za već navedeni primjer modelom oblika:

$$G_{4a}(s) = \frac{1}{(1 + 0.93s)(1 + 3.2s)} e^{-4.3s}$$

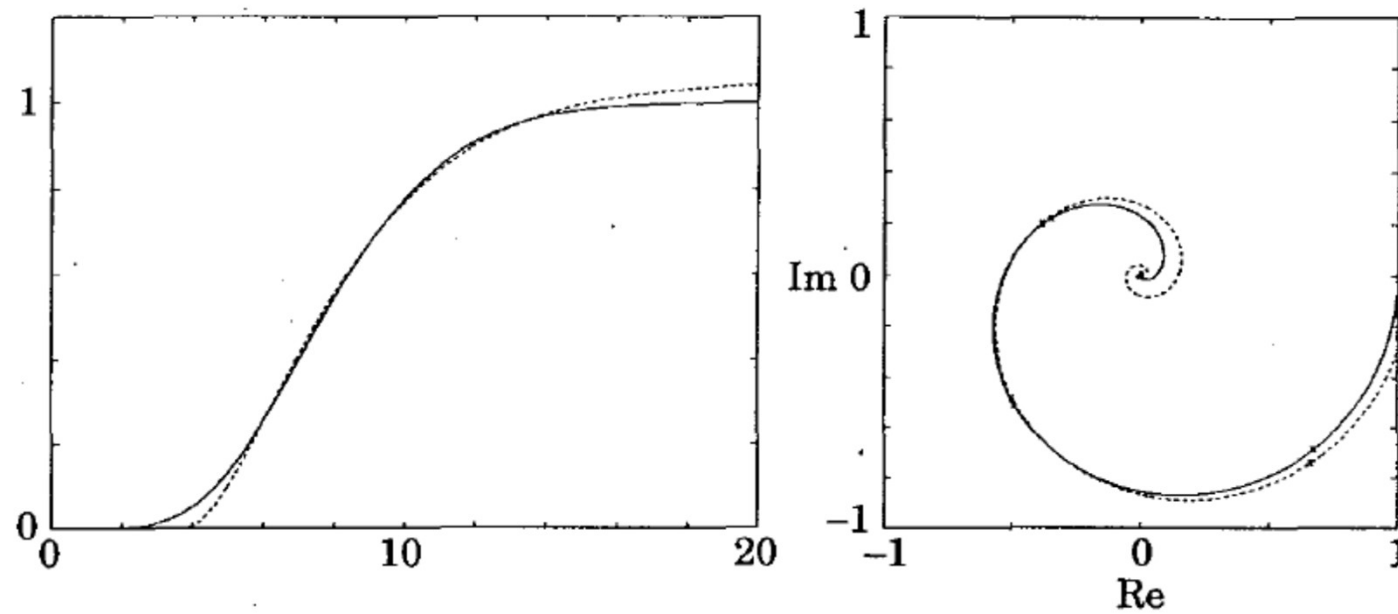




**Figure 2.11** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s+1)^8$  (solid line) and the four-parameter model  $G_{4a}(s)$  (dashed line).

- U prethodnom primjeru K i L su određeni grafičkim postupkom na osnovu step odziva, dok su konstante T1 i T2 određene numeričkim rješavanjem jednačina. Ovakvi postupci su bili prisutni sve dok računari nijesu bili dostupni za numerička rješavanja.
- Upotrebom numeričkih optimizacionih postupaka dobijaju se rješenja koja daju mnogo bolju aproksimaciju od grafičkih metoda.
- To je ilustrovano na sledećem primjeru gdje se pokazuje izuzetno poklapanje Nikvistove krive u trećem kvadrantu.
- Primjenom optimizacione metode najmanjih kvadrata dolazi se do modela:

$$G_{4b}(s) = \frac{1.05}{(1 + 2.39s)^2} e^{-3.75s}$$



**Figure 2.12** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s + 1)^8$  (solid line) and the four-parameter model  $G_{4b}$  (dashed line).

Prenosne funkcije dobijene različitim metodama modeliranja zasnovane na eksperimentu sa step pobudom

$$G_{2a}(s) = \frac{1}{1 + 8.0s}$$

$$G_{2b}(s) = \frac{0.64}{4.3s} e^{-4.3s}$$

$$G_{3a}(s) = \frac{1}{1 + 6.7s} e^{-4.3s}$$

$$G_{3b}(s) = \frac{1}{1 + 4.3s} e^{-4.3s}$$

$$G_{3c}(s) = \frac{1}{(1 + 2.0s)^2} e^{-4.3s}$$

$$G_{4a}(s) = \frac{1}{(1 + 0.93s)(1 + 3.2s)} e^{-4.3s}$$

$$G_{4b}(s) = \frac{1.05}{(1 + 2.39s)^2} e^{-3.75s}$$

# Modeliranje astatickog sistema

- Postoje neki sistemi upravljanja procesima gde dinamika sadrži integraciju ili veoma duge vremenske konstante. Takvi sistemi neće dostići stabilno stanje u uslovima otvorene petlje. Ponekad se nazivaju sistemima bez samoregulacije. Za PID podešavanje korisno je takve sisteme tretirati odvojeno.
- Za sistem sa integralnim dejstvom stacionarno stanje neće biti postignuto ako je ulazni signal odskočna funkcija, budući da će se izlaz asimptotski mijenjati konstantnom brzinom. Postojeće, međutim, stabilno stanje kada je ulazna funkcija impuls. Stoga, da bismo odredili dinamiku, možemo primijeniti kratki impuls na proces. Nakon normalizacije odziva dijeljenjem sa pulsnom površinom, dobijamo step odziv koji se može modelirati pomoću metoda o kojima smo upravo govorili. Prenosna funkcija sistema sa integralnim dejstvom tada se dobija jednostavno množenjem prenosne funkcije sa  $1/s$ . Postupak ilustrujemo primjerom.

Pretpostavimo da je na proces primenjen kvadratni impuls sa jediničnom visinom i trajanjem  $\tau$  i da je model

$$G_1(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{-sL}$$

dobijen kao rezultat postupka troparametarske procedure modelovanja. Prenosna funkcija procesa je tada

$$G(s) = \frac{1}{s\tau} G_1(s) = \frac{K}{s\tau(1 + sT)} e^{-sL}$$

Modeli zasnovani na step odzivu takođe se mogu primijeniti na procese sa integralnim delovanjem. Jedna mogućnost je da se izračuna derivacija step odziva i primijeni metoda impulsnog odziva o kojoj je upravo bilo riječi

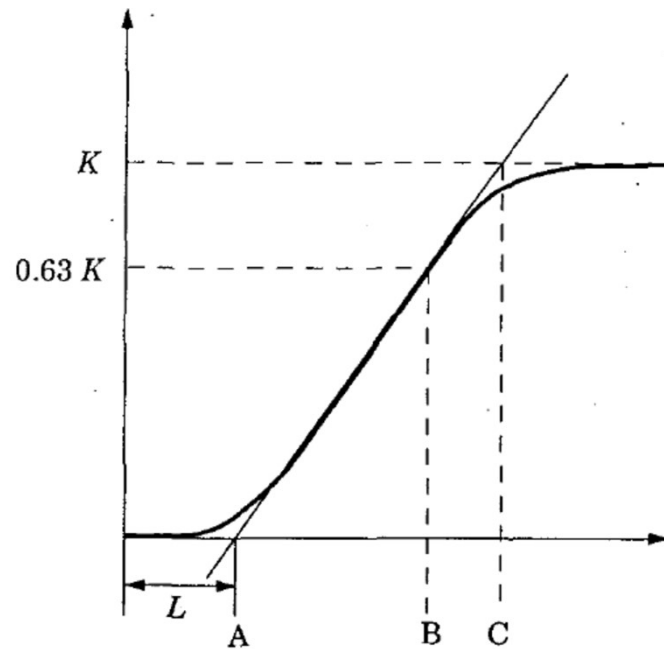
Dvoparametarski model

$$G(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL}$$

koji je korišćen ranije u ovom opisu za modeliranje stabilnih procesa može se primijeniti za integrirajući proces. Kao što smo vidjeli ovaj model daje loš opis stabilnih procesa pri visokim frekvencijama, ali za integrativne (astatske) procese ponašanj pri niskim frekvencijama e se dobro poklapa sa modelom.

# Troparametarski model komentar prethodnog slajda

- Bolji rezultati se postižu povećanjem broja parametara



**Figure 2.8** Graphical determination of three-parameter models for systems with a monotone step response.

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{-sL} \quad s(t) = K \left( 1 - e^{-(t-L)/T} \right)$$

$$T_{ar} = \frac{\int_0^{\infty} (s(\infty) - s(t)) dt}{K} = L + T$$

$$\tau = \frac{L}{L + T} = \frac{L}{T_{ar}}$$

**Kako se određuje T ?**

prvi način kao distancu AC

drugi način kao rastojanje AB

- Više sofisticiran model koji daje bolju aproksimaciju astatiskih sistema pri visokim frekvencijama dat je sa prenosnom funkcijom:

$$G(s) = \frac{K}{s(1 + sT)} e^{-sL} \quad s(t) = K \left( t - L - T \left( 1 - e^{-(t-L)/T} \right) \right)$$

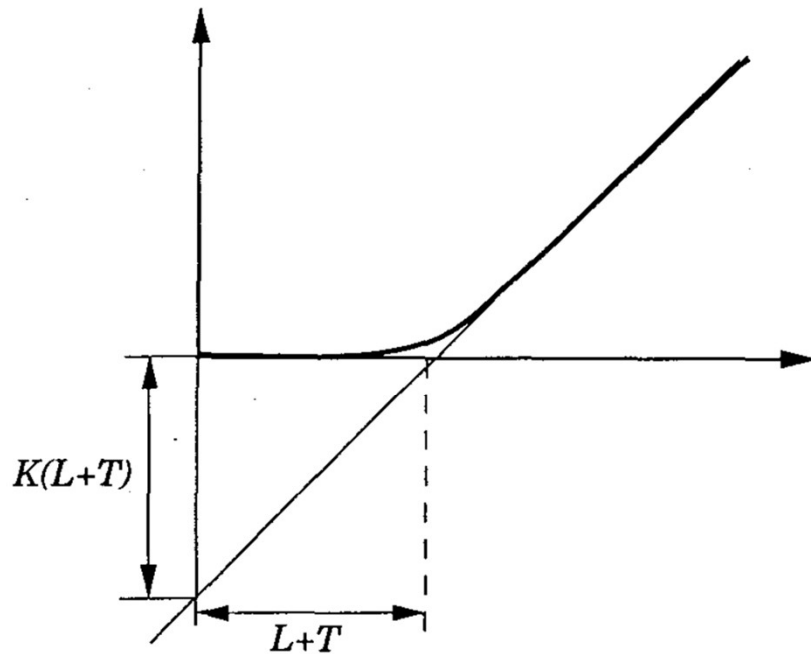
Model je okarakterisan sa tri parametra : Brzinskom konstantom K, vremenskom konstantom T i vremenom kašnjenja L. Grafički se određuje parametar K postupkom prikazanim na slici na sledećem slajdu, kao i vrijeme  $T_{ar} = L + T$



# Troparametarski model za integrativne procese

Vrijeme kašnjenja  $L$  i vremenska konstanta  $T$  mogu se odrediti na osnovu inverzne Laplasove funkcije za jednu tačku step odziva

$$s(t) = K \left( t - L - T \left( 1 - e^{-(t-L)/T} \right) \right)$$



$$s(L + T) = K T e^{-1}$$

$$T = \frac{s(L + T)}{K} e^1$$

**Figure 2.13** Graphical determination of a three-parameter model for an integrating process.

## Model Oscilatornog Sistema

Na osnovu step odziva može se doći do modela oscilatornih sistema , Mogu se grubo aproksimirati dvoparametarskim modelom, ali taj model neće obuhvatiti oscilacije. Nijedan od tro- ili četvero- parametarskih modela koji su ranije pokazani nije pogodan Troparametarski model koji opisuje oscilacije dat jre prenosnom funkcijom

$$G(s) = \frac{K \omega^2}{s^2 + 2\zeta \omega s + \omega^2}$$

Model ima tri parametra : statičko pojačanje K, prirodnu frekvenciju  $\omega$  i relativno prigušenje  $\zeta$  .

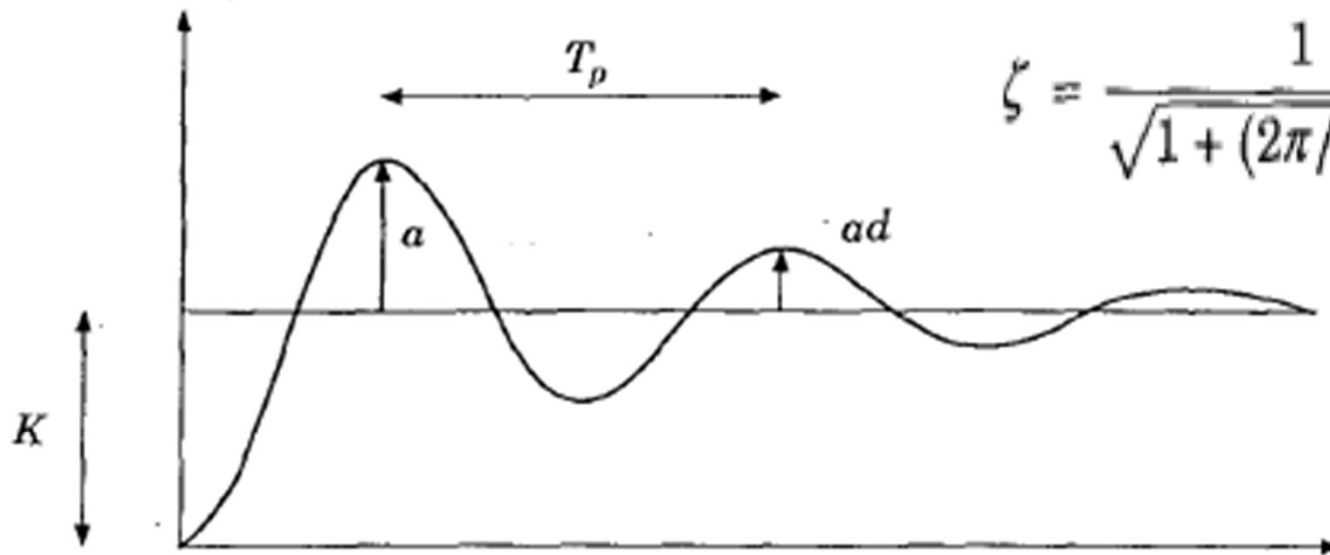
Ovi parametri mogu biti određeni na osnovu perioda oscilacija  $T_p$  i relativnom padu amplitude oscilacija  $d$ .

$$d = e^{-2\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi/\log d)^2}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p\sqrt{1-\zeta^2}}$$

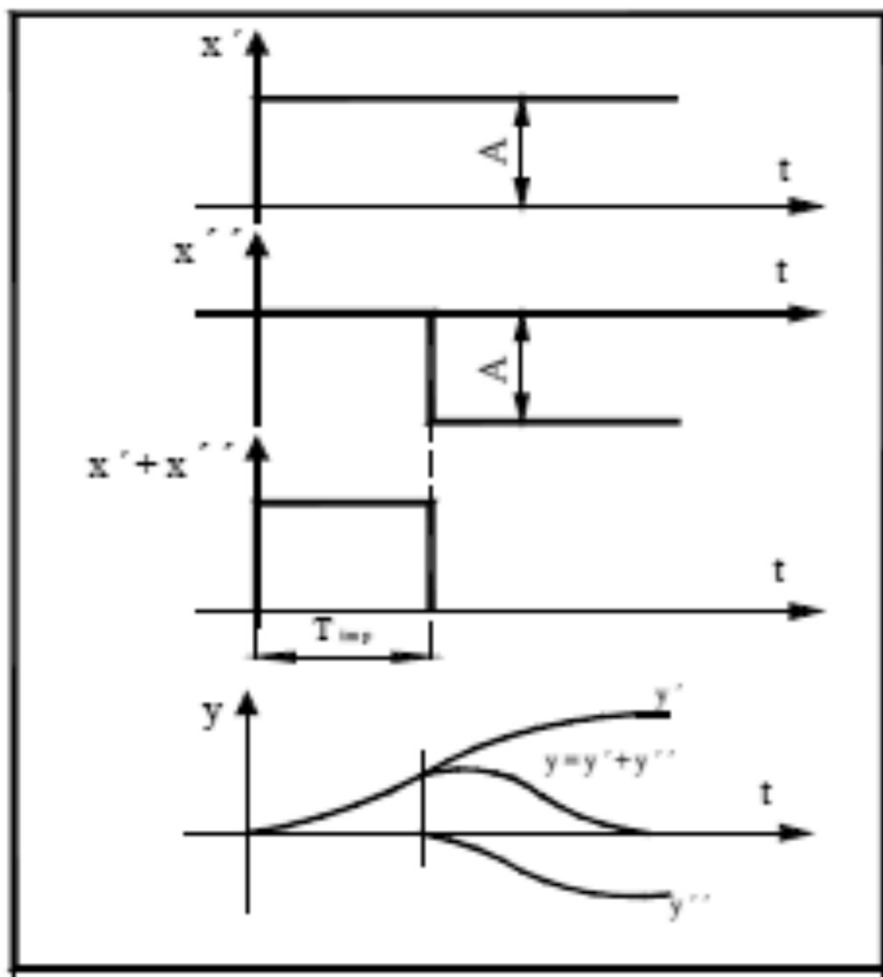


**Figure 2.14** Graphical determination of mathematical models for systems with an oscillatory step response.

Vremensko kašnjenje  $\tau$  može se dodati modelu, a određuje se na isti način kao u prethodnim modelima crtanjem tangente u prevojnoj tački ili određivanje vremena između početka stepa i vremena kada je odziv na step dostigao određeni procenata svoje konačne vrijednosti.

