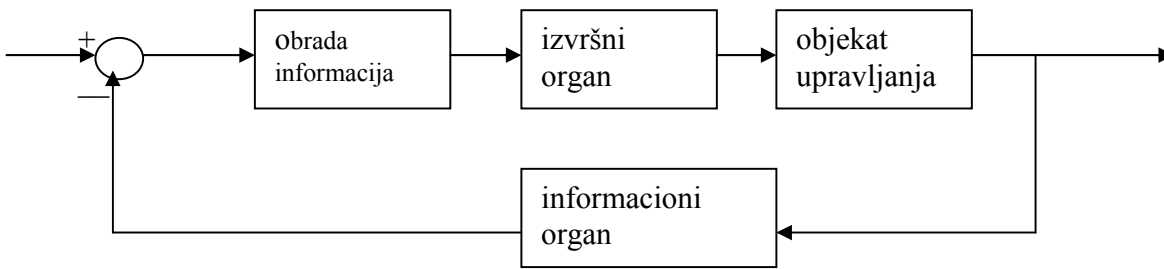


**Upravljanje Tehnološkim Procesima**  
**PREDAVANJE I**

## OPŠTA ŠEMA UPRAVLJANJA

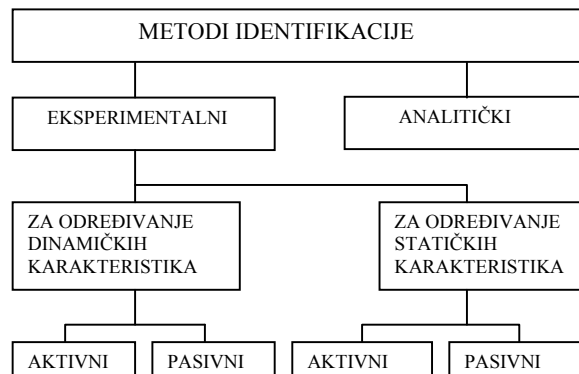


## EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA OBJEKATA

### 1.1 UVOD

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.

Na slici. 2. je pokazana uprošćena klasifikacija postojećih metoda koje se koriste u svrhe identifikacije.



SLIKA 2. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA OBJEKATA

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.

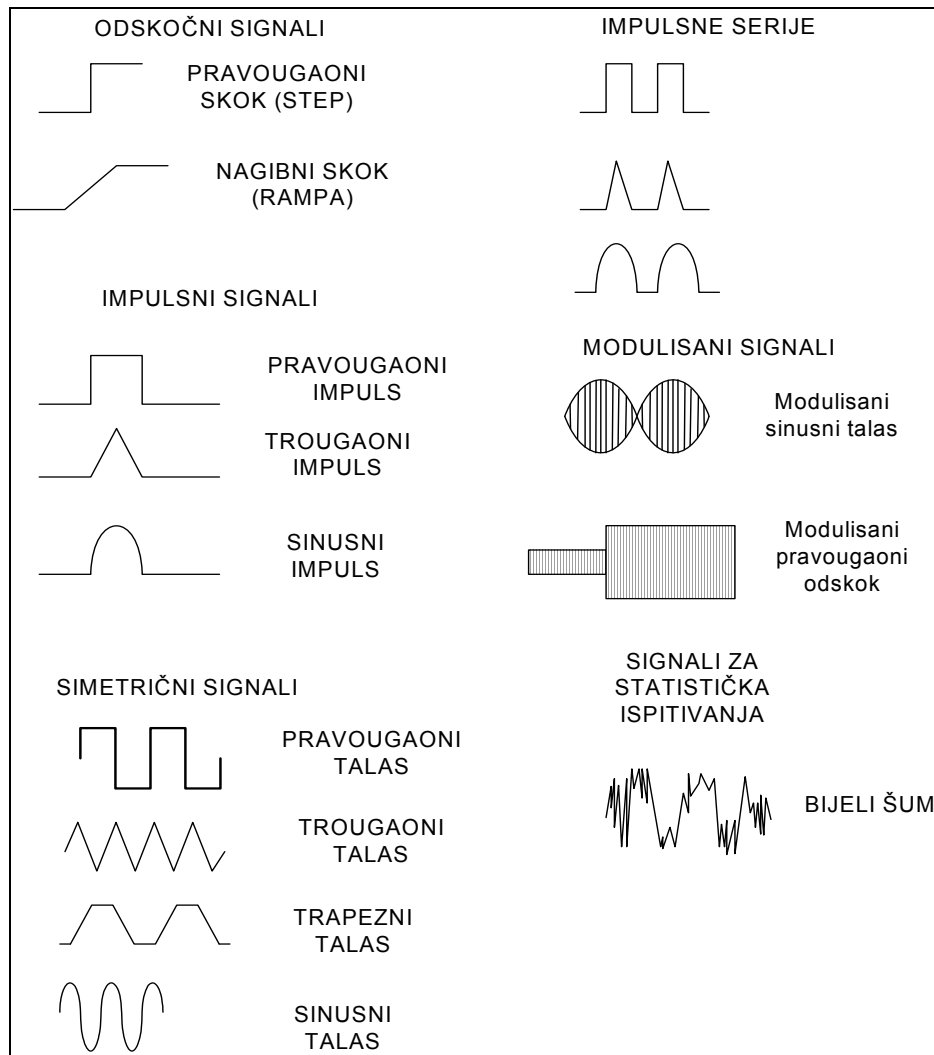
Na sl. 3. su pokazane neke od najčešće korišćenih formi ispitnih signala.

Ako se registracija reakcije ispitivanog objekta na ispitnu smetnju ostvaruje automatski pisačem, koriste se jednokratne ispitne funkcije. Isto tako i u slučaju niskofrekventnih objekata pri automatskoj registraciji.

Pri ispitivanju visokofrekventnih objekata, kada se registracija realizuje osciloskopom, nužno je da se ispitna funkcija sastoji od signala koji se ponavlja u jednakim intervalima. Takva neophodnost se javlja i pri određivanju frekventnih karakteristika. U tom slučaju na ulaz objekta daje se periodičan signal koji se ne prekida sve dok objekat ne dođe u stanje stacionarnih oscilacija. U ovim slučajevima se i koriste impulsne serije i simetrični signali. Kod ispitivanja električnih mreža, koje se napajaju naizmjeničnim signalima, primjenjuju se modulirani signali.

Za ispitivanja statističkim metodama koriste se generatori šuma, koji se u određenom području smatra bijelim šumom.

Pri ispitivanju statičkih karakteristika aktivnim metodama, tačnost dobivenih podataka takođe u mnogome zavisi od toga koliko tačno su zadate ulazne veličine. Pri sistematskim ispitivanjima statičkih karakteristika koriste se specijalne programske aparature koje se unaprijed programiraju za sve kombinacije ulaznih veličina kojima se ispitivanje vrši. U vrijeme eksperimenta programska aparatura automatski daje potrebnu kombinaciju veličina, sačekuje dolazak objekta u stacionarno stanje, registruje stanje svih mjernih organa i prelazi na sljedeći režim rada.



Slika 3.

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 brojnih vrijednosti koeficijenata modela dobijenog analitičkim ili pasivnim eksperimentalnim putem.

U ovoj glavi biće opisana eksperimentalna identifikacija objekata metodama koje se najčešće susreću i to:

aktivne metode - metoda odskočne pravougaone funkcije  
 - metoda impulsne pravougaone funkcije  
 - metoda sinusnog i pravougaonog talasa  
 - metoda planiranog eksperimenta za određivanje statičkih karakteristika  
 - metoda identifikacije objekta u konturi sa regulatorom

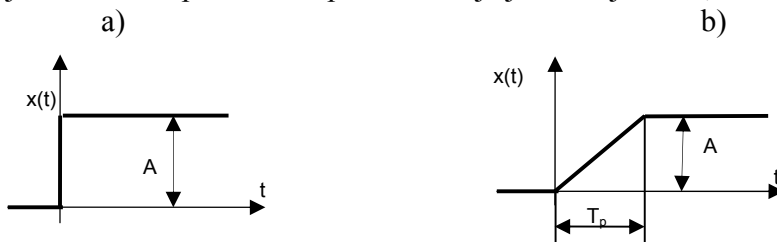
pasivna metoda - metoda spektralne funkcije

Takođe će biti opisani osnovni pojmovi metode fizičkog modeliranja.

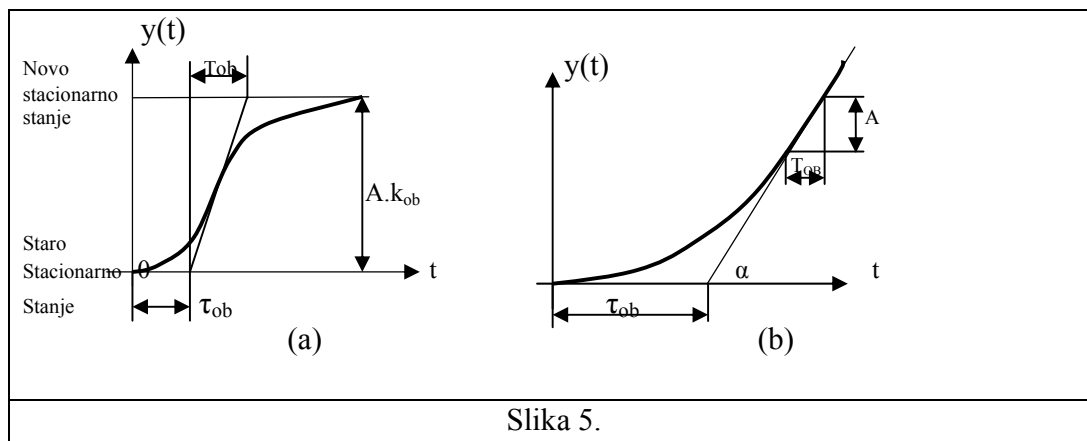
## 1.2. METODA ODSKOČNE FUNKCIJE

### 1.2.1 Ispitno djelovanje i odziv objekta

Najrasprostranjenija forma ispitnog djelovanja na objekat je odskočna funkcija prikazana na sl.4. Odskočna ispitna funkcija se definiše kao trenutna promjena ulazne veličine ispitivanog objekta (odskočna pravouglana 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 4



Slika 5.

