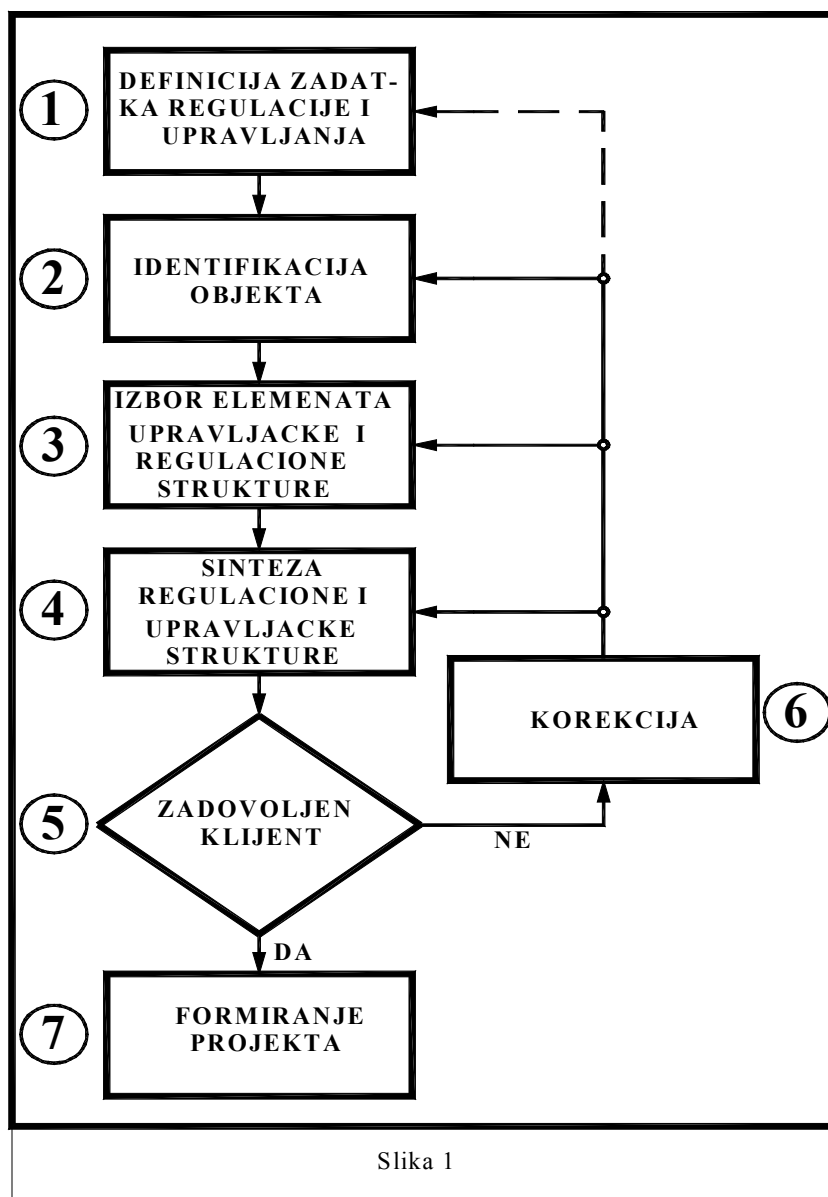


U V O D

Projektovanje sistema automatskog upravljanja i regulacije (SAUR) tehnološkog procesa je uvijek samo dio djelatnosti koju obuhvata projektovanje upravljanog i reguliranog tehnološkog procesa (objekta). Zbog toga polazne informacije na osnovu kojih se otpočinje projektovanje SAUR dolaze kao tehnički zadatak kojim projektant objekta kojim se želi upravljati definira projektima SAUR zadatak upravljanja i regulacije.



Slika 1

Prirodan redoslijed glavnih faza izrade projekta SAUR prikazan je na sl. 1.

Na osnovu definiranog zadatka regulacije i upravljanja (1), projektant tehnološkog objekta i projektant SAUR (veoma često samo ovaj posljednji) pristupaju identifikaciji objekta (2). Dalje faze (3) do (7) su unutar isključive djelatnosti projektanta SAUR, sa napomenom da u rjeđe susretnom slučaju uvođenja korekcije na definiciju zadatka regulacije i upravljanja učestvuje i projektant tehnološkog objekta.

Ako nije u pitanu automatizacija novog nego postojećeg objekta, onda se umjesto projektanta objekta pojavljuje tehnolog, korisnik objekta. Shema sa sl. 1. je ujedno i shema organizacije materijala u ovoj knjizi čiji je cilj da studente uvede u tehniku projektovanja sistema automatskog upravljanja i regulacije tehnoloških procesa.