## Izvođenje eksperimenta sa impulsnom ispitnom funkcijom

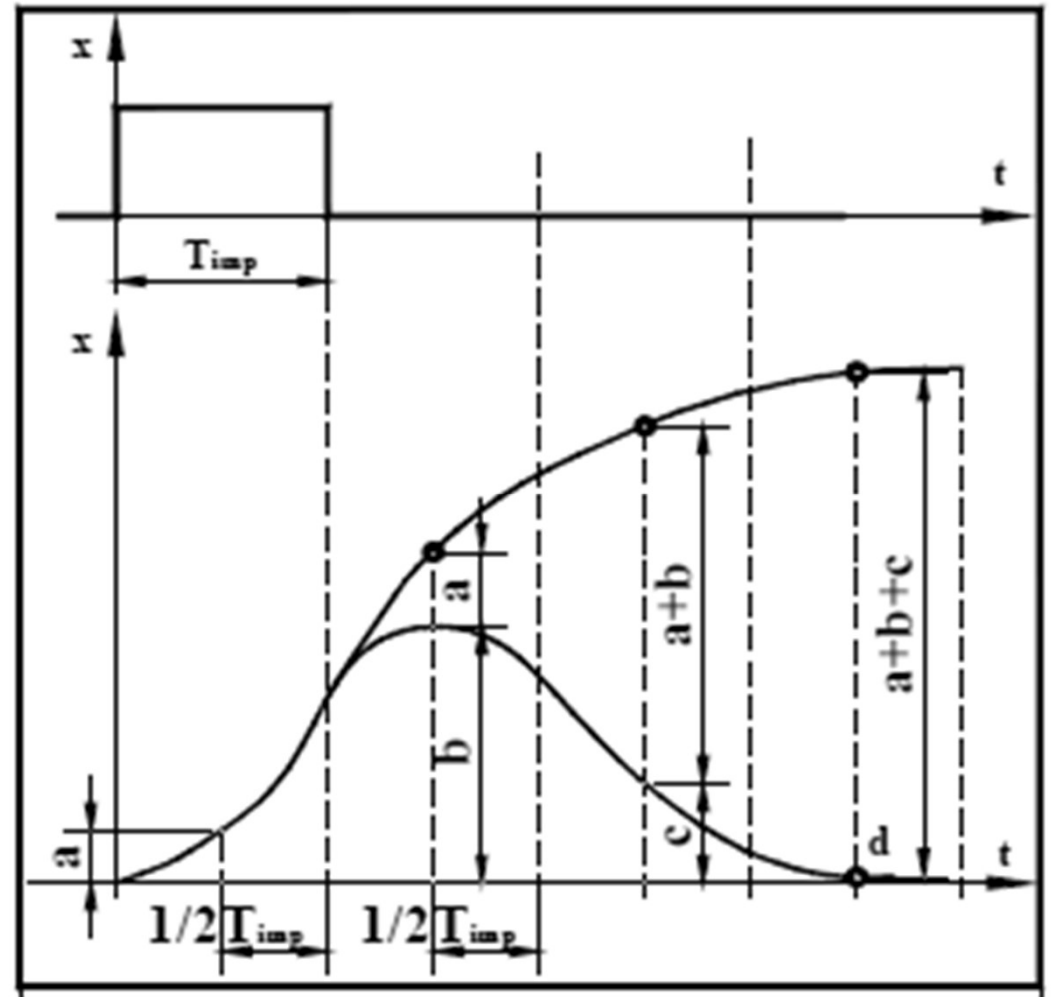
- U slučaju da su šumovi koji normalno egzistiraju u objektu koji se identifikuje takvog intenziteta da odskočna funkcija amplitude nije dovoljno velika da bi se odziv izdvojio iz šumova, te šumovi dovode u pitanje pouzdanost rezultata eksperimenta, u svojstvu ispitne funkcije se koristi impulsna funkcija. S obzirom da impulsna funkcija nema karakter trajne smetnje, moguće je upotrijebiti funkciju sa amplitudom:  **$A \approx (15 - 25)\%$  efektivnog hoda izvršnog organa** što je svakako povoljnije od prethodnog .
- Impuls koji se primjenjuje pri realnim ispitivanjima sastavljen je od dvije odskočne funkcije jednakih ali obrnuto polarisanih amplituda sa vremenskim pomakom između pozitivnog i negativnog skoka.



Trajanje realnog impulsa **Timp** se određuje u toku samog eksperimenta prateći odziv  $y'$ . U trenutku kada vremenska karakteristika prođe tačku infleksije potrebno je poništiti prvu odskočnu funkciju drugom, pa će se izlazna funkcija objekta početi smanjivati nakon vremena  $\tau_{ob}$ .

U slučaju prisustva većih šumova **Timp** trebe produžiti, te time dopustiti veću amplitudu odziva  $y$ .

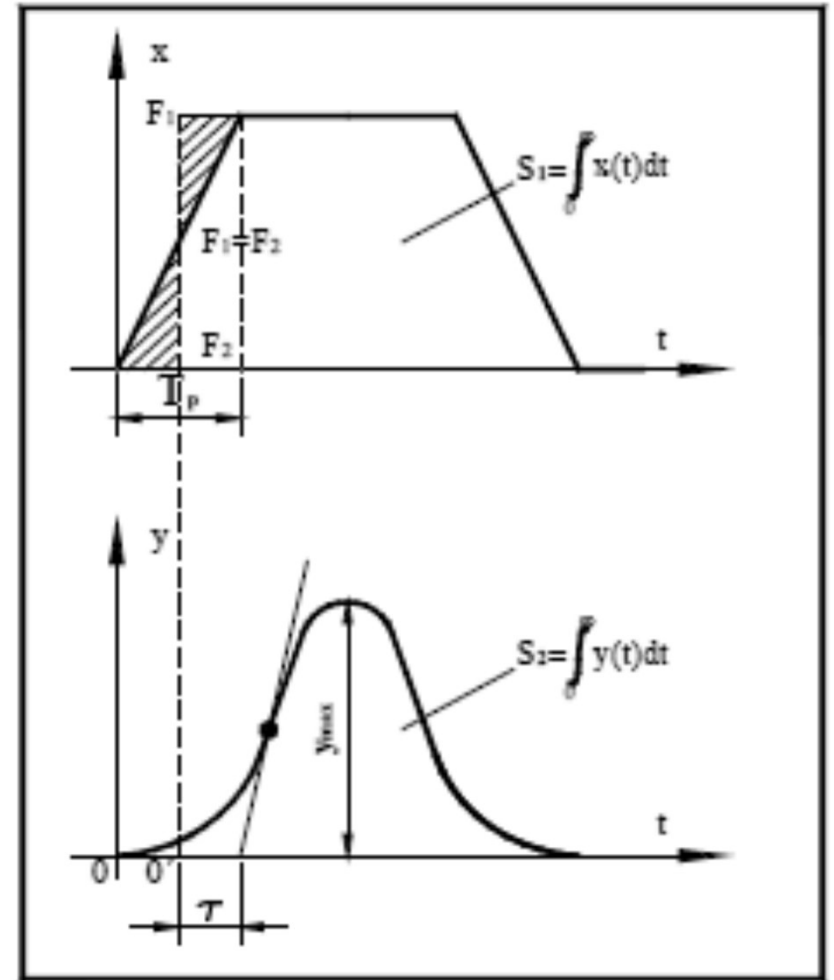
- Dobijanje parametara objekta  $Kob$ ,  $Tob$  i  $\tau_{ob}$  na osnovu impulsne karakteristike zasniva se na konverziji impulsne karakteristike u odziv na step funkciju saglasno slici.
- U vrijeme trajanja impulsa  $T_{imp}$  odskočna i impulsna karakteristika se poklapaju. U periodu trajanja  $T_{imp}$ , počevši poslije impulsa ordinate koje određuju odskočnu karakteristiku dobiju se kao sume ordinate impulsne karakteristike na odgovarajućem odsječku perioda  $T_{imp}$ . Na slici je kao korak unutar perioda  $T_{imp}$  uzeta polovina tog perioda.



- Inače, impulsnu karakteristiku moguće je obraditi, sa ciljem dobijanja parametara služeći se momentima impulsne karakteristike. Na narednoj slici je prikazana situacija kada je impulsna ispitna funkcija trapeznog oblika (što je realna situacija prilikom primjene izvršnih organa sa konstantnom brzinom prelaska dijapazona).
- Za dobijanje  $S_1$  i  $S_2$  potrebno je grafički integrirati ispitnu funkciju i impulsnu karakteristiku.

$$k_{ob} = \frac{S_2}{S_1}$$

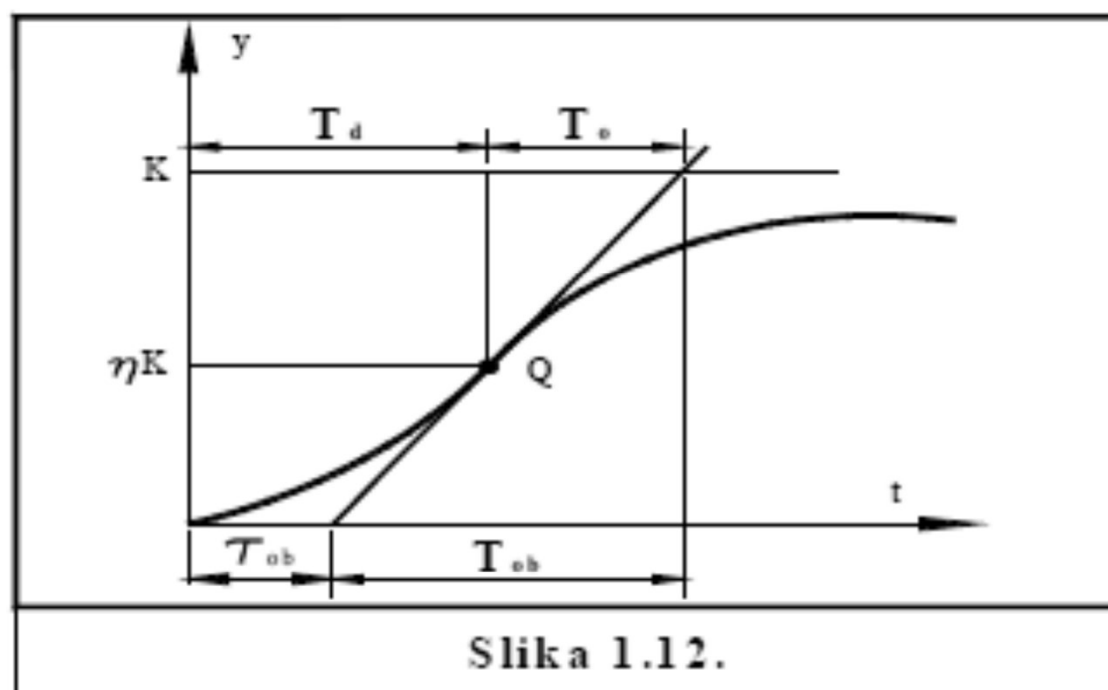
$$T = \frac{S_2}{Y_{max}}$$



# Aproksimacija bez uvođenja kašnjenja

- U svim dosadašnjim razmatranjima objekat višeg reda je aproksimiran objektom prvog reda sa elementom čistog kašnjenja. Na taj način se prenosna funkcija modela dobijala u transcendentnoj formi.
- Ako se želi iz rezultata eksperimenta ( $K_{ob}$ ,  $T_{ob}$  i  $\tau_{ob}$ ) dobiti prenosna funkcija u formi racionalnog polinoma  $n$ -tog reda, kao bolja aproksimacija i za lakšu dalju upotrebu, moguće je koristiti tabelu 2. u kojoj su dati odnosi između veličina definisanih na sl.





Slika 1.12.

$$W_{ob}(s) \approx \frac{k}{(Ts + 1)^n} \approx \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} e^{-s\tau_{ob}}$$

Sa slike 1.12. se ima:  $T = T_d + T_e = \tau_{ob} + T_{ob}$ , odnosno  $1 = T_d/T + T_e/T = \tau_{ob}/T + T_{ob}/T$

$\text{tg} \alpha = k/T_{ob} = k(1 - \eta)/T_e$ , te je  $\eta = 1 - T_e/T_{ob}$

Tabela 2.

No.	$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	$\tau_{ob}$	0	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493	0,570	0,642	0,709	0,773
2.	$\eta$	0	0,264	0,323	0,353	0,371	0,384	0,394	0,401	0,407	0,413
3.	$T_e/T_{ob}$	1	0,736	0,677	0,647	0,269	0,616	0,606	0,599	0,593	0,587
4.	$\tau_{ob}/T$	0	0,282	0,805	1,425	2,1	2,811	3,549	4,307	5,081	5,869
5.	$T_{ob}/T$	1	2,718	3,695	4,463	5,119	5,694	6,226	6,711	7,164	7,59
6.	$T_d/T$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7.	$T_e/T$	1	2	2,5	2,888	3,219	3,51	3,775	4,018	4,245	4,458

# METODA PROSTE I SLOŽENE HARMONIJSKE ISPITNE FUNKCIJE (EKSPERIMENTALNO DOBIJANJE AMPLITUDNO–FAZNE KARAKTERISTIKE)

- Uporedo sa metodom vremenskih karakteristika u svrhe identifikacije primjenjuju se i metode frekventnih karakteristika koje opisuju ponašanje sistema pri djelovanju na njegov ulaz harmonijskih ispitnih funkcija.

$$x = A \sin(\omega t + \Phi_x)$$

gdje je:  $A$  – amplituda ispitne funkcije,  
 $\omega$  – frekvencija ispitne funkcije,  
 $\Phi_x$  – faza ispitne funkcije.