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 raznolikost dinamičkih svojstava industrijskih objekata koji se podvrgavaju regulaciji, može se ukazati na činjenicu da su im vremenske karakteristike obično monotone funkcije vremena prikazanog na sl.5a i b, gdje se razmatraju odzivi na ispitnu funkciju tipa 4a.

U prvom slučaju odziv vremenom stremljenjem prema novom stacionarnom stanju. Takvi objekti su dobili naziv objekata sa samoizravnavanjem ili statički objekti.

U drugom slučaju objekat nema svojstvo da poprimi novo stacionarno stanje i takvi objekti se nazivaju objekti bez svojstva samoizravnavanja ili astatički objekti.

U početnom dijelu vremenske karakteristike zapaža se više ili manje izraženo kašnjenje. Kod industrijskih objekata 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 raspodjeljenih kapaciteta. Moguća je i kombinacija transportnog i kapacitivnog kašnjenja.

Analiza oznaka na sl.5a pokazuje da tangenta u tački infleksije odziva u presjeku sa starim i novim stacionarnim stanjem definiše dva parametra odziva i to  $\tau_{ob}$  i  $T_{ob}$ . Treba napomenuti da se početak odziva računa od momenta skoka ispitnog djelovanja 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

$$k_{ob} = \frac{y(\infty) - y(0)}{A} \quad (1)$$

gdje je  $y(\infty)$  - veličina odziva u novom stacionarnom stanju  
 $y(0)$  - veličina odziva u starom stacionarnom stanju  
 $A$  - amplituda ispitne funkcije

Navedene definicije se ne mogu direktno primjeniti 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  $\overline{T_{ob}}$  koja je jednaka vremenu promjene odziva za jedinicu pri jediničnoj odskočnoj ispitnoj funkciji. Uslovno pojačanje  $\overline{k_{ob}}$  se definiše kao odnos stacionarnog stanja brzine promjene odziva i veličine amplitude ulazne ispitne funkcije

$$\overline{k_{ob}} = \frac{\dot{y}(\infty)}{A} \quad (2)$$

gdje  $\dot{y}$  označava brzinu promjene koordinate  $y$ .

Očigledno je sa sl.5b da vrijedi

$$\overline{k_{ob}} = \frac{1}{\overline{T_{ob}}} \quad (3)$$

Ovakvim izborom definicija veličina  $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$  i  $\tau_{ob}$ , odnosno  $\overline{k_{ob}}$ ,  $\overline{T_{ob}}$  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 astatički) sa elementom čistog kašnjenja.

Ovo omogućava da se procedura identifikacije svede samo na traženje eksperimentalnim putem tri broja ( $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$ ,  $\tau_{ob}$ ) odnosno dva broja ( $\overline{k_{ob}}$ ,  $\tau_{ob}$ ) pri unaprijed fiksiranoj strukturi modela izraženoj prenosnim funkcijama

$$W_{ob}(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} e^{-\tau_{ob}s} \quad (4)$$

za statičke objekte, odnosno

$$W_{ob}(s) = \frac{\overline{k_{ob}}}{s} e^{-\tau_{ob}s} \quad (5)$$

za astatičke objekte.

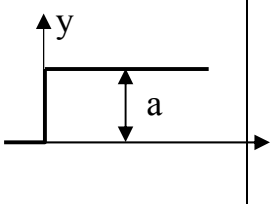
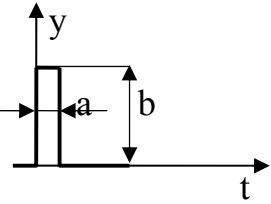
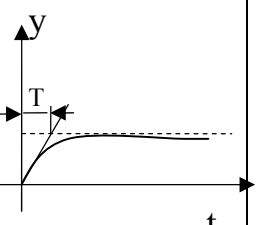
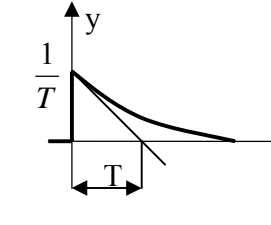
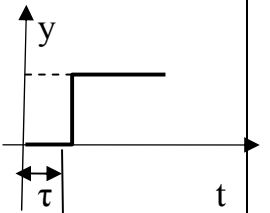
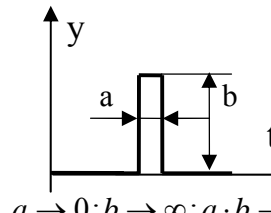
Treba napomenuti da odzivi za sl.5. predstavljaju samo najčešće susretane forme pri identifikaciji. Nekoliko drugih mogućih odziva je dato u Tablici 1.

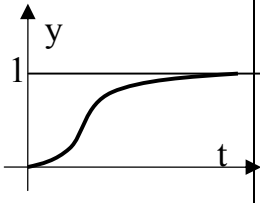
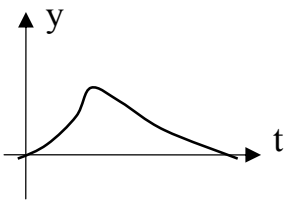
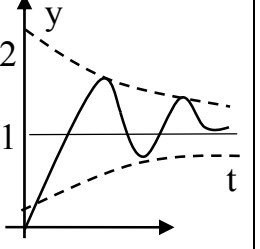
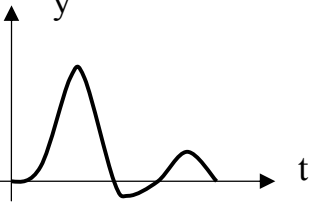
## 1.2.2 Tehnika izvođenja eksperimenta

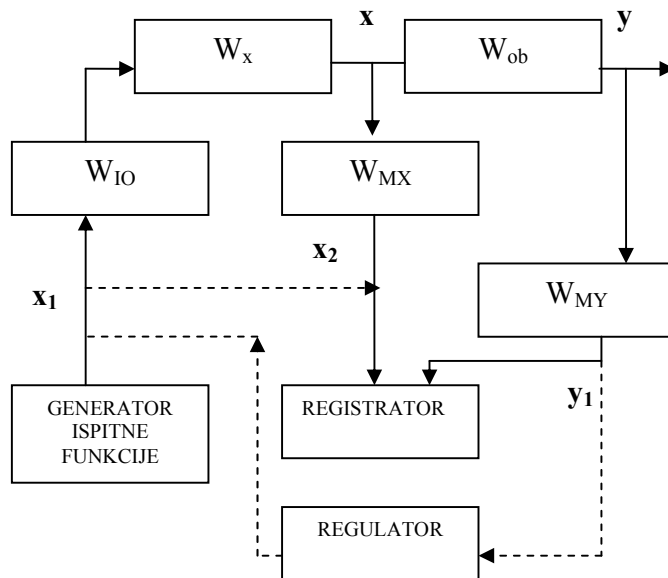
Pripremi i izvođenju eksperimenta je potrebno posvetiti mnogo pažnje, pošto principijelno ispravno izabrana metoda eksperimenta ne garantuje sama po sebi i dobre rezultate. Pošto se identifikacija sastoji u otkrivanju statičkih i dinamičkih veza među veličinama, potrebno je razmotriti u početku tehnička sredstva za izvođenje ispitnog djelovanja te mjerenje i registraciju odziva.

Statičke i dinamičke karakteristike tih tehničkih sredstava bitno utiču na rezultate eksperimenta, a time i na vjernost dobijenog modela u odnosu na objekat.

Tablica 1.

	NAZIV DINAMIČKOG SISTEMA	PRENOSNA FUNKCIJA	ODZIV NA JEDINIČNU ODSKOČNU ISPITNU FUNKCIJU	ODZIV NA JEDINIČNU IMPULSNU ISPITNU FUNKCIJU
1	POJAČAVAČ SA POJAČANJEM K	$W(s) = K$		 $a \rightarrow 0; b \rightarrow \infty; a \cdot b \rightarrow k$
2	APERIODSKI BLOK PRVOG REDA	$W(s) = \frac{1}{Ts + 1}$		
3	BLOK ČISTOG KAŠNENJA	$W(s) = e^{-st}$		 $a \rightarrow 0; b \rightarrow \infty; a \cdot b \rightarrow 1$

4	APERIODSKI BLOK DRUGOG REDA	$T < 1,$ $W(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$		
5	OSCILATORNI BLOK DRUGOG REDA	$T > 1,$ $W(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$		



Slika 6.

Na sl.6. prikazan je objekat čije se karakteristike  $W_{ob}$  žele snimiti, opremljen tehničkim sredstvima za generisanje ispitne funkcije  $x_1$ , izvođenje ispitnog djelovanja sa dinamičkim karakteristikama  $W_{IO}$ , uređajima za mjerenje ulazne i izlazne veličine objekta  $W_{MX}$  i  $W_{MY}$ , te registratorom.  $W_X$  predstavlja dinamičku k-ku dijela objekta među uređajima za izvođenje i mjerenje ispitne funkcije i ta karakteristika mora biti poznata, a poželjno je da bude u odnosu na objekat, praktično bezinerciona. Isti zahtjev se postavlja i na  $W_{MX}$  i  $W_{MY}$ .

Za identifikaciju objekta  $W_{ob}$  potrebno je korelirati veličinu  $x$  kao ulaz i veličinu  $y$  kao izlaz objekta. Na žalost, to usljed dinamike mjernih i registracionih uređaja nije moguće izvesti, te stvarno se kao rezultat eksperimenta dobiju veličine  $x_2$  i  $y_1$ . Ukoliko se identifikacija ne izvodi u svrhe kasnijeg regulisanja tog objekta te je potrebno znati  $W_{ob}$  neometano dinamikom  $W_{MX}$  i  $W_{MY}$ ,



tada se do  $W_{ob}$  dolazi kasnijom obradom rezultata mjerenja uz uzimanje u obzir poznatih karakteristika  $W_{MX}$  i  $W_{MY}$ . Međutim, ukoliko se identifikacija vrši u svrhe regulacije, upravo je pogodno da se koreliraju veličine  $x_1$  i  $y_1$ , jer regulator osjeća kao objekat u konturi serijsku vezu  $W_{IO}$ ,  $W_X$ ,  $W_{ob}$  i  $W_{MY}$ . Tada u konturi upravljanja  $W_{IO}$  predstavlja izvršni organ, a  $W_{MY}$  mjerni pretvarač regulisane veličine. U tom slučaju, govori se o objektu u širem smislu koji je definisan korelacijom veličina  $x_1$  i  $y_1$ .