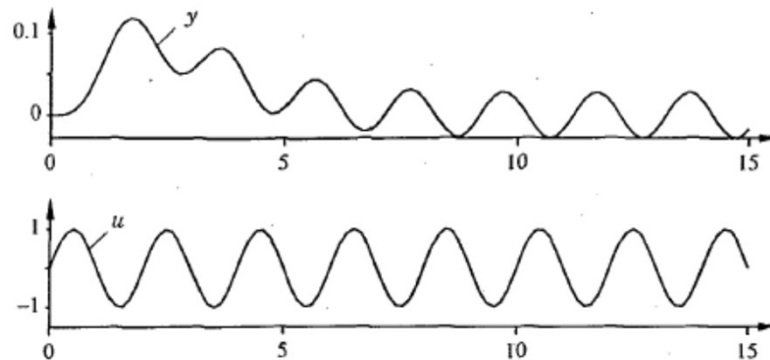


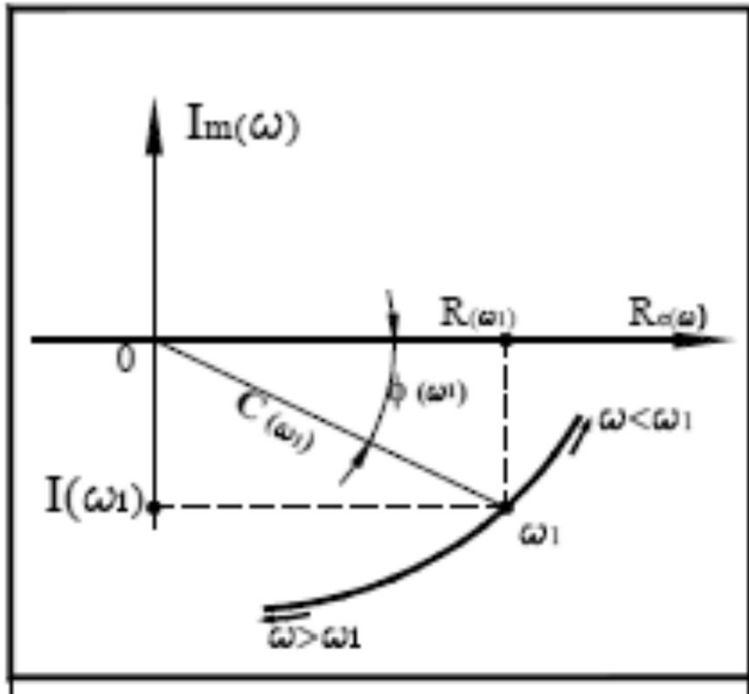
Figure 2.3 Input signal  $u$  is a sinusoid and output signal  $y$  becomes sinusoidal after a transient.

$$y = B \sin(\omega t + \Phi_y)$$

$$X = A e^{j(\omega t + \Phi_x)}$$

$$Y = B e^{j(\omega t + \Phi_y)}$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{B}{A} e^{j(\Phi_y - \Phi_x)}$$



Ovo je kompleksna veličina čiji modul  $B/A$  mijenja svoju veličinu pri promjeni frekvencije  $\omega$ . Zavisnost odnosa amplituda  $B/A$  sa frekvencijom naziva se amplitudno frekventnom karakteristikom sistema  $C(\omega)$ , a razlika argumenata naziva se fazno-frekventnom karakteristikom  $\Phi(\omega)$ .

Kompleksna funkcija frekvencije  $W(j\omega)$  naziva se amplitudno-faznom karakteristikom

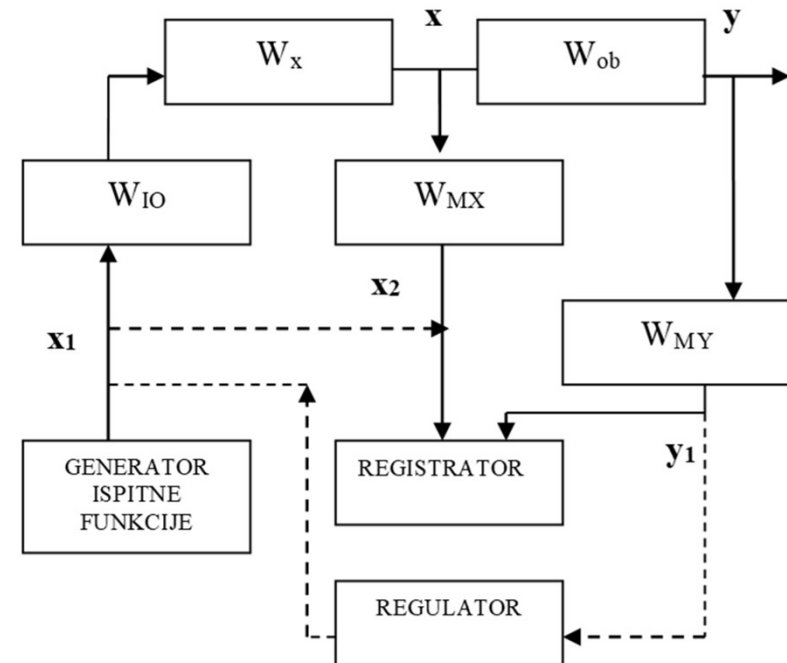
$$W(j\omega) = C(\omega) e^{j\Phi(\omega)}$$

$$C(\omega) = \frac{B(\omega)}{A}$$

$$\Phi(\omega) = \Phi_y - \Phi_x$$

# Tehnika sprovođenja eksperimenta

- Opšta shema pokazana ranije potpuno odgovara i u ovom slučaju. Generator ispitne funkcije predstavlja izvor sinusoidalnog kao prostoperiodičnog signala ili izvor pravouglog, ili trouglastog ili trapeznog talasa kao složenog periodičnog signala. Registrator u ovom slučaju mora biti dvokanalni, jer su veoma važni fazni odnosi ulaznog i izlaznog signala. Sva razmatranja o uticaju blokova koja su data u ranijoj analizi vrijede i za ovaj slučaj, a jednačina je direktno primjenljiva.



$$W_{ob}(j\omega) = \frac{\frac{k_{obš}}{T_{obš} \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau_{obš}}}{W_{MY}(j\omega) \cdot W_{IO}(j\omega) \cdot W_X(j\omega)}$$

Ovdje treba naglasiti da:

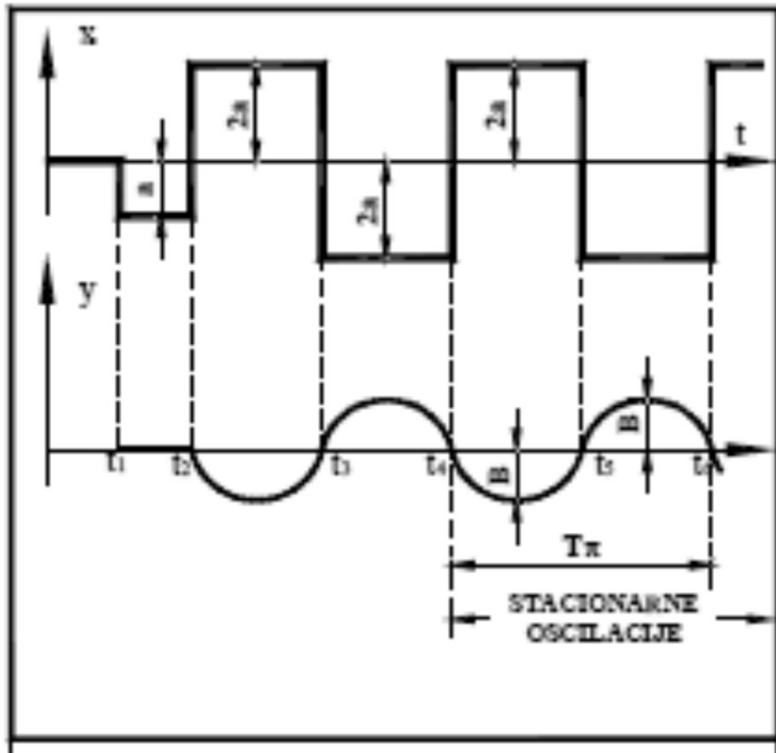
1. eksperimentat treba početi pri stacionarnom stanju objekta
2. eksperimentat treba smatrati neuspjelim, ako u njegovom toku nastupi bilo kakva smetnja u objektu, te ga treba ponoviti.
3. eksperimentat treba početi tačno na osi oscilacija ulaznog prostora ili složenog periodičnog signala, jer može doći do pogrešnog mjerenja faznih odnosa.
4. eksperimentat dovesti trajanjem do stacionarnih oscilacija izlazne veličine i samo sa stacionarnog dijela oscilacija uzeti podatke o fazi i amplitudi.

Narušavanje bilo kojeg od navedenih zahtjeva dovodi do pogrešnih rezultata eksperimentalne identifikacije.

Prilikom pristupa eksperimentu prvi zahvat je određivanje za konkretni objekat interesantnog opsega frekvencija. Postupci sinteze upravljačke konture traže bolje poznavanje amplitudno–fazne karakteristike u oblasti frekvencija za koje se karakteristika nalazi u IV i III kvadrantu  $Re-Im$  ravni, tj. za fazne uglove od 0 do  $-\pi$ , te se dijapazon frekvencija od interesa uzima od  $\omega_0$  do  $\omega_\pi$ , gdje indeks označava pripadni fazni ugao. Poznavanje amplitudno–fazne karakteristike u I kvadrantu  $Re-Im$  ravni nije od osobitog interesa, ali je ponekad potrebno imati informaciju o karakteristici u II kvadrantu.

Kao granična frekvencija u praksi uzima se:  $\omega_{gr} \approx (2 - 2.5) \omega_\pi$ , te se u slučaju da je potrebno poznavati ponašanje u I i II kvadrantu koristi opseg od  $\omega_\pi$  do  $\omega_{gr}$ .

- Amplituda ulazne veličine treba biti :  **$A \approx (5 - 15)\%$  efektivnog hoda izvršnog organa.**
- Kod spornih objekata ulaznu funkciju je moguće generisati i ručno, djelujući na izvršni organ. Ako je izvršni organ sa konstantnom brzinom, tada će on pravougli ulazni signal  $x_1$  deformisati u trapezni ili čak trouglasti signal  $x$  na ulazu u objekat u užem smislu, te tu činjenicu treba uzeti u obzir pri analizi ulaznih talasnih oblika.
- Amplituda ulaznog signala treba da bude odabrana na osnovu kompromisa koji traži amplitudu dovoljno veliku da se izlazni signal razlikuje od šumova uvijek prisutnih u objektu, ali ne preveliku kako bi oscilacije izlazne veličine ostale u granicama koje diktira tehnologija objekta. Očito je da pri višim frekvencijama, osobito u blizini  $\omega_\pi$ , amplituda ulaznog signala mora biti viša s obzirom na niskopropusni karakter industrijskih objekata.
- Karakteristična i veoma važna tačka  $\omega_\pi$  se može odrediti specijalnim oblikom ulazne funkcije prema slici



- Objektu koji je u stacionarnom stanju u trenutku  $t_1$  unosi se prethodna smetnja na ulaz, veličine 5 do 15 procenata od maksimalno moguće, a trajanje se održava sve dok izlazna veličina ne počne da odstupa od početnog stacionarnog stanja. U momentu  $t_2$  kada izlazna veličina počne da odstupa, komutira se ulazna veličina u suprotnom smjeru i u dvostrukom iznosu prema prethodnoj smetnji. Postupak se ponavlja u svakom momentu kada izlazna veličina prolazi kroz liniju početnog stacionarnog stanja. Eksperimentat se produžava sve dok se ne postigne stacionaran oscilatorni proces i dok se ne registruju dva do tri perioda oscilovanja  $T_\pi$ , te slijedi:

$$\omega_\pi = \frac{2\pi}{T_\pi} \text{ [rad/s]}$$

Vidljivo je sa slike da su prvi harmonik ulaza  $x$  i prvi harmonik izlaza  $y$  pomaknuti jedan prema drugom za  $\pi$ . Za industrijske objekte sa sporo promjenljivim veličinama (temperatura, vlažnost, nivo) specijalnu ulaznu funkciju za sprovođenje eksperimenata za dobijanje  $\omega_\pi$  moguće je generisati ručno, dok za brže procese (pritisci, protoci i sl.) treba imati specijalni generator ulazne funkcije. Granica pouzdanih rezultata pri ručnom generisanju tipkalima za uključenje izvršnog organa u jednu ili drugu stranu je jedno komutiranje u dvije sekunde.



## Obrada rezultata eksperimenta

- Ako se eksperiment sprovodi prostim harmonijskim signalom, jednačina

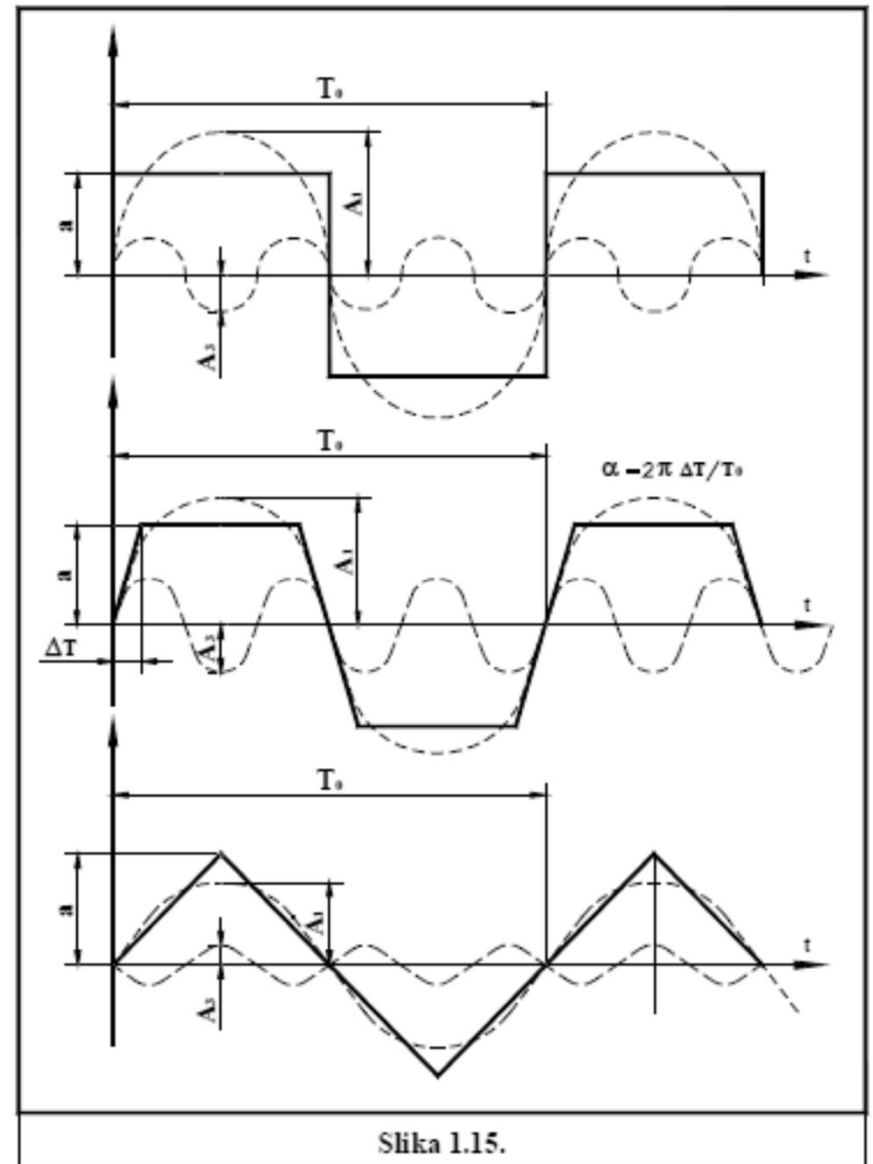
$$\frac{Y}{X} = \frac{B}{A} e^{j(\phi_y - \phi_x)}$$

je direktno primjenljiva. Međutim, ako se radi sa pravouglim, trouglim ili trapeznim signalom na ulazu, potrebno je izvršiti harmonijsko razlaganje tih složenih signala na proste harmonijske komponente, te na svaki harmonik primijeniti jednačinu pojedinačno.