Da bi eksperiment bio uspješan veoma je važno da on otpočne u trenutku kada se objekat nalazi u stacionarnom stanju. Pošto se inercionost industrijskih objekata kreće u veoma širokim granicama (vremenske konstante u opsegu od dijelova sekunde do preko jednog sata) to i trajanje stacionarnog stanja, za punu vrijednost da ono stvarno egzistira, je 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

$$\Delta t_{stac} \approx (2 \tau_{ob}) \text{ očekivano} \quad (6)$$

Ispitna funkcija  $x$  ima dimenziju [% hoda izvršnog organa].

Veličina amplitude  $A$  odskočne 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 narušeni. Pošto je ispitna odskočna funkcija trajna smetnja, to se amplituda obično ograničava na

$$A \approx (5-15) \% \text{ efektivnog } ^*) \text{ hoda izvršnog organa} \quad (7)$$

Veličinu  $A$  osim navedenog, ograničava i moguća nelinearnost statičke karakteristike objekta koja pri velikim amplitudama dolazi do izražaja.

/ \*) 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. Cilj je da efektivni i stvarni hod budu jednaki. /

Snimanje ispitne funkcije, tj. registovanje  $x_2$ , je veoma bitno kada se ispitna funkcija uvodi, u odnosu na objekat, sporim izvršnim organom. Tada se može desiti da se bitno izmijeni karakter ispitne funkcije ( npr. generator da funkciju kao na sl.4a, a na ulazu objekta se pojavi forma kao na sl.4b ), što se pri obradi rezultata eksperimenta obavezno mora uzeti u obzir, ukoliko se želi identifikovati  $W_{ob}$ , a ne objekat u širem smislu. Pri tome se vrijeme hoda izvršnog organa  $T_p$  mora unaprijed poznavati.

Pri snimanju vremenske karakteristike, mjerni uređaj  $W_{MY}$ , po pravilu, daje standardni signal na svome izlazu, te bez obzira na prirodu mjerene veličine može se računati sa dimenzijom veličine  $y_1$

$$DIM [ y_1 ] \equiv \% \text{ standardnog signala.}$$

Ukoliko se ipak želi raditi sa stvarnom dimenzijom onda

$$DIM [ y ] \equiv \text{jedinica mjere tehnološke veličine}$$

Registracija vremenske karakteristike mora se vršiti na registratoru čiji su dinamički parametri tako prilagođeni dinamici pojava koje se snimaju da ne dolazi do gubitka informacije. Za inženjersku praksu zadovoljavajuće je da bude zadovoljen uslov

$$T_{\text{reg}} \leq 0.1 T_{\text{ob}} \quad (8)$$

Gdje su  $T_{\text{reg}}$  - vremenska konstanta registratora  
 $T_{\text{ob}}$  - očekivana vremenska konstanta objekta  
 $T_{\text{reg}}$  se može jednostavno odrediti približnom relacijom

$$T_{\text{reg}} \approx 0.1 T_{\text{ps}} \quad (9)$$

gdje je  $T_{\text{ps}}$  vrijeme preleta pune skale pera registratora pri skokovito promjenjenom ulazu registratora u punom opsegu.

### 1.2.3 Obrada rezultata eksperimenta

Kod uspješno okončanog eksperimenta, obrada rezultata ne predstavlja nikakvu teškoću te se saglasno definicijama uz sl.5. mogu dobiti  $\tau_{\text{ob}}$ ,  $T_{\text{ob}}$  i  $k_{\text{ob}}$  za objekat u širem smislu. Ali, ako se žele dobiti ovi parametri za  $W_{\text{ob}}$ , tada predstoji provesti proceduru dopunske obrade snimljenog materijala kako bi se odstranio uticaj dinamike izvršnog organa i mjernog pretvarača, ukoliko oba uređaja nisu toliko brzog odziva da se uticaj njihove dinamike može zanemariti.

Eliminacija uticaja  $W_{\text{IO}}$  i  $W_{\text{MY}}$  može se provesti veoma jednostavno u domenu prenosnih funkcija ili domenu amplitudno-fazne karakteristike

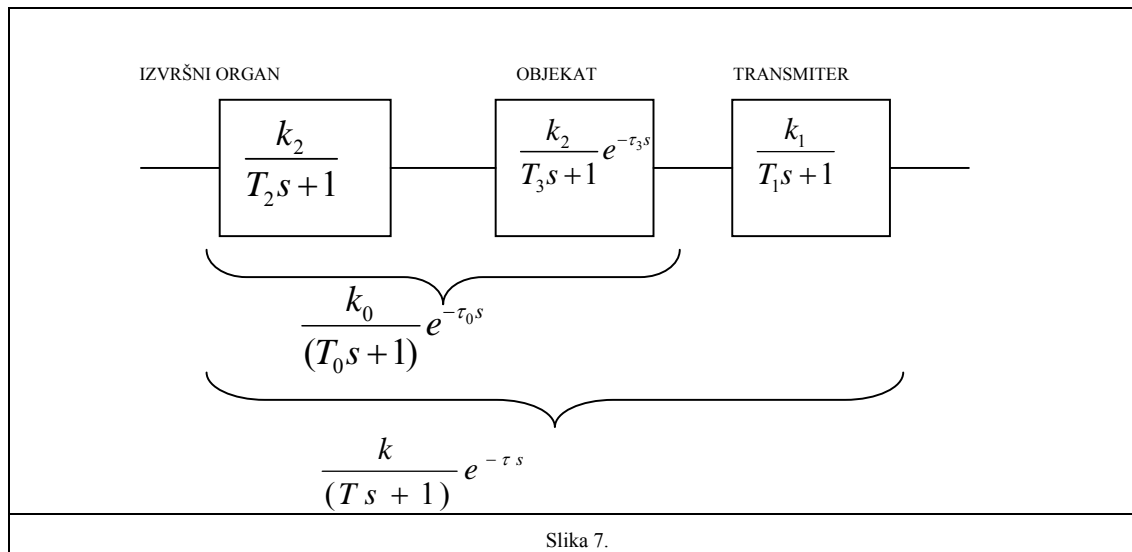
$$W_{\text{ob}}(s) = \frac{\frac{k_{\text{obš}}}{T_{\text{obš}}s + 1} e^{-\tau_{\text{obš}}s}}{W_{\text{MY}}(s) \cdot W_{\text{IO}}(s) \cdot W_{\text{X}}(s)} \quad (10)$$

odnosno

$$W_{\text{ob}}(j\omega) = \frac{\frac{k_{\text{obš}}}{T_{\text{obš}}j\omega + 1} e^{-\tau_{\text{obš}}j\omega}}{W_{\text{MY}}(j\omega) \cdot W_{\text{IO}}(j\omega) \cdot W_{\text{X}}(j\omega)} \quad (11)$$

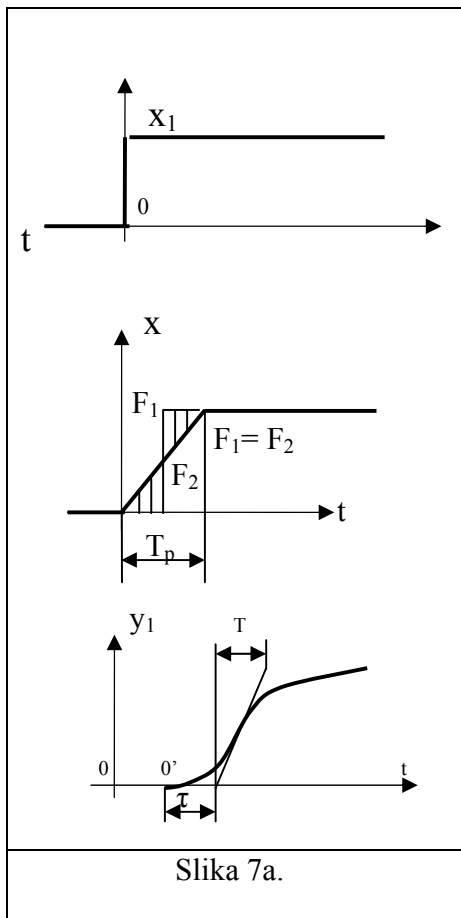
gdje indeks š označava parametre objekta u širem smislu.

Navedeni postupak je tačan i ne nosi u sebi nikakve aproksimacije, ali traži dosta obimna računanja. Zato je nekada, na račun žrtvovanja pune tačnosti koju pružaju izrazi (10) ili (11), pogodno koristiti jednostavnije aproksimativne metode. Tako na pr. sl.7 pokazuje objekat u širem smislu sa parametrima  $k, T, \tau$ , koji se sastoji od tri bloka sa parametrima  $k_1, T_1$  (transmitter);  $k_2, T_2$  (izvršni organ) i  $k_3, T_3, \tau_3$  (objekat).



Tablica 2 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 transmitter, a onda se iz "ostatka" opisanog sa  $k_0, T_0, \tau_0$  eliminiše izvršni organ.

$\frac{\tau}{T}$	$\frac{\tau_0}{T_0}$																			$\frac{\tau_0}{T_0}$
	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	
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	0.99952
0.025	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325	0.375	0.425	0.475	0.525	0.575	0.625	0.675	0.725	0.775	0.825	0.875	0.925	0.975	0.99937
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	0.99922
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	0.99907
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	0.99892
0.045	0.059	0.109	0.159	0.209	0.259	0.309	0.359	0.409	0.459	0.509	0.559	0.609	0.659	0.709	0.759	0.809	0.859	0.909	0.959	0.99877
0.050	0.056	0.106	0.156	0.206	0.256	0.306	0.356	0.406	0.456	0.506	0.556	0.606	0.656	0.706	0.756	0.806	0.856	0.906	0.956	0.99862
0.055	0.054	0.104	0.154	0.204	0.254	0.304	0.354	0.404	0.454	0.504	0.554	0.604	0.654	0.704	0.754	0.804	0.854	0.904	0.954	0.99847
0.060	0.053	0.103	0.153	0.203	0.253	0.303	0.353	0.403	0.453	0.503	0.553	0.603	0.653	0.703	0.753	0.803	0.853	0.903	0.953	0.99832
0.065	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	0.99817
0.070	0.051	0.101	0.151	0.201	0.251	0.301	0.351	0.401	0.451	0.501	0.551	0.601	0.651	0.701	0.751	0.801	0.851	0.901	0.951	0.99802
0.075	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	0.99787
0.080	0.049	0.099	0.149	0.199	0.249	0.299	0.349	0.399	0.449	0.499	0.549	0.599	0.649	0.699	0.749	0.799	0.849	0.899	0.949	0.99772
0.085	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	0.99757
0.090	0.047	0.097	0.147	0.197	0.247	0.297	0.347	0.397	0.447	0.497	0.547	0.597	0.647	0.697	0.747	0.797	0.847	0.897	0.947	0.99742
0.095	0.046	0.096	0.146	0.196	0.246	0.296	0.346	0.396	0.446	0.496	0.546	0.596	0.646	0.696	0.746	0.796	0.846	0.896	0.946	0.99727
0.100	0.045	0.095	0.145	0.195	0.245	0.295	0.345	0.395	0.445	0.495	0.545	0.595	0.645	0.695	0.745	0.795	0.845	0.895	0.945	0.99712
0.105	0.044	0.094	0.144	0.194	0.244	0.294	0.344	0.394	0.444	0.494	0.544	0.594	0.644	0.694	0.744	0.794	0.844	0.894	0.944	0.99697
0.110	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	0.99682
0.115	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	0.892	0.942	0.99667
0.120	0.041	0.091	0.141	0.191	0.241	0.291	0.341	0.391	0.441	0.491	0.541	0.591	0.641	0.691	0.741	0.791	0.841	0.891	0.941	0.99652
0.125	0.040	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	0.99637
0.130	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	0.99622
0.135	0.038	0.088	0.138	0.188	0.238	0.288	0.338	0.388	0.438	0.488	0.538	0.588	0.638	0.688	0.738	0.788	0.838	0.888	0.938	0.99607
0.140	0.037	0.087	0.137	0.187	0.237	0.287	0.337	0.387	0.437	0.487	0.537	0.587	0.637	0.687	0.737	0.787	0.837	0.887	0.937	0.99592
0.145	0.036	0.086	0.136	0.186	0.236	0.286	0.336	0.386	0.436	0.486	0.536	0.586	0.636	0.686	0.736	0.786	0.836	0.886	0.936	0.99577
0.150	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	0.99562
0.155	0.034	0.084	0.134	0.184	0.234	0.284	0.334	0.384	0.434	0.484	0.534	0.584	0.634	0.684	0.734	0.784	0.834	0.884	0.934	0.99547
0.160	0.033	0.083	0.133	0.183	0.233	0.283	0.333	0.383	0.433	0.483	0.533	0.583	0.633	0.683	0.733	0.783	0.833	0.883	0.933	0.99532
0.165	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	0.782	0.832	0.882	0.932	0.99517
0.170	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	0.99502
0.175	0.030	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	0.99487
0.180	0.029	0.079	0.129	0.179	0.229	0.279	0.329	0.379	0.429	0.479	0.529	0.579	0.629	0.679	0.729	0.779	0.829	0.879	0.929	0.99472
0.185	0.028	0.078	0.128	0.178	0.228	0.278	0.328	0.378	0.428	0.478	0.528	0.578	0.628	0.678	0.728	0.778	0.828	0.878	0.928	0.99457
0.190	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	0.99442
0.195	0.026	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	0.99427
0.200	0.025	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325	0.375	0.425	0.475	0.525	0.575	0.625	0.675	0.725	0.775	0.825	0.875	0.925	0.99412
0.205	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	0.924	0.99397
0.210	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	0.823	0.873	0.923	0.99382
0.215	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	0.99367
0.220	0.021	0.071	0.121	0.171	0.221	0.271	0.321	0.371	0.421	0.471	0.521	0.571	0.621	0.671	0.721	0.771	0.821	0.871	0.921	0.99352
0.225	0.020	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	0.99337
0.230	0.019	0.069	0.119	0.169	0.219	0.269	0.319	0.369	0.419	0.469	0.519	0.569	0.619	0.669	0.719	0.769	0.819	0.869	0.919	0.99322
0.235	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	0.768	0.818	0.868	0.918	0.99307
0.240	0.017	0.067	0.117	0.167	0.217	0.267	0.317	0.367	0.417	0.467	0.517	0.567	0.617	0.667	0.717	0.767	0.817	0.867	0.917	0.99292
0.245	0.016	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	0.99277
0.250	0.015	0.065	0.115	0.165	0.215	0.265	0.315	0.365	0.415	0.465	0.515	0.565	0.615	0.665	0.715	0.765	0.815	0.865	0.915	0.99262
0.255	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	0.99247
0.260	0.013	0.063	0.113	0.163	0.213	0.263	0.313	0.363	0.413	0.463	0.513	0.563	0.613	0.663	0.713	0.763	0.813	0.863	0.913	0.99232
0.265	0.012	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	0.99217
0.270	0.011	0.061	0.111	0.161	0.211	0.261	0.311	0.361	0.411	0.461	0.511	0.561	0.611	0.661	0.711	0.761	0.811	0.861	0.911	0.99202
0.275	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					



Slika 7a.

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.7a.

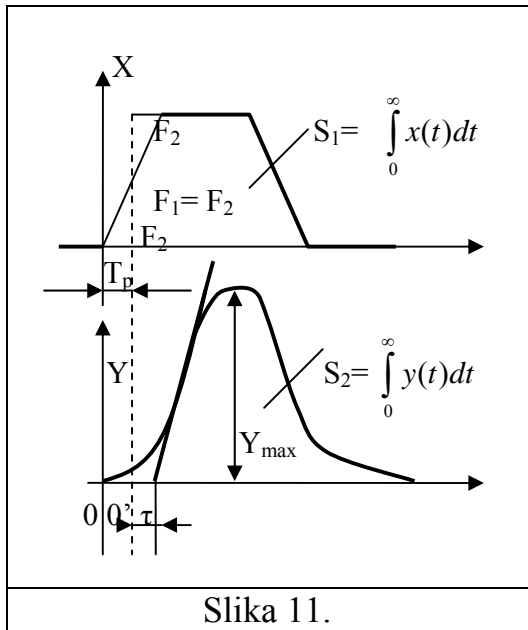
Na prvom dijagramu je prikazana ispitna funkcija kojom se pobuđuje izvršni organ. Drugi dijagram predstavlja realnu ispitnu funkciju koju na svome izlazu daje izvršni organ i koja pobuđuje objekat. Treći dijagram daje odziv objekta. Početak vremenske karakteristike se uzima u tački  $0'$  koja se dobije grafičkom konstrukcijom sa drugog dijagrama. Od tačke  $0'$  se računaju  $\tau$  i  $T$ .

Što se tiče proračuna uticaja dinamičkih parametara mjernog pretvarača na rezultate eksperimenta može se sa dosta sigurnosti konstatovati da u velikom broju slučajeva nije ni potrebno uzimati ga u obzir pošto su mjerni pretvarači za čitav red veličine brži po odzivu od izvršnih organa, te se njihov uticaj može zanemariti. Kod izuzetno brzih objekata (kakvi se na pr. susreću kod regulacije pritiska i protoka) to zanemarenje bi ipak moglo značajno uticati na tačnost rezultata identifikacije te se uticaj mjernog pretvarača ipak mora obračunati saglasno (10) ili (11) ili saglasno proceduri uz tablicu 2.

U slučaju da uslovi rada objekta na kojem 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.8. i svodi se na pronalaženje ordinate DB koja definiše novo stacionarno stanje odziva koje dalje omogućava određivanje  $k_{ob}$  i  $T_{ob}$ .







Slika 11.

Inače, impulsnu k-ku je moguće obraditi u cilju dobijanja  $\tau_{ob}$ ,  $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$  služeći se momentima impulsne k-ke. Na sl.10. pokazana je situacija kada se kao ispitni impuls upotrebljava trapezoidni impuls (što je realna situacija kod primjene izvršnih organa sa konstantnom brzinom prelaska dijapazona). Tada se  $\tau$  odredi grafički, saglasno postupku opisanom uz sl.7, a

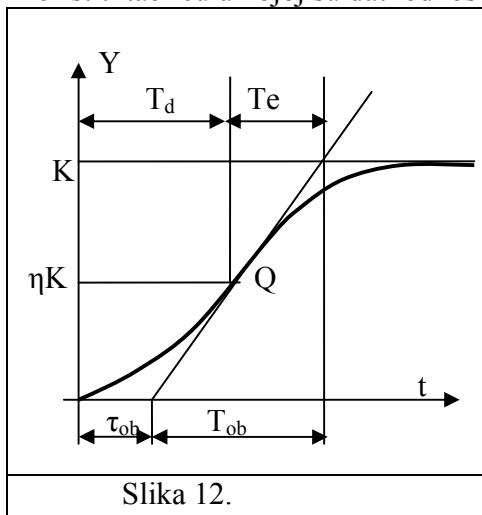
$$k_{ob} = \frac{S_2}{S_1} \quad (17)$$

$$T = \frac{S_2}{y_{max}} \quad (18)$$

Očito je, da za dobijanje S1 i S2 je potrebno grafički integritirati ispitnu funkciju i impulsnu karakteristiku.

### 1.2.5 Aproximacija bez uvođenja čistog 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 ( $\tau_{ob}$ ,  $k_{ob}$ ,  $T_{ob}$ ) dobiti prenosna funkcija u formi racionalnog polinoma n-tog reda, kao bolja aproksimacija i za lakšu dalju upotrebu, moguće je koristiti tablicu u kojoj su dati odnosi između veličina definisanih na sl.12.



Slika 12.

Pri tome je korišćena aproksimacija

$$W_{ob}(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)\dots(T_ns+1)} \approx \frac{k}{(Ts+1)} e^{-\tau_{ob}s} \quad (19)$$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau_{ob}/T_{ob}$	0	0.104	0.218	0.319	0.410	0.493	0.570	0.642	0.709	0.773
$\eta$	0	0.264	0.323	0.353	0.371	0.384	0.394	0.401	0.407	0.413
$T_e/T_{ob}$	1	0.736	0.677	0.647	0.269	0.616	0.606	0.599	0.593	0.587
$\tau_{ob}/T$	0	0.282	0.805	1.425	2.1	2.811	3.549	4.307	5.081	5.869
$T_{ob}/T$	1	2.718	3.695	4.463	5.119	5.694	6.226	6.711	7.164	7.59
$T_d/T$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_e/T$	1	2	2.5	2.888	3.219	3.51	3.775	4.018	4.245	4.458

### 1.3. METODA PROSTE I SLOŽENE HARMONIJSKE ISPITNE FUNKCIJE ( EKSPERIMENTALNO DOBIJANJE AMPLITUDNO-FAZNE KARAKTERISTIKE )

Uporedno 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.