Važno je napomenuti da, uslijed efekta konačne brzine izvršnog organa kojim se u objekt unosi ispitna funkcija, koordinata  $x$  može imati trapeznu formu, iako je  $x$  pravougli talas.

Razlaganje ulaznih signala je veoma prosto i detaljni podaci se mogu naći u matematičkim priručnicima, gdje su tabelirani harmonici standardnih talasnih formi, te će ovdje biti pokazani samo Tabelom bez posebnog detaljiziranja. S obzirom da se radi o centralno simetričnim signalima, razlaganje daje samo neparne harmonike. Veličine koje se pojavljuju u tabeli definisane su na slici 1.15.

Talasni oblik	A1	A3	A5
pravougli	1,27a	0,42a	Suviše mala veličina i praktično neupotrebljiva
trapezni	$\frac{4a \sin \alpha}{\pi a}$	$\frac{4a \sin 3\alpha}{9\pi a}$	
trougaoni	0,8a	-0.08a	

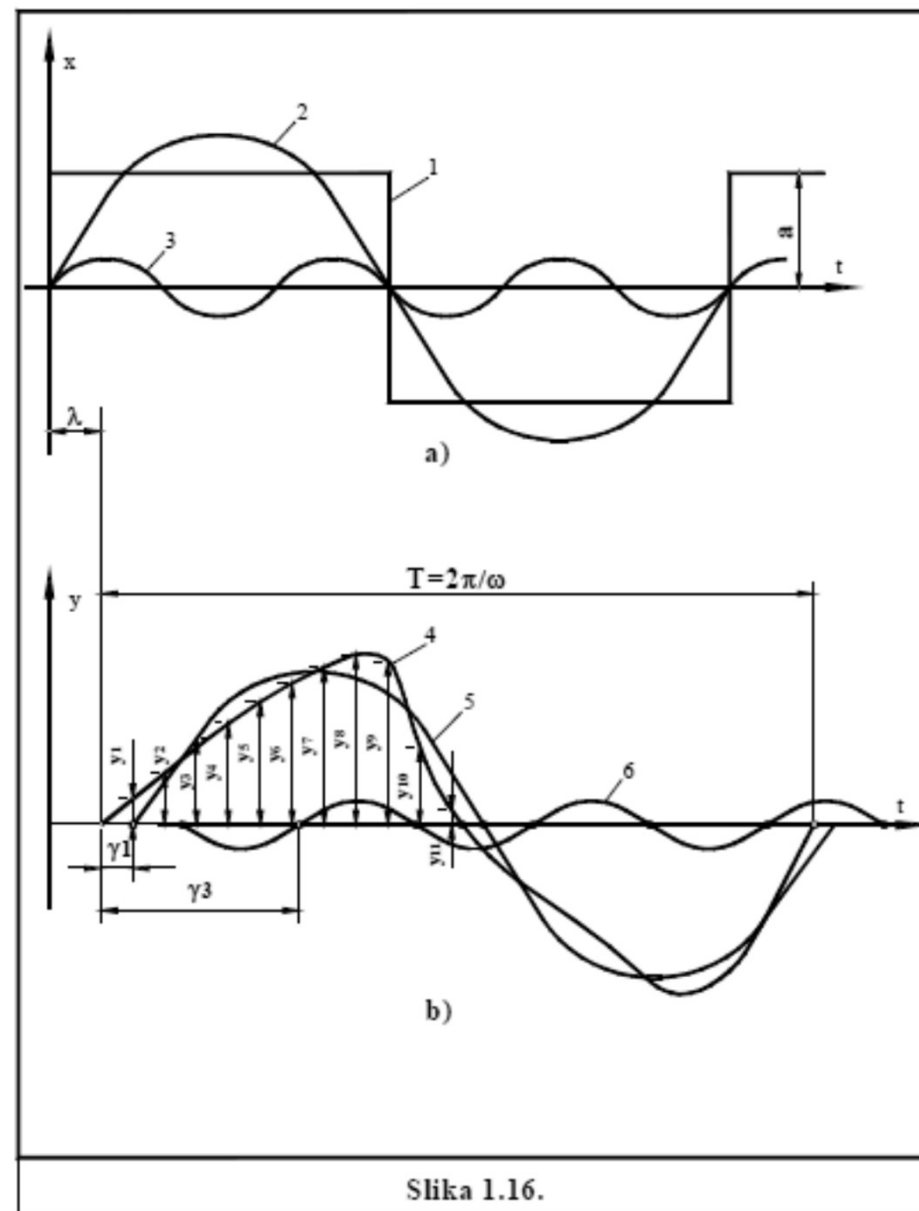


Prolaz oscilacija kroz dinamički sistem praćen je uvijek disipacijom energije i konverzijom jednog vida energije u drugi. Ti procesi su karakterizirani funkcijom  $W(j\omega)$ .

Svojstva sistema ogledaju se u tome što se energija različitih harmonika različito disipira.

Opšte svojstvo neoscilatornih sistema je monotono opadanje amplitudno–frekventne karakteristike sa porastom frekvencije, tj. energija visokofrekventnih harmonika se disipira intenzivnije.

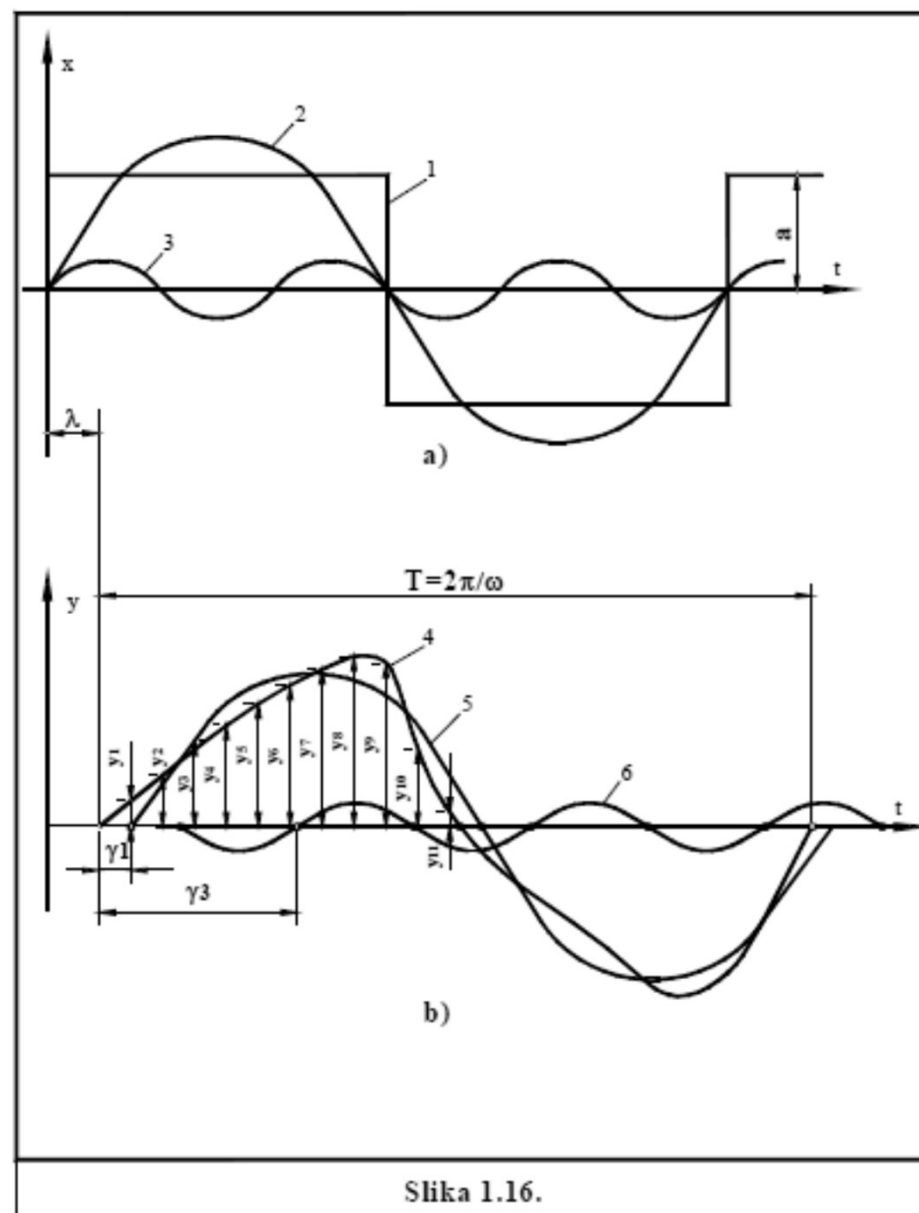
Spektralni sastav ulaznog signala i forma  $W(j\omega)$  su takvi da na srednjim i visokim frekvencijama pri pravouglom, a još izraženije pri trapeznom ulaznom signalu oblik izlaznih oscilacija linearnih sistema sa dovoljnom tačnošću se podudara sa sinusoidom, što kao posljedicu daje nepotrebnost njihove harmonijske analize i razlaganja na komponente. Krive promjene izlazne veličine pri snimanju frekventnih karakteristika obično su slične onima pokazanim na sl. 1.16.b (kriva 4).



Slika 1.16.

Takva kriva se naziva koso simetričnom i njen frekventni sastav je takav, da ne sadrži konstantni član i parne harmonike.

Amplitude harmonika brzo opadaju sa porastom njihovog reda (kriva 5–prvi harmonik, kriva 6–treći harmonik). Zato, ako se izvede eksperiment na nekoj frekvenciji  $\omega$ , to se podaci toga eksperimenta obično koriste za dobijanje jedne tačke amplitudno–fazne karakteristike, i to na frekvenciji koja odgovara prvom harmoniku, tj  $\omega$ . Korištenje tih podataka za određivanje tačke amplitudno–fazne karakteristike koja odgovara frekvenciji trećeg harmonika  $3\omega$  vezano je sa velikim greškama u slučaju kada je objekat koji se ispituje bogat šumovima (zbog neispunjavanja uslova vrijednosti amplitude za treći harmonik), upotreba tih rezultata za dobijanje dvije tačke karakteristike jednim snimanjem se ne preporučuje, pogotovo ako postoji mogućnosti izvođenja nezavisnog eksperimenta na frekvenciji  $3\omega$ .



Slika 1.16.

- Analizu krive 4 sa sl. 1.16.b) moguće je provesti Runge–Tompsonovim postupkom. U tu svrhu se polutalas analizirane krive razdijeli na djelova i ordinate  $y_1, y_2, \dots, y_{2v-1}$  koriste u proračunu.

Računaju se sume:

$$s_1 = y_1 + y_{2v-1}$$

$$s_2 = y_2 + y_{2v-2}$$

⋮

⋮

$$s_v = y_v$$

i razlike

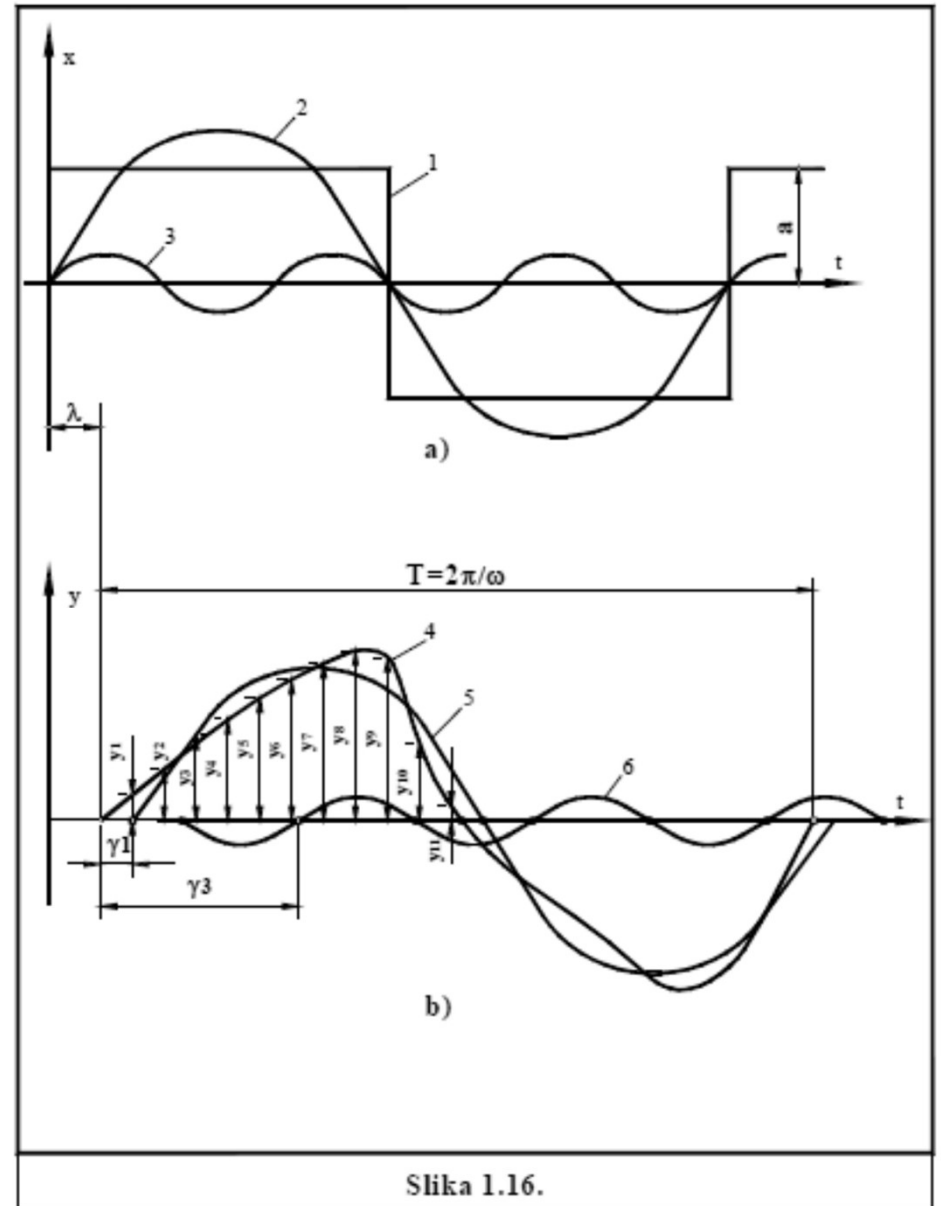
$$d_1 = y_1 - y_{2v-1}$$

$$d_2 = y_2 - y_{2v-2}$$

⋮

⋮

$$d_{v-1} = y_{v-1} - y_{v+1}$$



Slika 1.16.