Ako se na ulaz objekta dovede ispitna funkcija tipa

$$X = A \sin(\omega t + \phi_x) \quad (20)$$

gdje je  $A$  - amplituda ispitne funkcije  
 $\omega$  - frekvencija ispitne funkcije  
 $\phi_x$  - faza ispitne funkcije

tada će po isteku nekog vremena na izlazu objekta da se pojave stacionarne oscilacije izlazne veličine sa istom frekvencijom  $\omega$ , ali drugom amplitudom  $B$  i pomakom faze  $\phi_y$ .

$$y = B \sin(\omega t + \phi_y) \quad (21)$$

Jednačine (20) i (21) napisane u simboličkoj formi su

$$X = A e^{j(\omega t + \phi_x)} \quad (22)$$

odnosno

$$y = B e^{j(\omega t + \phi_y)} \quad (23)$$

Uzimajući odnos (23) i (22) dobije se

$$\frac{y}{x} = \frac{B}{A} e^{j(\phi_y - \phi_x)} \quad (24)$$

Ovo je kompleksna veličina čiji modul  $\frac{B}{A}$  mijenja svoju veličinu pri promjeni frekvencije  $\omega$ .

Zavisnost odnosa amplituda  $\frac{B}{A}$  sa frekvencijom

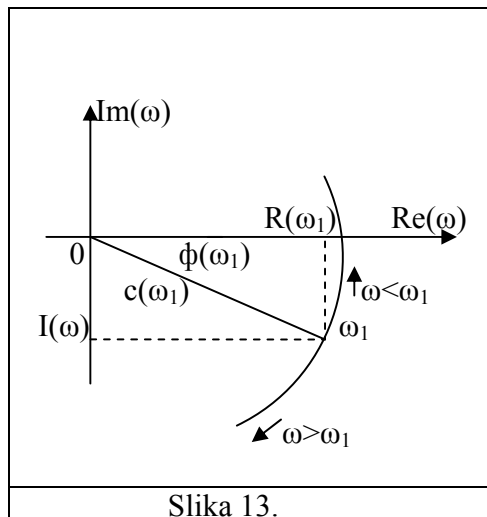
$$C(\omega) = \frac{B(\omega)}{A} \quad (25)$$

naziva se amplitudno-frekventnom karakteristikom, a razlika argumenata

$$\phi(\omega) = \phi_y - \phi_x$$

naziva se fazno-frekventnom karakteristikom sistema.





Slika 13.

Kompleksna funkcija frekvencije

$$W(j\omega) = C(\omega) e^{j\phi(\omega)} \quad (26)$$

naziva se amplitudno-faznom karakteristikom sistema. Na kompleksnoj Re Im ravni amplitudno-faznu karakteristiku opisuje vrh vektora  $Ce^{j\phi}$  pri promjeni frekvencije od 0 do beskonačnosti (sl.13), tj.ta karakteristika je hodograf vektora  $Ce^{j\phi}$ .

### 1.3.1 Tehnika sprovođenja eksperimenta

Opšta šema pokazana na sl.6. 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  $W_{IO}$ ,  $W_X$ ,  $W_{MX}$ ,  $W_{MY}$  koja su data u 1.2.2 vrijede i za ovaj slučaj, a jed. (11) je direktno primjenljiva.

Ovdje treba naglasiti da

1. eksperiment treba otpočeti pri stacionarnom stanju objekta,
2. eksperiment treba smatrati neuspjelim ako u njegovom toku nastupi bilo kakva smetnja u objektu, te ga ponoviti,
3. eksperiment treba otpočeti tačno na osi oscilacija ulaznog prostog ili složenog periodičnog signala jer može doći do pogrešnog mjerenja faznih odnosa,
4. eksperiment 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.

Kod pristupa eksperimentu prvi zahvat je određivanje za konkretni objekat interesantnog opsega frekvencija. Postupci sinteze upravljačke konture traže 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 II i I kvadrantu Re Im ravni nije od posebnog interesa.

Kao granična frekvencija u praksi uzima se

$$\omega_{gr} \approx (2-2.5) \omega_\pi \quad (27)$$

te u slučaju da je ipak potrebno poznavati dio karakteristike u II ili I kvadrantu koristi se opseg od  $\omega_\pi$  do  $\omega_{gr}$ .

Pod  $\omega_{gr}$  se podrazumjeva ona frekvencija kod koje izlazne oscilacije imaju zanemarljivo malu amplitudu bez obzira na povećanje amplitude ulaznog signala.

Da se dobije za praktične svrhe upotrebljiva amplitudno-fazna karakteristika dovoljno je odrediti 4 do 5 tačaka hodografa u oblasti od  $0.5 \omega_{\pi}$  do  $2.5 \omega_{\pi}$ . Za svaku tačku potrebno je snimiti dva do tri puna perioda stacionarnih oscilacija ulazne i izlazne veličine. Svaki eksperiment je korisno ponoviti dva do tri puta, te odbaciti ekstremno odstupajuće rezultate.

Amplituda  $A$  ulazne veličine treba biti

$$A \approx (5-15) \% \text{ efektivnog hoda izvršnog organa} \quad (28)$$

Kod sporih 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.

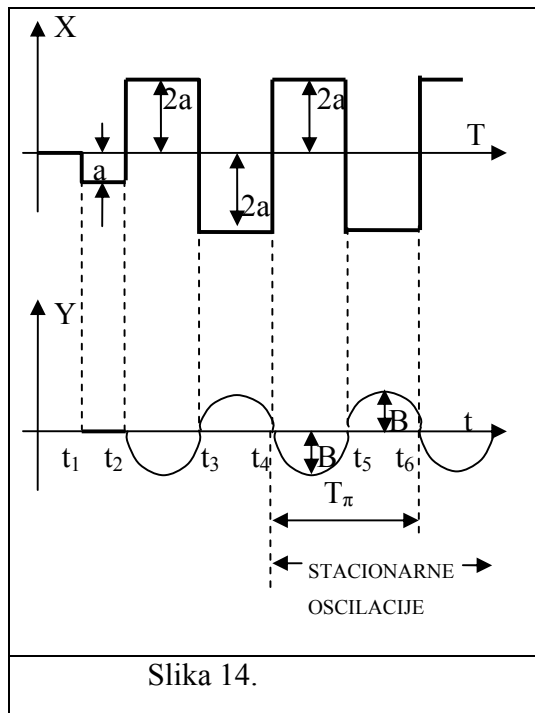
Amplituda ulaznog signala treba da bude odabrana na osnovu kompromisa koji traži amplitudu dovoljno veliku da se izlazni signal razlikuje od šumova uvijek prisutnih u objektu, ali ne preveliku kako bi oscilacije izlazne veličine ostale u granicama koje diktira tehnologija objekta. Očigledno je da pri višim frekvencijama naročito 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 14.

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. Eksperiment se produžava sve dok se ne postigne stacionaran oscilatorni proces i dok se ne registruju dva do tri perioda oscilovanja  $T_{\pi}$ , te slijedi

$$\omega_{\pi} = \frac{2\pi}{T_{\pi}} \text{ [rad / sec]} \quad (29)$$

Vidljivo je sa slike da su prvi harmonik ulaza  $x$  i prvi harmonik izlaza  $y$  pomjereni jedan prema drugome za  $\pi$ .



Za spore industrijske objekte (temperatura, vlažnost, nivo) specijalnu ulaznu funkciju za provođenje eksperimenta 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 tasterima za uključenje izvršnog organa u jednu ili drugu stranu je jedno komutiranje u dvije sekunde.

### 1.3.2 Obrada rezultata eksperimenta

Ako se eksperiment provodi prostim harmonijskim signalom jednačina (24) je direktno primjenljiva. Međutim, ako se radi sa pravouglim, trouglastim ili trapeznim signalom na ulazu, potrebno je izvršiti harmonijsko razlaganje tih složenih signala na proste harmonijske komponente, te na svaki harmonik primjeniti jed. (24) pojedinačno.

Važno je napomenuti da uslijed efekta konačne brzine izvršnog organa kojim se u objekat unosi ispitna funkcija, koordinata  $x$  može da ima trapeznu formu, iako je  $x_1$  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 3 bez posebnog detaljisanja.