Na osnovu tih podataka se računaju  $a_1$  i  $b_1$ :

$$a_1 = \frac{d_1 \cos \frac{\pi}{2v} + d_2 \cos 2 \frac{\pi}{2v} + \dots + d_{v-1} \cos(v-1) \frac{\pi}{2v}}{v}$$

$$b_1 = \frac{s_1 \sin \frac{\pi}{2v} + s_2 \sin 2 \frac{\pi}{2v} + \dots + s_v \sin v \frac{\pi}{2v}}{v}$$

ili kraće,

$$a_1 = \frac{1}{v} \cdot \sum_{k=1}^{k=v-1} d_k \cos k \frac{\pi}{2v}$$

$$b_1 = \frac{1}{v} \cdot \sum_{k=1}^{k=v} s_k \sin k \frac{\pi}{2v}$$

Prvi harmonik se može napisati u formi:

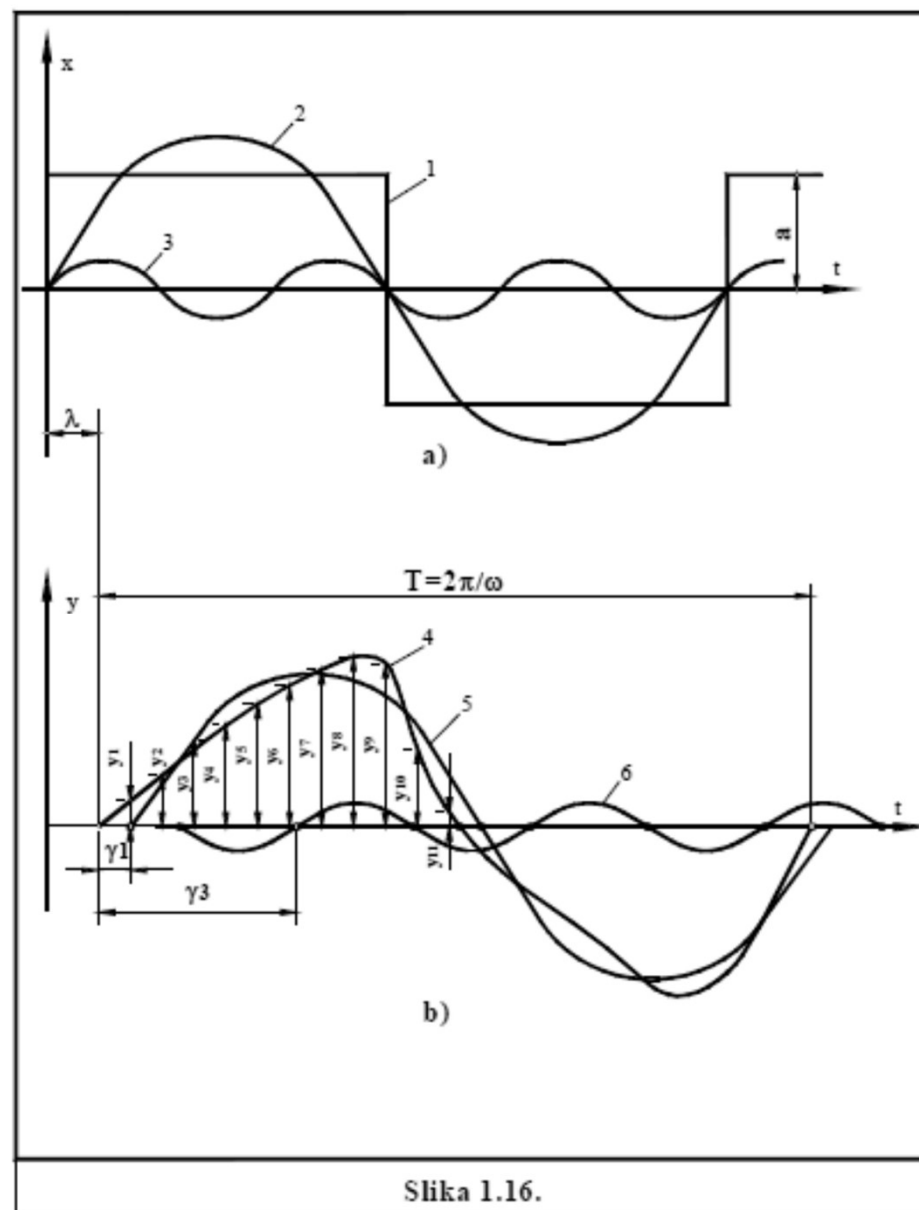
$$a_1 \cos t + b_1 \sin t = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} (\sin \gamma \cos t + \cos \gamma_1 \sin t) = B_1 \sin(t + \gamma_1)$$

gdje je amplituda prvog harmonika

$$B_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

a pomak faze prvog harmonika u odnosu na analiziranu krivu

$$\gamma_1 = \arctan \frac{a_1}{b_1}$$



Slika 1.16.

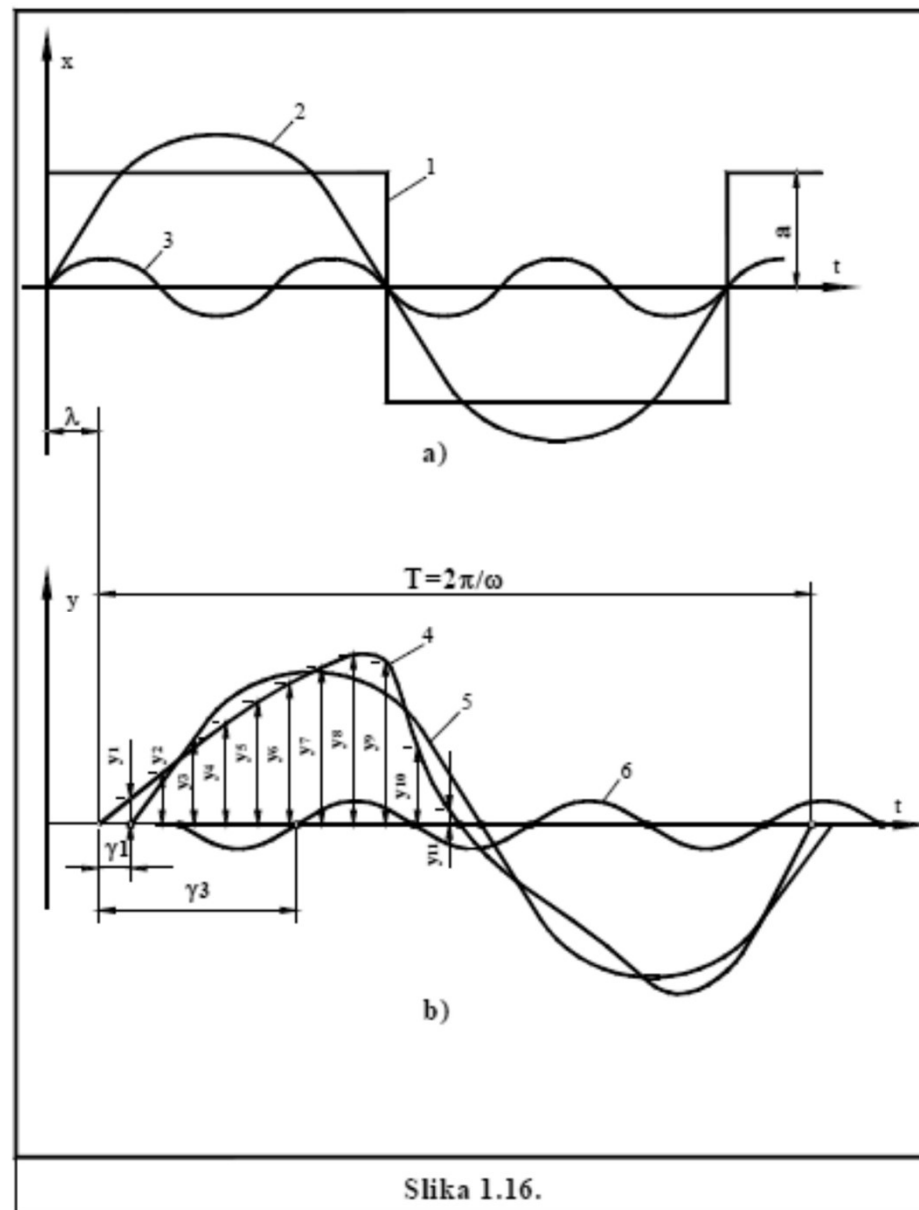
Nakon sprovođenja razlaganja ulaznog signala prema tabeli 3. i izlaznog signala prema prethodnim jednačinama, moguće je dobiti polarne koordinate točke  $W(j\omega_k)$  kao:

$$|W(j\omega_k)| = \frac{B_1(\omega_k)}{A_1(\omega_k)}$$

$$\Phi(\omega_k) = \gamma_1(\omega_k) + \lambda(\omega_k)$$

gdje je  $\lambda$  fazni pomak koso simetrične krivue izlazne veličine u odnosu na ulaznu funkciju.

Za praktičnu upotrebu dovoljno je polutalas krive 4 sa sl. 1.16.b) podijeliti na 6 ili najviše 12 vremenskih odsječaka.



Slika 1.16.

## Približna međusobna veza dinamičkih karakteristika dobivenih u vidu vremenskih i amplitudno-faznih karakteristika

- Ako se objekat identifikuje metodom odskočne ili impulsne ispitne funkcije rezultati eksperimenta su  $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$ ,  $\tau_{ob}$ . Na osnovu tih podataka nije teško dobiti amplitudno-faznu karakteristiku grafičkom konstrukcijom. Ta amplitudno-fazna karakteristika je aproksimativna jer uključuje u sebi polaznu približnost koja je određena činjenicom da je objekat višeg reda predstavljen objektom prvog reda sa čistim kašnjenjem. U tom slučaju označi li se

$$W_I(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob} s + 1}$$

slijedi

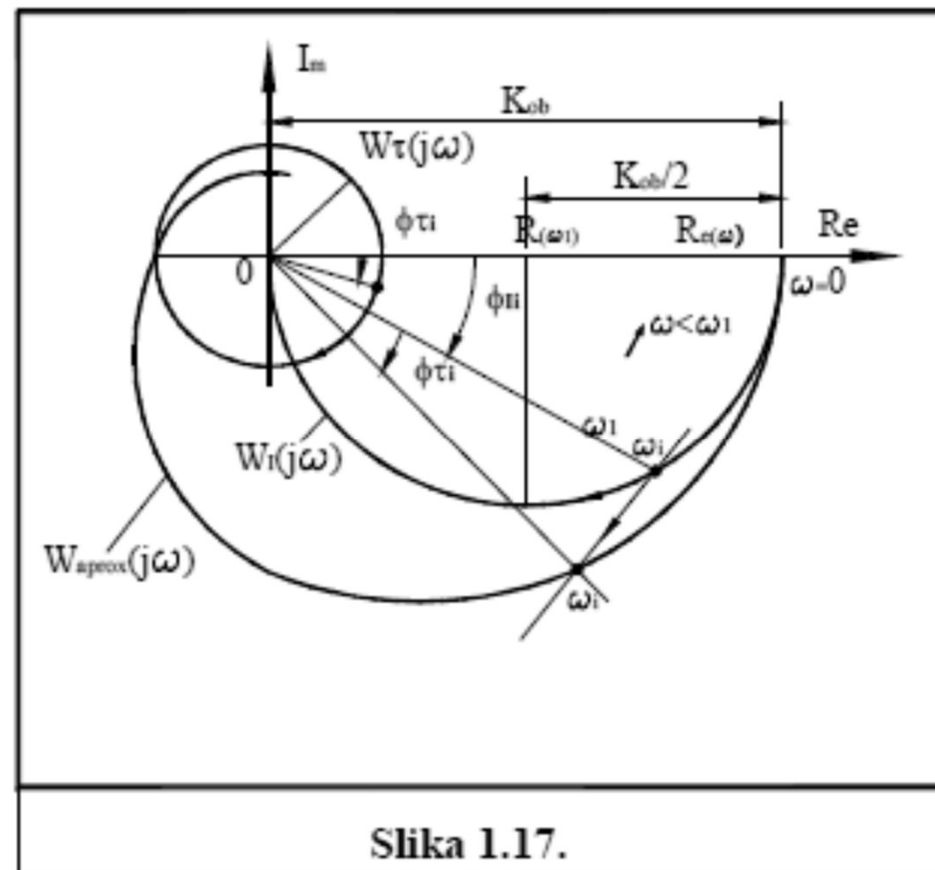
$$W_{aprox}(j\omega) = W_I(j\omega)W_\tau(j\omega)$$

$$W_\tau(s) = e^{-\tau_{ob}s}$$



- gdje su  $W_I(j\omega)$  i  $W_\tau(j\omega)$  amplitudno-fazne karakteristike objekta prvog reda i čistog kašnjenja, respektivno.
- Amplitudno-fazna karakteristika  $W_I(j\omega)$  je polukrug u IV-tom kvadrantu Re Im ravni sa centrom na pozitivnoj Re osi, i prečnikom jednakim  $k_{ob}$ , koji je poznat sa vremenske karakteristike. Znajući  $T_{ob}$  odrede se frekvencije na tom hodografu

$$\omega_i = \frac{tg \phi_{i_i}}{T_{ob}} \quad [rad / sec]$$



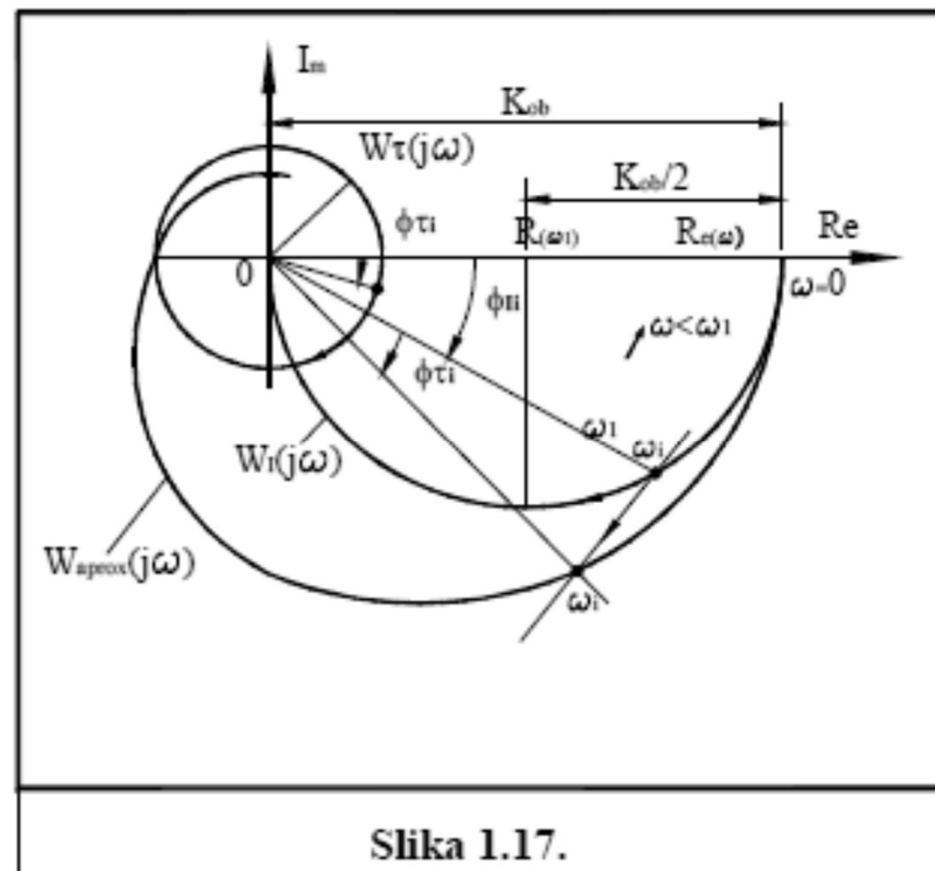
- Time je karakteristika  $W_1(j\omega)$  potpuno određena.
- Amplitudno-fazna karakteristika bloka čistog kašnjenja  $W_\tau(j\omega)$  je krug sa jediničnim radijusom sa centrom u koordinatnom početku kompleksne ravni.
- Frekvencije na tom hodografu se odrede kao

$$\omega_i = \frac{\phi_{\tau i}}{57\tau_{ob}} \quad [rad / sec]$$

Time je potpuno određena i karakteristika  $W_\tau(j\omega)$ . Postupak za određivanje jedne tačke  $W_{aprox}(j\omega)$  na frekvenciji  $\omega_i$  je prema sl.