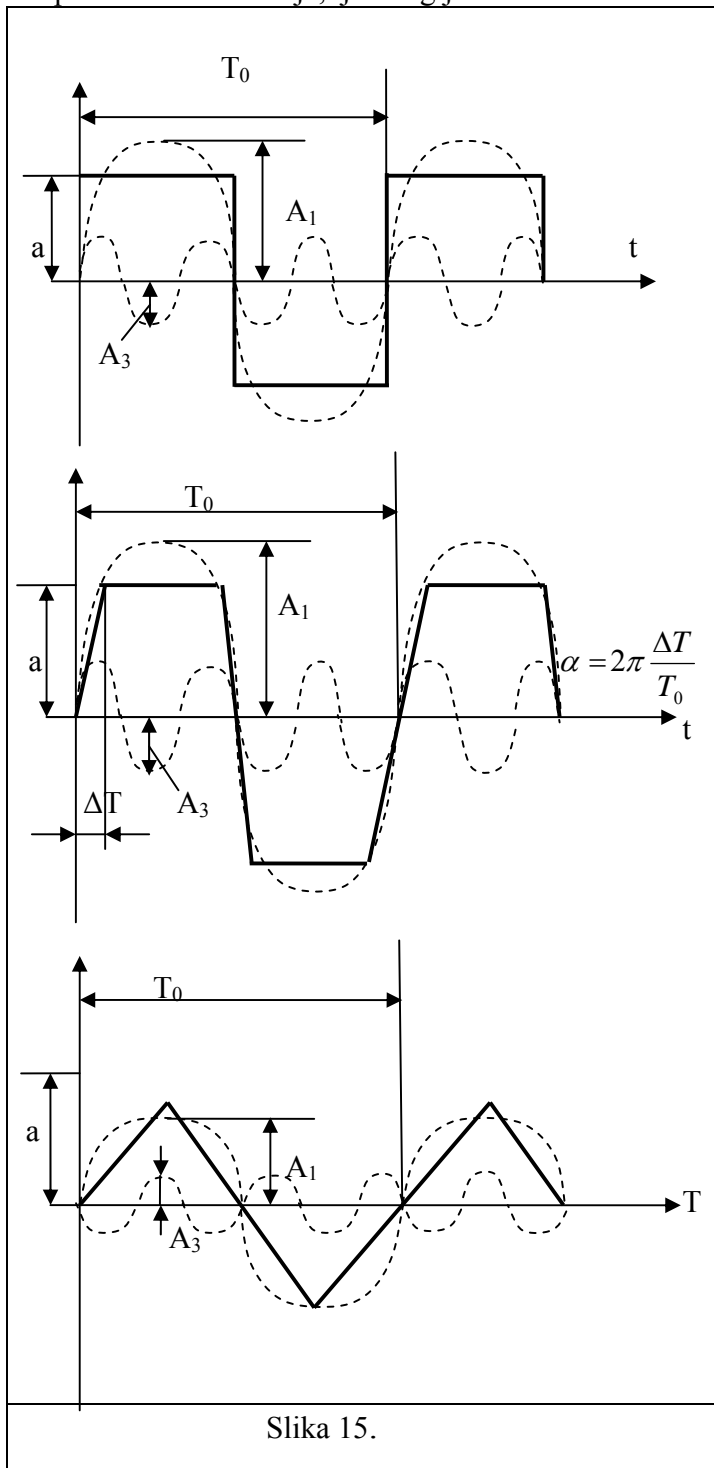
S obzirom da se radi o centralno simetričnim signalima razlaganje daje samo neparne harmonike. Veličine koje se pojavljuju u tabeli su definisane na sl.15.

Tabela 3.

TALASNI OBLIK	$A_1$	$A_3$	$A_5$
PRAVOUGLI	1,27 a	0,42 a	SUVIŠE MALA VELIČINA I PRAKTIČNO NEUPOTREBLJIVA
TROUGLI	0,8 a	-0,08 a	
TRAPEZNI	$\frac{4a}{\pi} \sin \alpha$	$\frac{4a}{9\pi} \sin 3\alpha$	

Prolaz oscilacija kroz dinamički sistem praćen je uvijek disipacijom energije i konverzijom jednog vida energije u drugi. Ti procesi su okarakterisani funkcijom  $W(j\omega)$ . Svojstva sistema ogledaju se u tome što energija različitih harmonika se različito disipuje.

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



Slika 15.

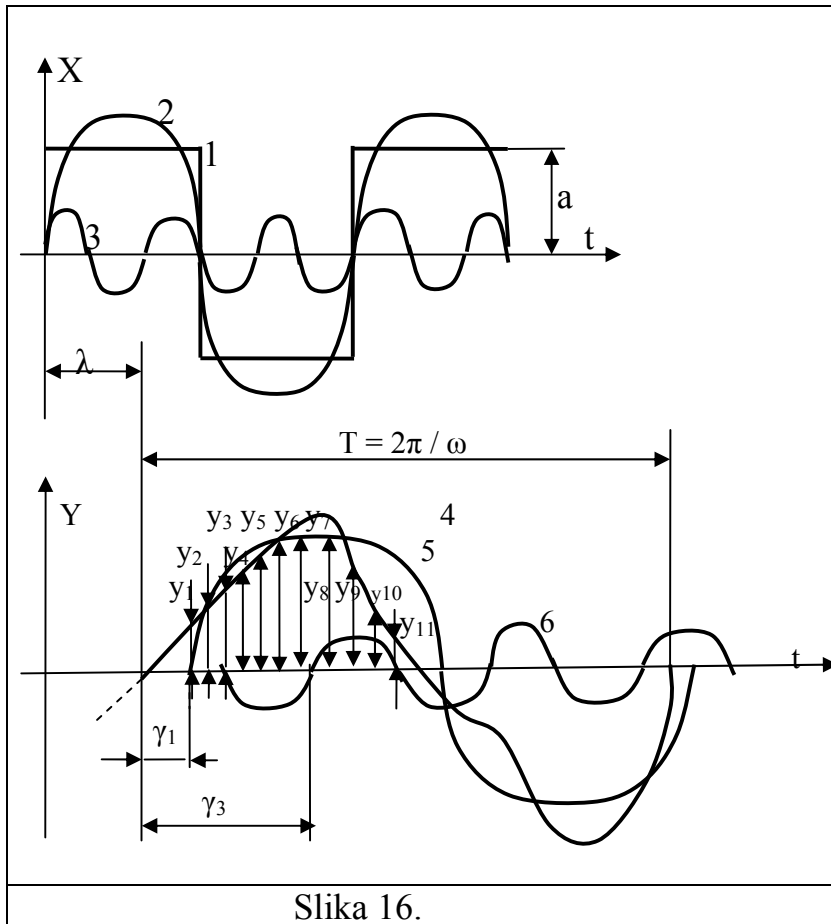
Spektralni sastav ulaznog signala i forma  $W(j\omega)$  su takvi da na srednjim i visokim frekvencijama pri pravouglom, a još izraženije pri trapeznom ulaznom signalu, oblik izlaznih oscilacija linearnih sistema sa dovoljnom tačnošću se podudara sa sinusoidom, što kao posljedicu daje nepotrebnost njihove harmonijske analize i razlaganje na komponente.

Krive promjene izlazne veličine pri snimanju frekventnih karakteristika obično su slične onima pokazanim na sl.16.b. (kriva 4).

Takva kriva se naziva kososimetričnom, 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 podaci toga eksperimenta se obično koriste za dobijanje jedne tačke amplitudno-fazne karakteristike i to na frekvenciji koja odgovara prvom harmoniku, tj.  $\omega$ .

Korišćenje 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 datog jed. (28) za treći harmonik), upotreba tih rezultata za dobijanje dvije tačke karakteristike jednim snimanjem se ne preporučuje, pogotovo ako postoji mogućnost izvođenja nezavisnog eksperimenta na frekvenciji  $3\omega$ .



Slika 16.

Analizu krive 4 sa sl.16. moguće je provesti Runge-Tompsonovim postupkom. U tu svrhu se polutalas analizirane krive razdijeli na  $2v$  dijelova 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

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

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

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

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

$$a_1 = \frac{d_1 \cos \frac{\pi}{2v} + d_2 \cos 2 \frac{\pi}{2v} + \dots + d_{v-1} \cos(v-1) \frac{\pi}{2v}}{v} \quad (32)$$

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

ili kraće

$$a_1 = \frac{\sum_{k=1}^{k=v-1} d_k \cos k \frac{\pi}{2v}}{v} \quad (33)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{k=1}^{k=v} s_k \sin k \frac{\pi}{2v}}{v} \quad (34)$$

Prvi harmonik se može napisati u formi

$$a_1 \cos t + b_1 \sin t = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} (\sin \gamma \cos t + \cos \gamma \sin t) = B_1 \sin(t + \gamma_1) \quad (35)$$

gdje je amplituda prvog harmonika

$$B_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (36)$$

a pomak faze prvog harmonika u odnosu na analiziranu krivu

$$\gamma_1 = \text{arc tg } \frac{a_1}{b_1} \quad (37)$$

Za treći harmonik

$$a_3 = \frac{\sum_{k=1}^{k=v-1} d_k \cos k \frac{3\pi}{2\pi}}{v} \quad (38)$$

$$b_3 = \frac{\sum_{k=1}^{k=v} s_k \sin k \frac{3\pi}{2\pi}}{v} \quad (39)$$

te je amplituda trećeg harmonika i pomak faze u odnosu na analiziranu krivu

$$B_1 = \sqrt{a_3^2 + a_3^2} \quad (40)$$

$$\gamma_3 = \text{arc tg } \frac{a_3}{b_3} \quad (41)$$

Nakon provođenja razlaganja ulaznog signala prema tabeli 3 i iz izlaznog signala prema jed. (30) do (41), moguće je dobiti polarne koordinate tačke  $W(j\omega_k)$  kao

$$|W(j\omega_k)| = \frac{B_1(\omega_k)}{A_1(\omega_k)} \quad (42)$$

$$\Phi(\omega_k) = \gamma_1(\omega_k) + \lambda(\omega_k) \quad (43)$$

gdje je  $\lambda$  fazni pomak kososimetrične krive izlazne veličine u odnosu na ulaznu funkciju.

### 1.3.3 Približna međusobna veza dinamičkih karakteristika dobijenih 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

$$W_I(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob} s + 1} \quad (44)$$

$$W_\tau(s) = e^{-\tau_{ob}s} \quad (45)$$

slijedi

$$W_{\text{aprox}}(j\omega) = W_I(j\omega)W_\tau(j\omega) \quad (46)$$

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

$$\omega_i = \frac{tg \phi_{li}}{T_{ob}} \quad [rad / sec] \quad (47)$$

Time je karakteristika  $W_I(j\omega)$  potpuno određena.

Amplitudno-fazna karakteristika bloka čistog kašnjenja  $W_\tau(j\omega)$  je krug sa jediničnim radijusom sa centrom u ishodištu kompleksne ravni.

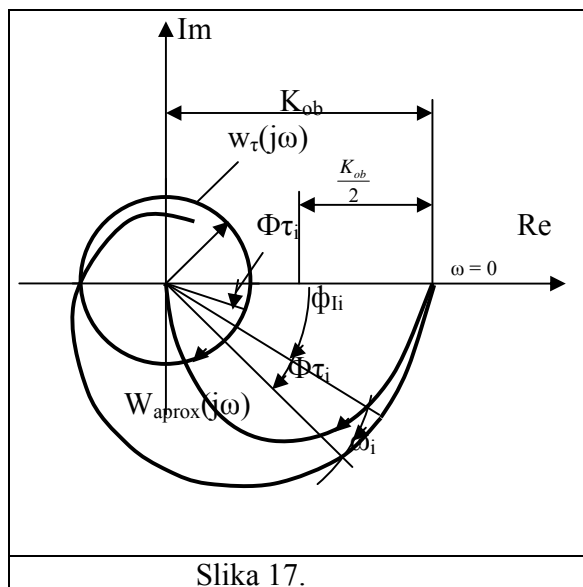
Frekvencije na tom hodografu se odrede kao

$$\omega_i = \frac{\phi_{ti}}{57\tau_{ob}} \quad [rad / sec] \quad (48)$$

gdje je  $\phi_{ti}$  sa dimenzijom [lučni stepeni].

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.17:



Slika 17.

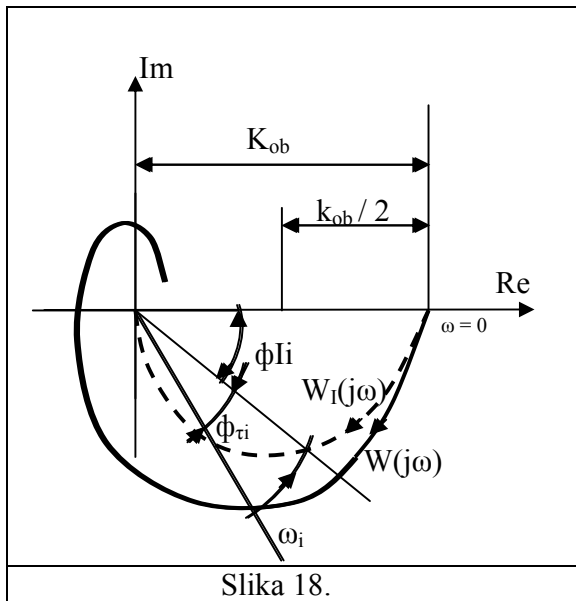
Uglu  $\phi_{li}$  doda se ugao  $\phi_{ti}$ , povuče se prava iz koordinatnog početka Re Im ravni pod tim uglom i tačka sa frekvencijom  $\omega_i$  se prenese lukom sa centrom u koordinatnom početku Re Im ravni sa  $W_I(j\omega)$  na presjek luka i prave. Time se dobije jedna tačka hodografa  $W_{aprox}(j\omega)$  za frekvenciju  $\omega_i$ . Za sve sljedeće tačke postupak je identičan.

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  $W_I(j\omega)$  i čiji centar se nalazi na pozitivnoj Re osi na

$$\frac{k_{ob}}{2}.$$



Slika 18.

$K_{ob}$  je direktno moguće očitati pošto je tačka  $\omega = 0$  zajednička za  $W(j\omega)$  i  $W_I(j\omega)$ . Uglovi  $\phi_{ri}$  i  $\phi_{li}$  se direktno sa te konstrukcije mogu dobiti, te se primjene na jednačine

$$\tau = \frac{\phi_{ri}}{\omega_i 57} \quad [sek] \quad (49)$$

$$T = \frac{tg \phi_{li}}{\omega_i} \quad [sek] \quad (50)$$

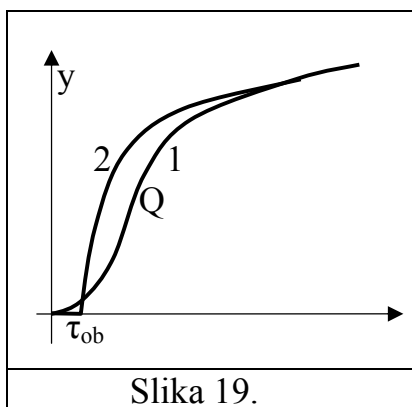
Jed. (49) i (50) predstavljaju iste jednačine kao i (47) i (48), samo sa drugim veličinama izraženim eksplicitno.

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

### 1.3.4 Opravdanost aproksimacije objekta visokog reda objektom prvog reda sa čistim kašnjenjem

Pošto se aproksimacija data jed. (19) 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.

Obje krive imaju veoma približan tok, ali i dvije značajnije razlike.



Slika 19.

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.

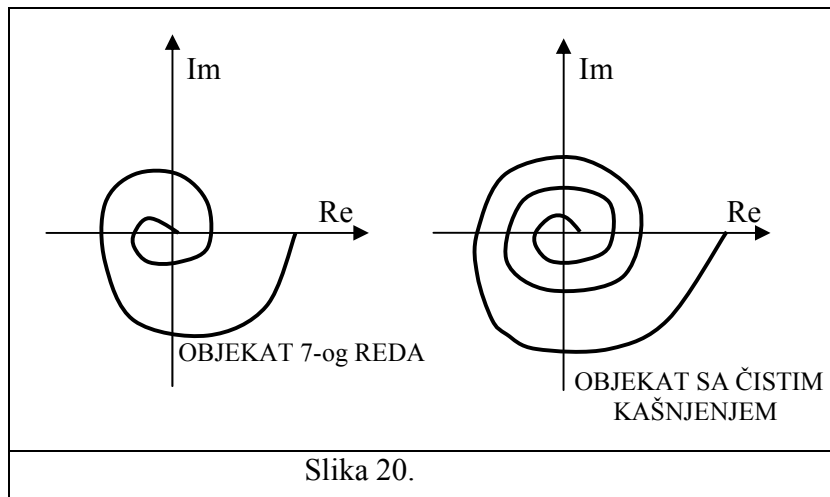
Objekat sa prenosnim kašnjenjem ima reakciju i u vrijeme dok se proračunski ta reakcija ne uzima u obzir, te svaka sinteza sistema automatskog upravljanja (ili podešenje regulatora) će dati bolje rezultate u stvarnosti nego što su proračunski.

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 I-vom i II-gom 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.



Slika 20.

#### 1.4 METODA PASIVNOG EKSPERIMENTA

U nekim slučajevima pri ispitivanju dinamičkih karakteristika nema mogućnosti da se ispitivani objekt 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.

Posljednih godina su razvijene metode pasivnog eksperimenta koje omogućavaju određivanje dinamičkih karakteristika objekta bez uvođenja ispitne funkcije u toku normalnog rada objekta. Ove metode su zasnovane na teoriji slučajnih procesa. Nedostatak metoda pasivnog eksperimenta je u velikom obimu polaznih informacija, a takođe i teška, dugotrajna obrada podataka. Zato se praktična obrada ovih informacija može provesti samo automatizacijom obrade, koja se sastoji u korištenju univerzalnih ili specijalnih računskih mašina. Često se radi o kombinovanoj primjeni. Specijalna računaska mašina prima informaciju direktno sa mjernih pretvarača sa objekta i obrađuje informacije sinhrono sa njihovim dolaskom od objekta. Ova mašina obično ne završava obradu, nego daje informaciju u kondenzovanom vidu - u vidu korelacionih funkcija, spektralnih funkcija i sl. Ostali dio obrade – određivanje dinamičkih karakteristika na osnovu korelacionih funkcija ili spektralnih funkcija – rješava se na univerzalnoj računskoj mašini.

##### 1.4.1 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 poprima jedne te iste vrijednosti
- pri svakom eksperimentu ispitivana veličina poprima 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 na pr., 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.

## 1.4.2 Autokorelaciona i kroskorelaciona funkcija

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

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (51)$$

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 (51) 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

$$R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2(t) dt \quad (52)$$

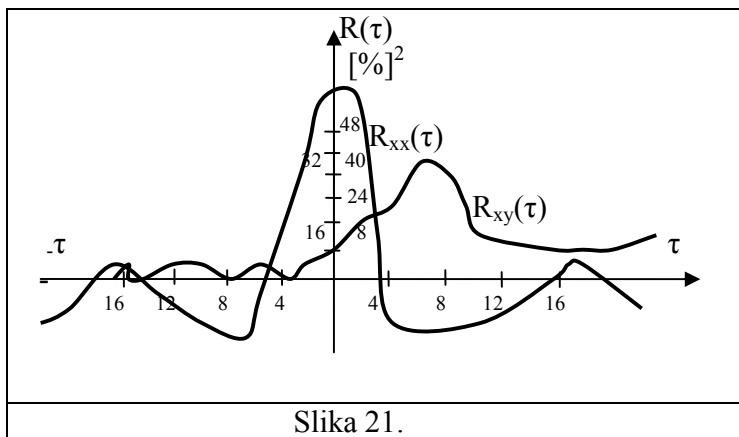
Funkcija  $R_{xx}(\tau)$  je parna funkcija.  
Kroskorelaciona funkcija je po definiciji

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (53)$$

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  $R_{xx}(0)$ .

$$R_{xx}^n(\tau) = \frac{R_{xx}(\tau)}{R_{xx}(0)} \quad (54)$$

odakle slijedi da je  $R_{xx}^n(0) = 1$

### 1.4.3 Računanje korelacionih funkcija

Jed. (51) i (53) 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

$$T \gg T_{nn} \quad (55)$$

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 aquisition). 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

$$R_{xx}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (56)$$

$$R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (57)$$

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. (56) i (57) postaju

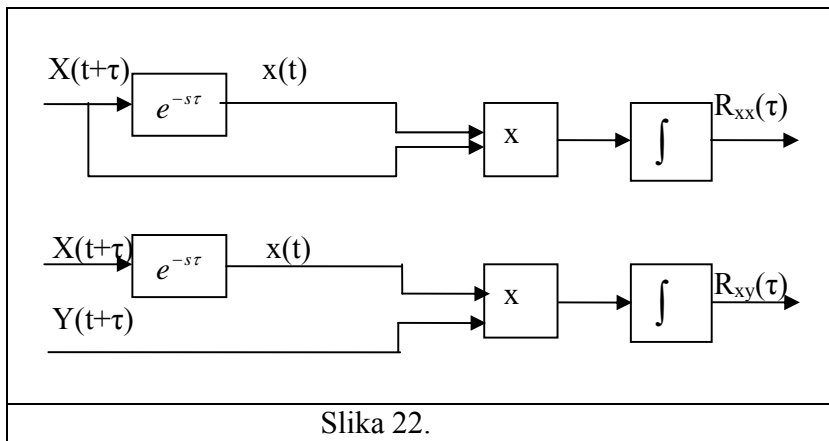
$$R_{xx}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (58)$$

$$R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (59)$$

ali je potrebno održati uslov

$$\begin{aligned} & \tau_{\max} \ll T \\ \text{obično} & \\ & 10\tau_{\max} \leq T \end{aligned} \quad (60)$$

Na sl.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.