Uglu  $\phi_{li}$  doda se ugao  $\phi_{\tau i}$ , povuče se prava iz koordinatnog početka Re Im ravni pod tim uglom i tačka sa frekvencijom  $\omega_i$  se prenese lukom sa centrom u koordinatnom početku Re Im ravni sa  $W_1(j\omega)$  na presjek luka i prave.

Time se dobije jedna tačka hodografa  $W_{aprox}(j\omega)$  za frekvenciju  $\omega_i$ . Za sve sljedeće tačke postupak je identičan.



Slika 1.17.

- Ova procedura je veoma korisna jer se identifikacija objekta najčešće vrši metodom odskočne ispitne funkcije, a sinteza upravljačke konture na osnovu amplitudno-fazne karakteristike.
- Obrnuto pretvaranje, dobijanje parametara  $k_{ob}$ ,  $\tau_{ob}$ ,  $T_{ob}$  na osnovu snimljene amplitudno-fazne karakteristike je pokazano na sl.18.

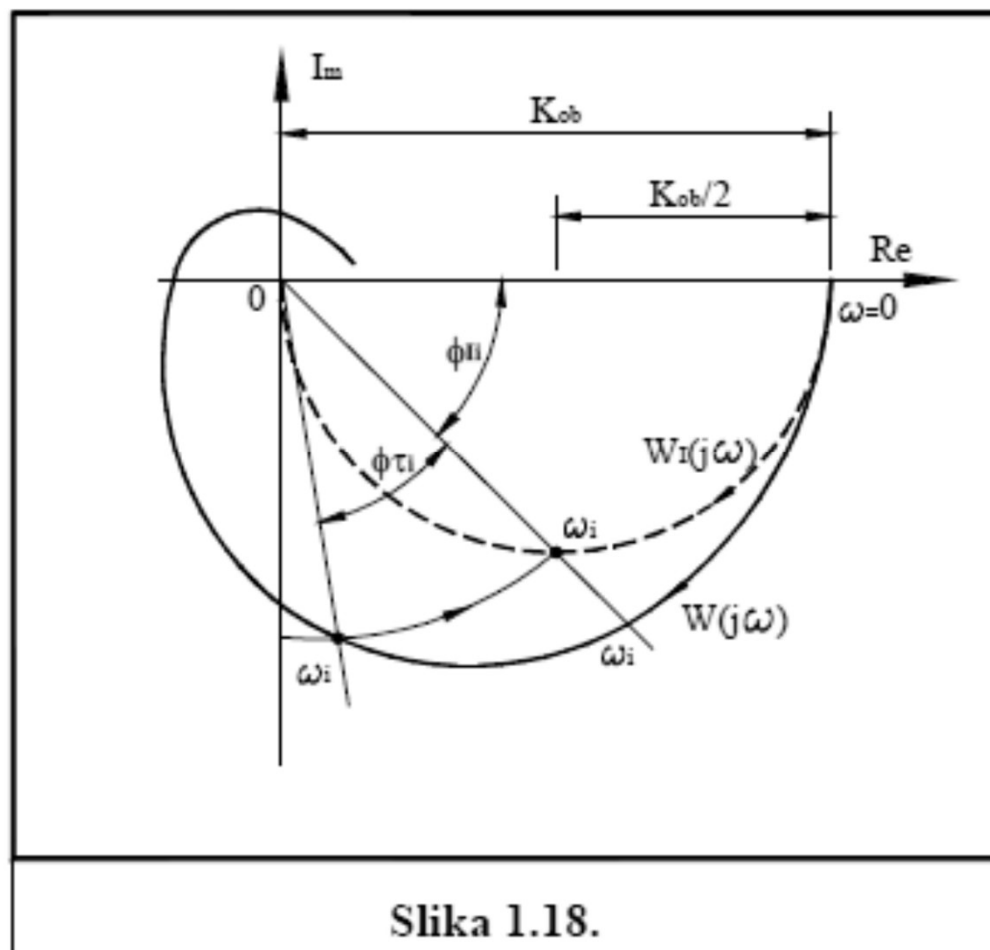
Tačka  $\omega_i$  se po luku sa centrom u koordinatnom početku Re Im ravni prenese na polukrug koji predstavlja amplitudno-faznu karakteristiku  $W_1(j\omega)$  i čiji centar se nalazi na pozitivnoj Re osi na  $\frac{k_{ob}}{2}$

Kob je direktno moguće očitati pošto je tačka  $\omega = 0$  zajednička za  $W(j\omega)$  i  $W_1(j\omega)$ . Uglovi  $\phi_{\tau i}$  i  $\phi_{\Pi i}$  se direktno sa te konstrukcije mogu dobiti, te se primjene na jednačine

$$\tau = \frac{\phi_{\tau i}}{\omega_i 57} \quad [sek]$$

$$T = \frac{tg \phi_{\Pi i}}{\omega_i} \quad [sek]$$

Obje procedure pretvaranja su prikazane na primjerima statičkih objekata, ali su direktno primjenjive i na astatičke objekte, kada  $W_1(j\omega)$  predstavlja hodograf po negativnoj Im osi.

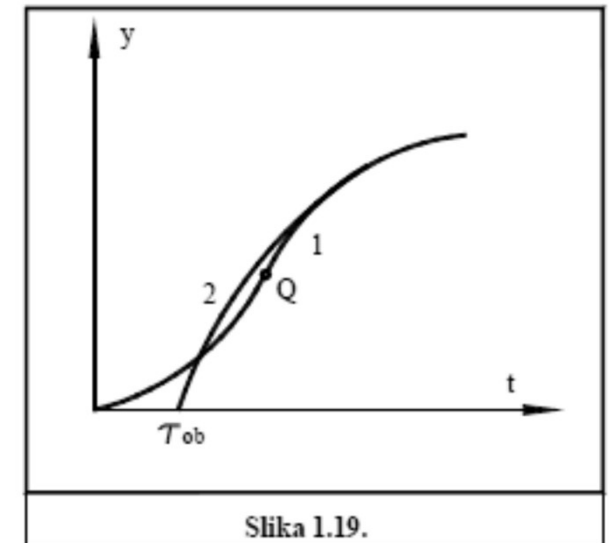


Slika 1.18.

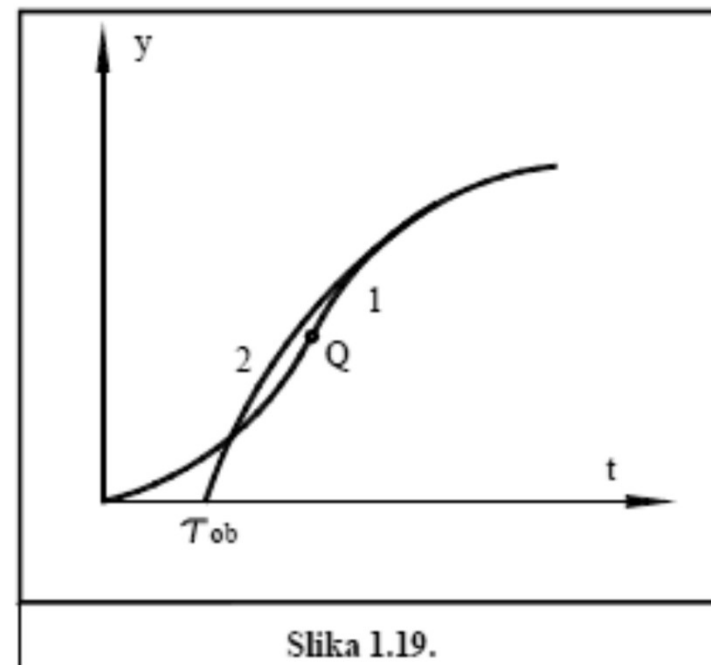
## Opravidanost aproksimacije objekta viskog reda, objektom prvog reda sa čistim kašnjenjem

- Pošto se aproksimacija data donjom jednačinom često koristi ima smisla detaljnije se pozabaviti njenom opravdanošću. Na sl.19 su pokazani odzivi objekta višeg reda (kriva 1) kao i objekta prvog reda sa čistim kašnjenjem (kriva 2) kojim se aproksimira kriva 1.

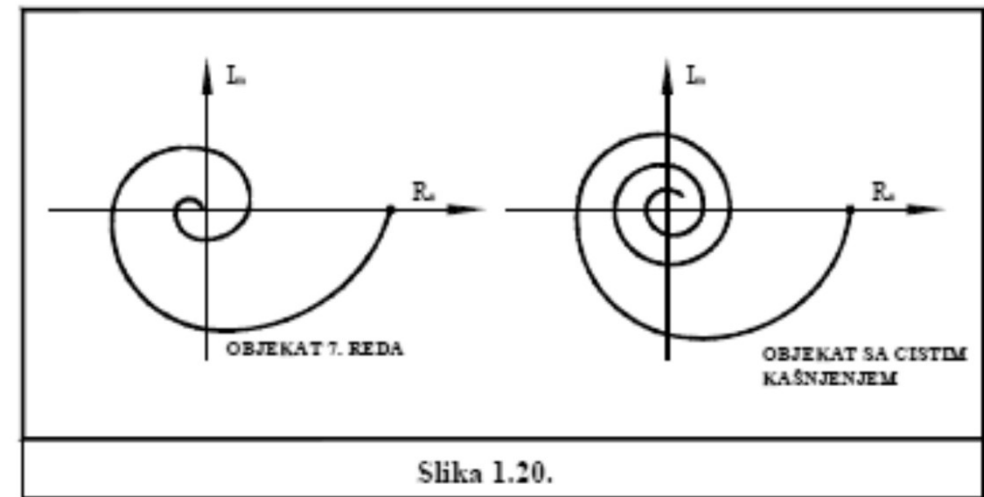
$$W(ob) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)} \approx \frac{k}{(Ts + 1)} e^{-\tau_{ob}s}$$



- Kriva 1 ima zaobljen početni dio što je rezultat višeg broja faznih kašnjenja sastavnih dijelova multikapacitivnog objekta i kašnjenje definisano presjekom tangente u tački infleksije sa vremenskom osom je aproksimacija u sigurnu stranu jer je očigledno da je sa gledišta upravljanja ugodnije imati objekat sa „prenosnim“ kašnjenjem kakvo ima kriva 1 nego sa „čistim“ kašnjenjem kakvo je kod krive 2.
- Objekat sa prenosnim kašnjenjem ima reakciju i u vrijeme dok se proračunski ta reakcija ne uzima u obzir, te će svaka sinteza sistema automatskog upravljanja (ili podešavanje regulatora) dati bolje rezultate u stvarnosti nego što su proračunski.
- Druga značajnija razlika je u tome što kriva 1 ima infleksiju i  $T_{ob}$  se određuje s obzirom na tangentu u tački infleksije Q, dok kriva 2 ima maksimalni nagib u tački diskontinuiteta.



- Poredeći amplitudno-fazne karakteristike koje odgovaraju za oba slučaja uočljiva je bitna razlika koja se ogleda u činjenici da za objekat sa čistim kašnjenjem, u principu beskonačno puta se obavlja oko koordinatnog početka (što se može dokazati razvojem funkcije čistog kašnjenja u red sa beskonačnim brojem članova) dok karakteristika objekta n-tog reda prolazi samo n kvadranta  $Re$   $Im$  ravni. Dobro slaganje obje karakteristike u IV-vom i III-em kvadrantu opravdavaju aproksimaciju, a da je aproksimacija “u sigurnu stranu” očigledno je iz činjenice da je lakše upravljati objektom n-tog reda nego objektom beskonačnog reda kojim aproksimiramo.



# METODA PASIVNOG EKSPERIMENTA

- U nekim slučajevima pri ispitivanju dinamičkih karakteristika nema mogućnosti da se ispitivani objekat izoluje od smetnji te primjena aktivnih metoda eksperimenta ne dolazi u obzir jer se odziv objekta ne može razdvojiti od šumova, a ispitivanje objekta sa velikim amplitudama ulaznog signala nije moguće uslijed strogih ograničenja koje nosi režim rada objekta.
- Posljednjih godina su razvijene metode pasivnog eksperimenta koje omogućavaju određivanje dinamičkih karakteristika objekta u toku normalnog rada objekta bez uvođenja ispitne funkcije. Ove metode su zasnovane na teoriji slučajnih procesa. Nedostatak metoda pasivnog eksperimenta je u velikom obimu polaznih informacija, a takođe i teška obrada podataka.
- Zato se praktična obrada ovih informacija može sprovesti samo automatizacijom obrade, koja se sastoji u korišćenju univerzalnih ili specijalnih računara.
- Kod off–line obrade računari se koriste kombinovano. Specijalni računar (procesni) prima informaciju direktno sa mjernih pretvarača objekta i obrađuje informacije u trenutku njihovog dolaska sa objekta. Ovaj računar obično ne završava obradu, nego daje informaciju u kondenzovanom obliku – u vidu korelacionih funkcija, spektralnih funkcija i sl. Ostali dio obrade – određivanje dinamičkih karakteristika na osnovu korelacionih funkcija i spektralnih funkcija– rješava se na univerzalnom računaru. Međutim, kod on–line identifikacije brzih objekata, razvijena je posebna tehnika tzv. brze Furijeve transformacije (FFT), koja koristi velike superbrze računare ili specijalne paralelne računarske arhitekture, posebno strukturno prilagođene ovom vidu aplikacije (DSP–digitalno procesiranje signala), što omogućava da se zadatak riješi i bez velikih računara



# Definicija slučajne veličine

Neka je potrebno provesti neko ispitivanje. U tom slučaju zadaje se sveukupnost konkretnih uslova i razmatra se veličina koja se ispituje. Ako se pri jednim te istim uslovima ponavljaju ta ispitivanja, tada se dobijeni rezultati mogu svrstati u dvije grupe:

- pri svakom eksperimentu ispitivana veličina ima jedne te iste vrijednosti
  - pri svakom eksperimentu ispitivana veličina ima različite vrijednosti koje je nemoguće ranije predvidjeti.
- Ako se ispitivana veličina prve grupe razmatra u nizu eksperimenata pri određenim promjenama konkretnih uslova, tada će se vrijednosti te veličine mijenjati. Ali ako se ponovi skup konkretnih uslova, uvijek će se dobiti isti iznosi ispitivane veličine, kao i u prethodnom ispitivanju pri istim uslovima. Zahvaljujući tome, za veličine prve grupe se može ustanoviti sasvim određena kruta zavisnost od konkretnih uslova.
  - Za veličine druge grupe takve mogućnosti nema, jer se dobijeni rezultati pri svakom ponavljanju konkretnih uslova mijenjaju.
  - Veličina, vrijednost koja pri konkretnom skupu uslova nije određena zbog nejednoznačnosti drugostepenih uslova, naziva se slučajnom veličinom.

- U svojstvu primjera može se razmotriti primjer nekoliko “jednakih” hemijskih reaktora koji na izlazu daju neku koncentraciju izlaznog proizvoda. Mjerene veličine koncentracije će se razlikovati. To se objašnjava mnogim uzrocima koje je nemoguće uzeti u račun: konstrukcija reaktora ne može biti identična; razlikuje se aktivnost katalizatora u različitim reaktorima; nejednako se održava režim rada u različitim reaktorima; različita je tačnost mjerenja koncentracije izlaznog proizvoda u različitim reaktorima itd. Sve se to u krajnjoj konsekvenci odražava na koncentraciju izlaznog proizvoda.
- Koncentracija izlaznog proizvoda, mjerena u jednom te istom momentu na izlazu različitih reaktora je slučajna veličina. Slučajne funkcije vremena se nazivaju slučajnim procesima. Tako npr., koncentracija izlaznog proizvoda u nekom momentu vremena u funkciji temperature u zoni reakcije je slučajna funkcija, a promjena te koncentracije, razmatrana pri konstantnoj temperaturi je slučajni proces.
- Pri ispitivanju slučajni procesi se zapisuju pomoću odgovarajućih registratora ili ručno. Kod izučavanja slučajnih procesa u industrijskim objektima često se može koristiti postojeći registrogrami koji se normalno snimaju pri eksploataciji objekta. Zapisi slučajnih procesa u vidu tabela ili dijagrama, dobijeni kao rezultat eksperimenta na procesu, nazivaju se realizacijama.