Slika 22.

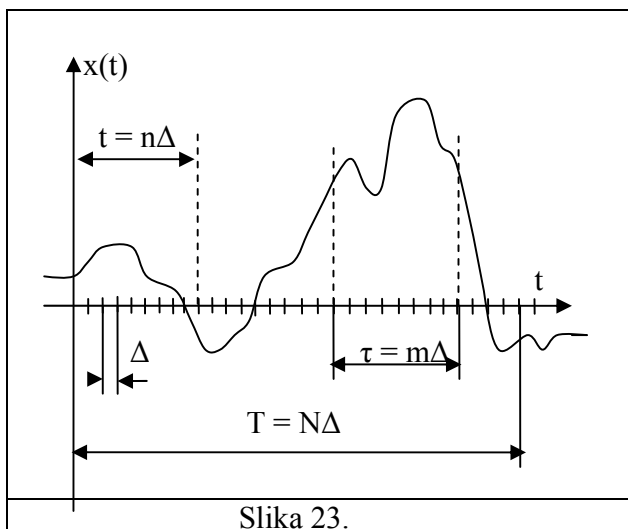
Ako se računanje korelacionih funkcija želi izvesti ručno ili pomoću digitalnog računara postupak je identičan. Polazna informacija se predstavi u vidu tablice diskretnih vrijednosti slučajnog procesa  $x_i$  uzetih na jednakim intervalima vremena  $\Delta$ .

Veličina intervala  $\Delta$  se bira tako da na jednom intervalu među dvjema susjednim ordinatama slučajni proces bude što bliži pravoj liniji, sl.23.

Uzimajući dovoljno veliki interval  $T$ , razdjeli 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 izrazi (58) i (59) prelaze u

$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(m\Delta) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x(n\Delta) \cdot x[(n+m)\Delta] \quad (61)$$

$$R_{xy}(\tau) = R_{xy}(m\Delta) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x(n\Delta) \cdot y[(n+m)\Delta] \quad (62)$$



Slika 23.

Na tačnost računa utiču sljedeći faktori:

1. Tačnost polaznih informacija, tj. tačnost s kojom u računu korišteni 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 potrebni interval za punu rekonstrukciju signala jednak

$$\Delta = \frac{\pi}{\omega_c} \quad (63)$$

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.

$$\text{Preporučuje se poluempirijski kriterijum} \quad T \geq \frac{50}{\omega_n} \quad (64)$$

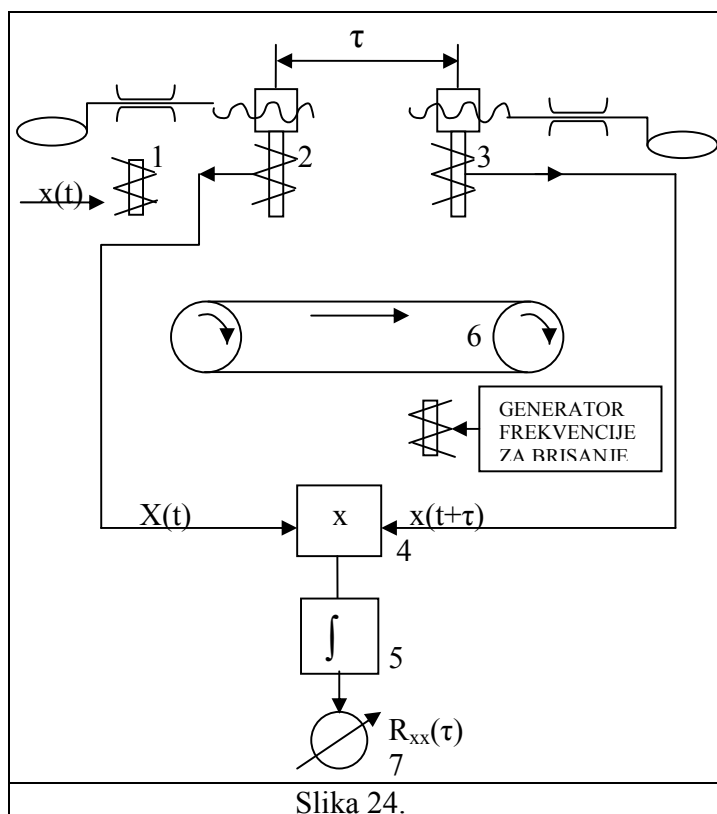
gdje je  $\omega_n$  frekvencija najnižeg frekventnog harmonika slučajnog procesa.

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. (60).

Računanje korelacionih funkcija se može prepustiti i automatskim, specijaliziranim računskim mašinama – korelatorima.

Principijelna šema jednog korelatora data je na sl.24.

Slučajna funkcija  $x(t)$  se registruje na magnetnoj traci 6 pomoću glave za zapis 1. Posredstvom glava za čitanje 2 i 3 dobiju se funkcije  $x(t)$  i  $x(t+\tau)$  koje se množe na množaču 4, a rezultat se integrira i očitava na indikatoru 7. Vrijeme  $\tau$  se zadaje položajem glava 2 i 3.



Slika 24.

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

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (65)$$

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (66)$$

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

$$W(j\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (67)$$

što predstavlja i posljednji korak u pasivnom metodu identifikacije dinamičkih sistema.

Mogući su i drugi postupci za korištenje korelacionih funkcija u svrhe identifikacije, a put prikazan jed. (65) do (67) je samo primjer jednog od tih postupaka.

### 1.5. 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 derivativnim 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 dobivenih 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.

Ovaj eksperiment se može ponoviti na nekoliko zadanih vrijednosti regulatora kako bi se uočila egzistencija mogućih nelinearnosti. Ako su rezultati jednaki na svim radnim tačkama, objekat je linearan.

## 1.6. 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 ometanu 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 nespemnosti 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 iskorištena. 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 brзом 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. Iznenadjuće 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“.

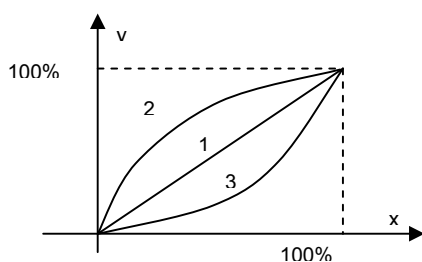
Nakon ovog izlaganja autor preporučuje metodu identifikacije opisanu u 1.5.

## 1.7. IDENTIFIKACIJA STATIČKIH KARAKTERISTIKA

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 pristupiti dinamičkoj identifikaciji te nakon dobijanja rezultata prelaskom na  $t \rightarrow \infty$  odbaciti ogroman broj informacija sadržanih u dinamičkim karakteristikama ta iskoristiti samo mali 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.

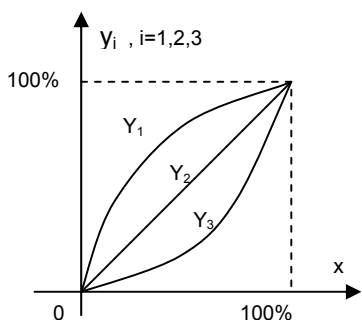
Funkcijska zavisnost između ulazne i izlazne veličine objekta u stacionarnom stanju ili statička karakteristika može se snimiti najjednostavnije kod objekata sa jednom ulaznom i jednom izlaznom veličinom. U tom slučaju se dobija karakteristika koja može biti linearna ili nelinearna kako je prikazano na slici 25., gdje je 1 linearna, 2 nelinearna konkavna i 3 nelinearna konveksna karakteristika. Nagib tangente u bilo kojoj tački karakteristike definiše pojačanje objekta u toj radnoj tački

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = k_{ob} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (68)$$

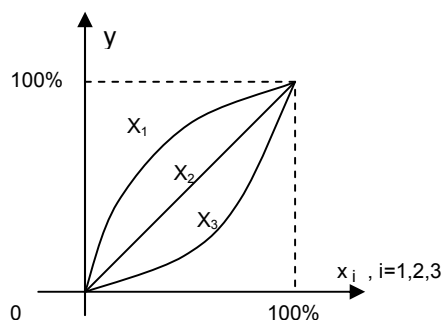


Slika 25.

Očigledno je da se linearna statička karakteristika odlikuje svojstvom  $k_{ob} = \text{const}$  za  $0 < y < 100\%$  opsega. U slučaju da jedna ulazna veličina djeluje na nekoliko izlaznih veličina tada objekat opisujemo familijom statičkih karakteristika slika 26. kao i u slučaju da nekoliko ulaznih veličina djeluje na izlaznu veličinu sl. 27.



Slika 26.



Slika 27.

### 1.7.1. SNIMANJE STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Za slučaj jedna ulazna jedna izlazna veličina snimanje statičkih karakteristika je veoma jednostavno. Ulazna veličina  $x$  se mijenja u skokovima  $\Delta x$  unutar punog opsega, pa se nakon smirenja prelaznog procesa izvrše očitavanja izlazne veličine.

Pri tome se procedura može i automatizovati. Kao ulazna funkcija se upotrebi nagibna funkcija koja se istovremeno vodi na  $x$  ulaz a izlazna veličina  $z$  na  $z$  ulaz pisača. Pri tome je važno pogodno izabrati brzinu promjene nagibne funkcije, jer prebrza promjena može unijeti, usled dinamike ispitivanog objekta, prividnu nelinearnost. Često se umjesto nagibne funkcije upotrebljava trougaoni talas. Ako je frekvencija trougaonog talasa previsoka, prividna nelinearnost se manifestuje kao histerezis.

Ali ako je objekat sa čistim kašnjenjem, ova automatizacija mjerenja nije provodljiva, te se snimanje mora sprovesti tačku po tačku sa obaveznim čekanjem smirenja prelaznog procesa.

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

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (69)$$

pri čemu je funkcija  $f$  nelinearna.

Osnovi identifikacije u ovom slučaju je metod Box – Wilsona. Ovaj metod omogućava pomoću specijalnog eksperimenta određivanje jednačine hiperravni ili hiperpovršine drugog reda koja približno opisuje stvarno postojeću zavisnost (69) u okolini nekog skupa argumenata  $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}$ ; koji se naziva baznom tačkom.

### 1.8. 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 minijturni 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 osobnosti, 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 provođenju 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 korenspodencija 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. Itračunavanje 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