# Autokrelaciona i kroskorelaciona funkcija

Autokorelaciona funkcija, za neki slučajni proces  $x(t)$  je po definiciji

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt$$

gdje su  $2T$  – interval vremena na kome se provodi usrednjavanje množilaca  $x(t)$   $x(t+\tau)$   
 $\tau$  - veličina vremenskog pomaka među množiocima funkcije  $x(t)$ .

Kako slijedi iz izraza autokorelaciona funkcija omogućava da se ustanovi srednja veličina veze koja postoji među dvjema veličinama funkcije  $x(t)$ , međusobno udaljenim u vremenu za  $\tau$ . Obično veličina te veze se smanjuje sa povećanjem  $\tau$ . Najveći iznosi funkcije  $R_{xx}(\tau)$  su pri malim vrijednostima  $\tau$ . Pri  $\tau = 0$ , autokorelaciona funkcija ima maksimum

$$R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2(t) dt$$

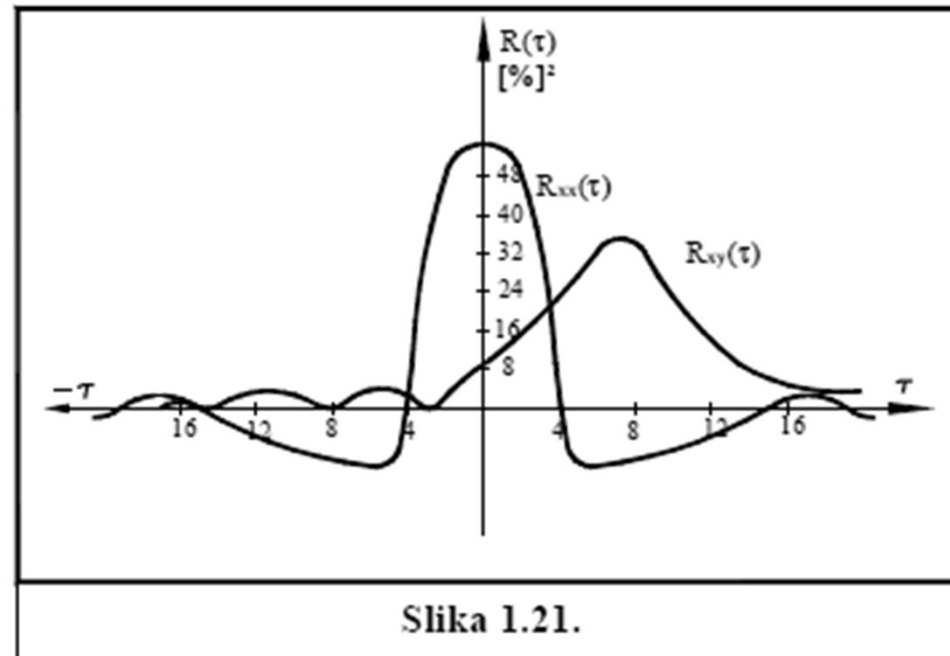
Kroskorelaciona funkcija je po definiciji

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot y(t + \tau) dt$$

i označava srednju veličinu veze među dvjema veličinama dvaju slučajnih procesa  $x(t)$  i  $y(t+\tau)$ , međusobno udaljenim u vremenu za  $\tau$ .

Za razliku od autokorelacione, kroskorelaciona nije parna funkcija

- Na sl.21. je pokazana forma  $R_{xx}(\tau)$  i  $R_{xy}(\tau)$  za jedan konkretni objekat – jedan tehnološki agregat postrojenja za sintezu amonijaka. Korelirani su ulazna funkcija  $x(t)$  i izlazna funkcija  $y(t)$ .
- Za razliku od  $R_{xx}(\tau)$ , vidi se da  $R_{xy}(\tau)$  nema svojstvo simetričnosti s obzirom na osu ordinata.
- Često je pogodno normalizovati korelacionu funkciju s obzirom na  $R_{xx}(0)$ .



Slika 1.21.

$$R_{xx}^n(\tau) = \frac{R_{xx}(\tau)}{R_{xx}(0)}$$

odakle slijedi

$$R_{xx}^n(0) = 1$$

- Jednačine pokazuju da je nemoguće provesti tačno izračunavanje korelacionih funkcija pošto se traži da period posmatranja  $T \rightarrow \infty$ . Za praktične svrhe moguće je ograničiti se na konačni interval  $T$ . Veličina intervala  $T$  se bira tako da bude zadovoljeno  $T \gg T_{nn}$  gdje je  $T_{nn}$  vrijeme prelaznog procesa u ispitivanom sistemu. Očigledno je nezgodno što se prije svega mora poznavati barem grubo vrijeme prelaznog procesa objekta čiju identifikaciju tek želimo provesti. Međutim, to nije neko bitno ograničenje jer neke apriorne informacije o procesu postoje i prije njegove pune identifikacije.
- Poslije izbora racionalnog iznosa za  $T$ , može se pristupiti dobijanju konačnog materijala na dva načina – ili iskoristiti već postojeće dijagrame sa registratora koji postoje na objektu ili priključiti registratore i čekati neophodno vrijeme dok se ne dobiju zadovoljavajuće realizacije. Drugi put je pogodniji pošto omogućava da se dijagrami dobiju u povoljnijoj formi za obradu – u pravouglim koordinatama, sa pogodnim mjerilom po osi koordinate i po osi vremena. Za obradu na računskoj mašini, veoma je pogodno informacije sabrati u diskretnoj formi, u obliku cifara. Uzorci se uzimaju u jednakim vremenskim intervalima.
- Takva forma informacija se može dobiti primjenom specijalnih informacionih automata (data loggeri) ili primjenom računara u funkciji prikupljanja podataka (data acquisition). Moguće je registrovanje informacija i u drugim formama, na pr. kontinualno registrovanje na magnetne trake za naknadnu obradu ili neposredno u memoriju računara sa istovremenom obradom.
- Izbor najudobnijeg vida registracije se određuje saglasno konkretnim uslovima eksperimenta i mogućnostima obrade dobijenih informacija. Računanje korelacionih funkcija vezano je sa veoma velikim obimom obrade informacija, koji traži neophodnu automatizaciju računa. Zato je pravilan izbor forme polaznih podataka veoma važan, i omogućava znatnu uštedu vremena.

- Korelaciona funkcija signala  $x(t)$  pri ograničenom intervalu vremena posmatranja  $T$  računaju se pomoću izraza

$$R_{xx}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \qquad R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt$$

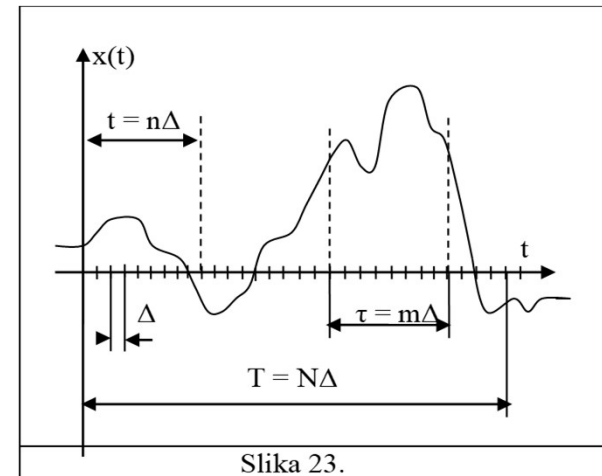
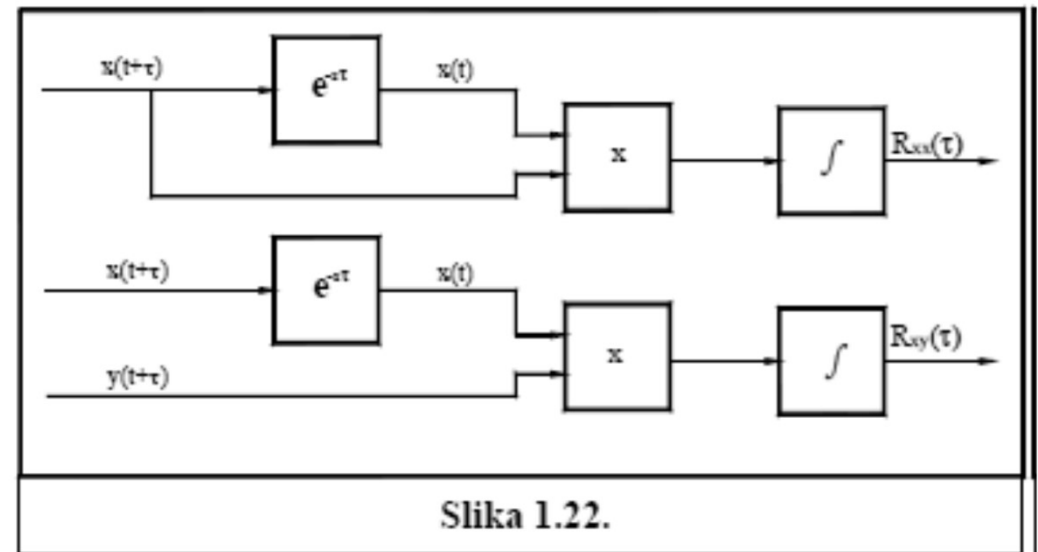
odakle se vidi da je za dobijanje korelacionih funkcija za interval  $\tau = 0$  do  $\tau = \tau_{\max}$  potrebno vršiti snimanje (posmatranje) u vremenu  $T + \tau_{\max}$  te je u tom slučaju stepen tačnosti jednak u cijelom intervalu.

Ako je potrebno smanjiti količinu računanja uz dopuštanje neke greške pri većim  $\tau$ , tada se može računanje provesti na osnovu snimanja (posmatranja) u vremenu  $T$ , ali jed. postaju

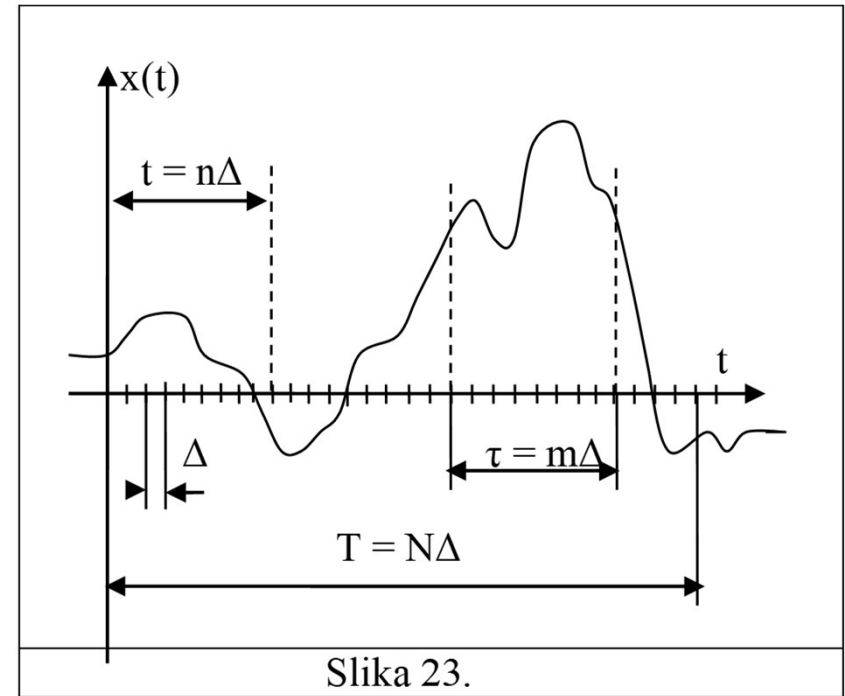
$$R_{xx}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T - \tau} x(t) \cdot x(t + \tau) dt \qquad R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T - \tau} x(t) \cdot y(t + \tau) dt$$

Pošto je potrebno održati uslov  $\tau_{\max} \ll T$  obično se uzima  $10\tau_{\max} \leq T$ .

- Na sl.1.22. data je struktura računanja korelacionih funkcija sa operacijom pomaka, množenja i integriranja. Za obje funkcije struktura je ista, s tim što kod kroskorelacione funkcije postoje dva izvora informacija.
- Ako se računanje korelacionih funkcija želi izvesti ručno ili pomoću digitalnog računara postupak je identičan. Polazna informacija se predstavi u vidu tablice diskretnih vrijednosti slučajnog procesa  $x_i$  uzetih na jednakim intervalima vremena  $\Delta$ .
- 
- Veličina intervala  $\Delta$  se bira tako da na jednom intervalu među dvjema susjednim ordinatama slučajni proces bude što bliži pravoj liniji, sl.1.23.



- Uzimajući dovoljno veliki interval  $T$ , razdijeli se na  $N$  intervala  $\Delta$  i odredi se  $N$  vrijednosti funkcije  $x(t)$  odnosno  $y(t)$ . Zadajući fazni pomak  $\tau$ , nađe se  $N$  vrijednosti pomaknute funkcije  $x(t+\tau)$  odnosno  $y(t+\tau)$ . Poslije toga za svaku vrijednost  $\tau$  odredi se suma činilaca  $x(t) \cdot x(t+\tau)$  odnosno  $x(t) \cdot y(t+\tau)$ . Pošto je  $t = n\Delta$ , a  $\tau = m\Delta$ , tada prethodni izrazi prelaze u



$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(m\Delta) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x(n\Delta) \cdot x[(n+m)\Delta]$$

$$R_{xy}(\tau) = R_{xy}(m\Delta) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x(n\Delta) \cdot y[(n+m)\Delta]$$



- Na tačnost računa utiču sljedeći faktori:

1. Tačnost polaznih informacija, tj. tačnost s kojom u računu korišćeni cifarski podaci odgovaraju stvarnim vrijednostima signala. Osim tačnosti registratora, veliku ulogu u tom igra i izbor intervala  $\Delta$ . Izbor toga intervala najbolje je izvršiti saglasno teoremi Shanona (sampling Theorem) po kojem je minimalno potrebn interval za punu rekonstrukciju signala jednak

$$\Delta = \frac{\pi}{\omega_c}$$

gdje je  $\omega_c$  frekvencija najvišeg harmonika unutar frekventnog sadržaja signala.

Pošto je  $\omega_c$  obično nepoznata, to se može koristiti preporuka već iznesena uz definiciju  $\Delta$ , uzimajući kao kriterijum zakrivljenje dijagrama slučajnog procesa.

2. Dužina intervala posmatranja slučajnog procesa T. Pri izboru T neophodno je uzeti u obzir da njegovo uvećanje vodi ka većoj tačnosti formula za računanje korelacionih funkcija, ali i da se ipak smanjuje tačnost cijelog računa pri pretjerano dugim realizacijama pošto realni slučajni procesi imaju i neku nestacionarnost koja time dolazi do izražaja. Osim toga i prevelika količina informacija nosi veću vjerovatnoću slučajnih grešaka u računu, a i glomazne račune.

- Preporučuje se poluempirijski kriterijum gdje je  $\omega_n$  frekvencija najnižeg frekventnog harmonika slučajnog procesa.

$$T \geq \frac{50}{\omega_n}$$

3. Maksimalno vrijeme  $\tau_{\max}$  za koje se računaju korelacione funkcije. To vrijeme mora biti znatno kraće nego T. Iskustvo računanja korelacionih funkcija na računarima pokazuje da uvećanje  $\tau_{\max}$  vodi ka povećanju grešaka. Preporučuje se pridržavanje kriterijuma datog jed.  $10\tau_{\max} \leq T$ .

- Kada su korelacione funkcije izračunate na bilo koji način, sljedeći korak je u nalaženju funkcija spektralnih gustina.
- Spektralna gustina se dobije kao Fourierova transformacija korelacione funkcije

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

- Funkcije  $S_{xx}(\omega)$  i  $S_{xy}(\omega)$  sadrže svu informaciju koju sadrže i  $R_{xx}(\tau)$  odnosno  $R_{xy}(\tau)$ , i predstavljaju analoge korelacionih funkcija u frekventnom domenu.
- Funkcije spektralne gustine su vezane sa amplitudno-faznom karakteristikom

$$W(j\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)}$$

Mogući su i drugi postupci za korištenje korelacionih funkcija u svrhe identifikacije, a prikazan put je samo primjer jednog od tih postupaka.

## METODE IDENTIFIKACIJE OBJEKATA U KONTURI SA REGULATOROM

- Ako je jedini cilj identifikacije utvrđivanje polaznih informacija za podešavanje parametara regulatora onda se veoma često i ne vrši identifikacija samog objekta, nego identifikacija cijele konture (objekat, informacioni organ, regulator, izvršni organ). Procedura se svodi na pronalaženje prirodne frekvencije konture kada je u konturi proporcionalni regulator i pronalaženje pojačanja regulatora koje daje oscilacije konture na prirodnoj frekvenciji. Pošto je za definiciju kriterijuma za ovaj vid identifikacije potrebno razmatranje o zatvorenoj konturi.
- Ovdje je potrebno napomenuti da su period oscilacija  $T_0$  na prirodnoj frekvenciji  $\omega_0$  i pojačanje proporcionalnog regulatora  $k_{kr}$  dovoljni podaci za podešavanje regulatora.
- Međutim, ako se želi vršiti ocjena dinamičkog odziva cijele konture, (ili samog objekta pri poznatim informacionim i izvršnim organima), potrebno je izvršiti još dopunski eksperiment za određivanje vremena čistog kašnjenja  $\tau$ . Ovo je veoma jednostavna i od mnogih praktičara preferirana metoda, koja u ogromnom broju slučajeva može učiniti nepotrebnim bilo kakav drugi tip identifikacije.
- Metoda se sastoji od po jednog eksperimenta sa otvorenom konturom i zatvorenom konturom. Regulator, koji već postoji u konturi služi kao pribor za testiranje.

1. Sa regulatorom na režimu RUČNO, odskočna ili impulsna funkcija se generiše, sve dok se na izlazu objekta ne pojavi primjetno odstupanje. Izmjeri se vrijeme proteklo između momenta uvođenja smetnje u objekat i indikacije odziva. To je kašnjenje  $\tau$ .
2. Regulator se prebaci u režim AUTOMATSKI sa minimalnim vremenom  $T_d$  i maksimalnim integralnim vremenom  $T_i$ . Podešava se pojačanje regulatora dok se ne pojave neprigušene oscilacije čiji period  $T_0$  se odredi, kao i pojačanje regulatora na kojem su neprigušene oscilacije nastupile.

U ovom eksperimentu, kontura se drži otvorenom samo veoma kratko vrijeme, dok se ne izmjeri  $\tau$ . Bilo koji drugi tip eksperimentalne identifikacije drži konturu otvorenom duže vrijeme. Dio eksperimenta sa zatvorenom konturom opisuje proces pod uslovima koji su od najvećeg značaja, tj. na prirodnoj frekvenciji konture. Dva kompletna perioda su dovoljna da se pouzdano izmjeri  $T_0$ . Ako nije praktično moguće da se ostvare neprigušene oscilacije, mjerenje se može izvršiti i sa prigušenim oscilacijama uz korekciju pojačanja regulatora saglasno stepenu prigušenja.

Iz dobijenih podataka se može mnogo saznati o procesu

- Ako je  $T_0 / \tau = 2$  - proces je čisto transportno kašnjenje
  - Ako je  $2 < T_0 / \tau < 4$  - transportno kašnjenje je dominantno
  - Ako je  $T_0 / \tau = 4$  - u procesu je dominantan jedan kapacitet
  - Ako je  $T_0 / \tau > 4$  - više nego jedan kapacitet je prisutan u procesu
- 
- Ovo su dovoljne informacije za svrhe podešavanja parametara regulatora, što ćemo kasnije i pokazati
  - Ovaj eksperiment se može ponoviti na nekoliko zadatih vrijednosti regulatora kako bi se uočila egzistencija mogućih nelinearnosti. Ako su rezultati jednaki na svim radnim tačkama, objekat je linearan.

# METODE FIZIČKOG MODELIRANJA

- Postoje slučajevi kada je nemoguće sprovesti eksperimentalnu identifikaciju objekta, a čisto analitičke metode su neefektivne zbog složenosti objekta.
- Npr. pri uvođenju u industrijsku primjenu novih tehnoloških procesa, potrebno je razraditi sistem upravljanja pojedinim operacijama kao i cijelim procesom. Budući tehnološki proces, ili njegovi pojedini djelovi, najprije se razrade u laboratorijskim uslovima, a zatim se izvede minijaturni eksperimentalni agregati.
- Kako pokazuje iskustvo toga razvoja, pri prelasku od laboratorijske na eksperimentalnu, a takođe i pri prelazu od eksperimentalne na industrijsku izvedbu agregata, tehnološki proces dobija nove osobenosti, tj. svakoj izvedbi odgovara različiti matematički model. Zbog toga se ne mogu neposredno koristiti rezultati identifikacije eksperimentalnog agregata za projektovanje sistema upravljanja industrijskim agregatom ili procesom. Međutim postoji mogućnost da se rezultati identifikacije eksperimentalnog agregata iskoriste, ali putem dopunske obrade.
- Fizičko modeliranje sastoji se u sprovođenju eksperimentalnih ispitivanja na modelu u kojem teku procesi identični po svojoj fizičkoj prirodi procesima u objektu sa preračunavanjem rezultata da se dobiju rezultati koji su adekvatni za realni objekat.
- Fizički model mora u određenom smislu odgovarati realnom objektu. Ta korenspondencija se naziva sličnost ili podobnost.

Za korišćenje fizičkog modeliranja neophodno je raspolagati projektnim podacima o budućem objektu; podacima o materijalima od kojih se planira graditi objekat; podacima o radnim medijima i njihovim parametrima u različitim tačkama objekta. Mora se izučiti kvalitativna strana tehnološkog procesa da bi bilo jasno kakvi su parametri procesa vezani međusobno, šta je važno, šta se može zanemariti.

Ispitivanje karakteristika objekta pomoću fizičkog modeliranja uključuje sledeće etape:

1. Izučavanje projekta objekta i podataka o tehnološkim procesima koji će u njemu proticati.

2. Proračun, projektovanje i izgradnja fizičkog modela objekta

3. Provođenje eksperimentalnog modeliranja tj. eksperimentalno ispitivanje na modelu, da bi se dobili podaci za određivanje karakteristika modela, istoimenih karakteristikama objekta

4. Izračunavanje karakteristika modela i preračunavanje dobijenih podataka kako bi se dobile karakteristike objekta.

Fizičko modeliranje u novije vrijeme nalazi svoju primjenu u mnogim oblastima nauke i tehnike, posebno u aerodinamici, hidraulici, toplotehnici, hemiji itd. Fizičko modeliranje je zasnovano na teoriji sličnosti i teoriji skaliranja. Osnovna teškoća pri fizičkom modeliranju je sama izgradnja modela koji će stvarno odgovarati objektu čije karakteristike želimo saznati. Sličnost mora biti dvojaka: a) geometrijska sličnost radnih volumena objekta i modela tj. prostora u kome teku tehnološki procesi i b) sličnost samih tehnoloških procesa



Fizičko modeliranje je zasnovano na teoriji podobnosti (sličnosti) i teoriji skaliranja. Osnovna teškoća pri fizičkom modeliranju je sama izgradnja modela, koji stvarno odgovara (korespondira) objektu čije se karakteristike žele saznati.

Podobnost mora biti dvojaka:

- a) geometrijska sličnost radnih volumena objekta i modela, tj. prostora u kome protiču tehnološki procesi i
- b) podobnost samih tehnoloških procesa.

Pri tome mogu biti različiti mediji i materijali modela i objekta. Npr., procesi koji se dešavaju u užarenim gasovima često mogu biti ispitani na modele u kome se kao medij koriste tečnosti pri niskoj temperaturi.

Modeliranje omogućava promjenu brzine kretanja radnih medija, te usporavanje ili ubrzavanje vremenske skale u modelu u odnosu na objekt. U svrhe udobnijeg posmatranja fizičkih pojava u modelu, model se često izvodi sa providnim zidovima ili se gradi u potpunosti od providnih materijala, a radnim medijima se dodaju sredstva za bojenje.

Geometrijska podobnost se osigurava konstantnošću koeficijenata skaliranja za sve linearne dimenzije objekta. Ako se neka dimenzija objekta označi sa  $n_{10}$ , a analogna dimenzija modela sa  $n_{1m}$ , to se uslov geometrijske sličnosti može zapisati u vidu:

gdje je  $K_l$  geometrijski koeficijent skaliranja.

$$\frac{n_{1m}}{n_{10}} = K_l = konst.$$

Osim geometrijske podobnosti, neophodna je i tehnološka podobnost, koja se osigurava jednakošću kriterijima podobnosti za odgovarajuće tačke u modelu i objektu. Pod kompleksima se podrazumijevaju umnošci potencija parametara. Simpleks je specijalni slučaj kompleksa koji predstavlja odnos dva parametra sa istom dimenzijom. Da bi tehnološki proces u modelu bio podoban procesu u objektu, neophodno je izabrati koeficijente skaliranja koji određuju odnose istoimenih parametara modela i objekta.

## IZBOR METODA EKSPERIMENTALNE IDENTIFIKACIJE

- Pokazan je određeni asortiman metoda za eksperimentalnu identifikaciju i kao prirodno pitanje se postavlja problem odluke u trenutku kada se mora prići objektu i identifikovati ga.
- Sama činjenica da je metoda mnogo i da su sve razvijene do praktične upotrebljivosti navodi na zaključak da ni jedna od njih nije univerzalna u tolikoj mjeri da bi mogla isključiti ostale iz izbora. Svaka metoda ima jednu oblast primjene gdje je nadmoćna, a kriterijumi izbora su upravo primjenljivost i ograničenja na primjenljivost. Oblasti primjene se preklapaju, te je u slučaju moguće upotrebe dvije ili više metoda presudna efikasnost metode u smislu bržeg dobijanja rezultata, niže cijene eksperimenta, što manje količine instrumentacije koja se mora upotrijebiti i sl.

Jedan od puteva razmišljanja bi mogao biti ovaj:

1. Ako objekat fizički ne postoji nego samo projektno jedino što preostaje je metoda matematičkog ili metoda fizičkog modelovanja.
2. Ako objekat fizički postoji – izgrađen i dostupan, bira se jedna od eksperimentalnih metoda.
3. Ako je objekat dozvoljeno posmatrati, ali ne i djelovati na njega mora se upotrijebiti pasivna metoda, ali ta pogodnost što objekat neće biti ometan u radu ispitnim smetnjama skupo se plaća glomaznom obradom rezultata eksperimenata i složenošću aparature za tu obradu.
4. Ako je na objekat dozvoljeno djelovati aktivnim uticajima u vidu ispitnih funkcija, a zadovoljavaju aproksimativni rezultati (objekat višeg reda se tretira kao objekat prvog reda sa čistim kašnjenjem ) i pri tome objekat podnosi trajnu ispitnu smetnju malene amplitude koja daje odziv koji je moguće separirati od šumova – prirodno je upotrijebiti metodu odskočne ispitne funkcije.
5. Ako su polazne pretpostavke kao u 4, ali prisustvo šumova u objektu traži veću amplitudu ispitne funkcije kako bi odziv bilo moguće separirati od šumova, a velika amplituda ne dozvoljava trajni karakter ispitne funkcije – upotrebljava se impulsna ispitna funkcija.
6. Ako se traži tačna dinamička identifikacija objekta koji podnosi aktivno djelovanje ispitne funkcije preostaje harmonijska metoda koja tačne rezultate plaća dosta složenom obradom rezultata mjerenja, dugotrajnim mjerenjima, složenom opremom koja učestvuje u eksperimentu.
7. Ako je cilj identifikacije dobijanje polaznih podataka za podešavanje regulatora, jasno je da se preferira metoda koja daje podatke o cijeloj upravljačkoj konturi i to na prirodnoj frekvenciji konture.

U cijelom OVOM skupu dilema korisno je vidjeti šta o tome misli F.G.SHINSKEY, jedan od vodećih specijalista u savremenoj tehnici upravljanja tehnološkim procesima, koji je dalje doslovno citiran.

“Krajem 1950-tih godina mnogo se govorilo o širokoj primjeni identifikacije procesa frekventnim metodama. Stvarno, neki eksperimenti su provedeni na reaktorima, toplotnim izmjenjivačima i destilacionim kolonama. Iako je izvjesna količina informacija dobijena korištenjem te metode, dvije glavne prepreke su se pojavile

1. ovakvi eksperimenti su nevjerovatno dugotrajni
2. pretpostavljaju da je proces linearan i invarijantan.

Prva prepreka sprječava eksperiment na mnogim procesima zbog nespremnosti operatorskog personala da toleriše ispitne smetnje dugo vremena na procesu kao i zbog visoke cijene eksperimenta s obzirom na radno vrijeme eksperimentatora i skupih uređaja koji su potrebni.

Druga prepreka indicira da rezultati testa na procesima sa nelinearnim elementima mogu biti ne samo netačni i nevrijedni nego i mogu dovesti projektanta u značajnu tehničku zabludu.

Frekventne metode identifikacije procesa su pogodne samo za brze, linearne objekte kao što su instrumenti, regulatori, pojačala itd.

“.

Bio sam pozivan mnogo puta da intervenišem na procesima koji su u nevolji. U tim situacijama nemoguće je nositi sa sobom čitavu laboratoriju instrumentacije, postavljati je po objektu i danima vršiti snimanja. U mnogim slučajevima proces je nelinearan i operatorski personal ga ne poznaje dobro – inače ne bi bio u nevolji. Za sve to se traži jednostavna eksperimentalna procedura, nezavisna od nelinearnosti, koja će dati da se dominantna svojstva sistema identifikuju. Dobro vođen eksperiment će ukazati na probleme bez velikog ometanja procesa.

Da se eksperimentisanje održi na minimalnom obimu, sva znanja o procesu moraju biti iskorišćena. Zapremine posuda i protoci su uvijek poznati, odakle se mogu izračunati vremenske konstante. Dužina i prečnici cjevovoda mogu poslužiti da se odrede i lociraju elementi čistog kašnjenja. Svodeći broj nepoznatih dijelova procesa na minimum, eksperimentom se određuje samo ono što ne može brzom inspekcijom procesa.

Uvijek sam bio protiv svih eksperimentalnih procedura koje nisu bazirane na nekom poznavanju procesa. Mnoge stvari o nepoznatom procesu se mogu naučiti posmatrajući posude i cjevovode, istražujući u procesu uključenu hemiju i razgovarajući sa operatorima.

Preliminarne informacije dobijene na taj način su od neočekivano velike koristi jer indiciraju šta posmatrati i gdje. Iznenadujuće je koliko mnogo može često biti naučeno o određenom procesu čak i ne čineći nikakav eksperiment. Ponekad eksperiment neće potvrditi očekivanja. Što ipak ne daje za pravo napustiti postupak preliminarnog poznavanja procesa prije bilo kakvog zahvata