Neophodan uslov da bi materijal ovdje izložen mogao biti sa lakoćom usvojen je poznavanje metoda analize i sinteze SAUR, tj. poznavanje materije teorije signala, teorije automatskog upravljanja, identifikacije dinamičkih sistema, fizičko-tehničkih mjerenja, analognih i hibridnih računara, digitalnih računara, tehničkih sredstava procesne automatike i dinamike fluida.

U glavi I dat je pregled metoda eksperimentalne identifikacije objekata, sa detaljnijim osvrtom na metode koje se češće susreću u inženjerskoj praksi.

Glava II je posvećena tehničkim uvjetima kojima se definira kvalitet regulacije i korespondencije među tehničkim uvjetima izraženim u vremenskom domenu i domenu sinteze regulacione konture. Glava III razmatra kriterijume optimalnog prilagođenja regulatora objektu. Sintaza regulacionog kruga sa linearnim i nelinearnim regulatorima, uz detaljno razmatranje izbora regulatora, informacionog i izvršnog organa obrađena je u glavi IV. Složene konture, a posebno detaljno kaskadna regulacija po smetnji, razmatraju se u glavi V, a standardne procesne konture su date u VI glavi.

Principi formalnog projektovanja u glavi VII treba da omoguće lakše uvođenje studenta u projektantsku praksu. Glava VIII uvodi studenta u jednu danas veoma aktuelnu oblast - upravljanje prelaznim stanjima objekta.

Glava I

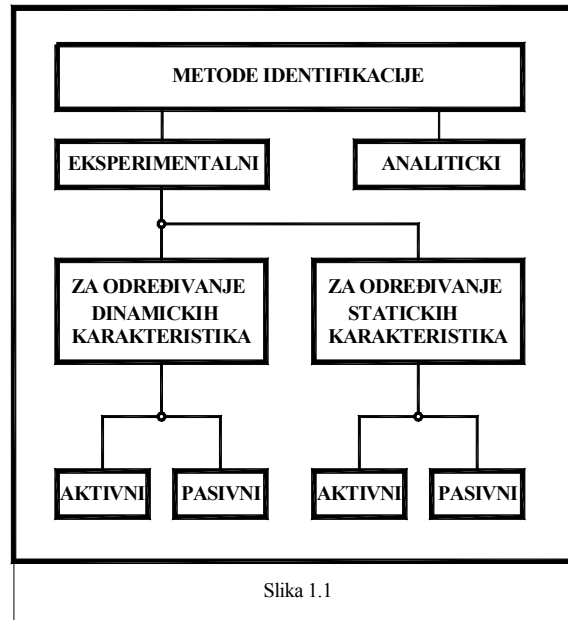
EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA OBJEKTA

1.1. UVOD

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

Na sl. 1.1. je pokazana uproštena klasifikacija postojećih metoda koje se koriste u svrhe identifikacije.

Točan matematički model karakterizira dinamiku procesa, kao i njegovu statiku, tj. daje punu informaciju o procesu. Često je dobivanje točnog modela za složene procese veoma teško, a rezultati se dobivaju u glomaznoj i za praktičke svrhe teško iskoristivoj formi. Zato se kao nužnost nameće uvođenje aproksimacije, koja se sastoji u tome da se objekt 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 od toga da li je za dobivanje modela potrebno eksperimentirati sa postojećim objektom ili ga matematički opisati, dijele se na eksperimentalne i analitičke.

Ovdje će biti razmatrane eksperimentalne metode. Analitičke metode, zasnovane na izučavanju fizičkih i kemijskih procesa koji teku u objektu, u stvari odražavaju nivo znanstvenih spoznaja u odgovarajućim oblastima i omogućavaju dobivanje modela koji kvalitativno i kvantitativno opisuje pojave koje se dešavaju u objektu [9], [15].

Veoma često kvantitativni atributi modela traže eksperimentalnu provjeru. Tako se do

najtačnijeg modela dolazi kombiniranim analitičko–eksperimentalnim metodama.

Eksperimentalne metode određivanja dinamičkih i statičkih karakteristika mogu se podijeliti na aktivne i pasivne. Korištenje 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 dobivaju promatranjem objekta u njegovoj normalnoj eksploataciji. Nikakva specijalna djelovanja na objekat pri tome nisu potrebna.

Pri provedbi 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 točnost uveliko ovisi i od točnosti ponavljanja ispitne smetnje. Točno manuelno ponavljanje je često teško ostvariti, te da se ne bi dobilo rasipanje rezultata zbog nejednakih ispitnih smetnji, najpouzdanija je uporaba specijalnih generatora ispitnih signala standardnih formi.

Na sl. 1.2. pokazane su neke od najčešće korištenih formi ispitnih signala.

Ako se registracija reakcije ispitivanog objekta na ispitnu smetnju ostvaruje automatskim pisačem, koriste se jednokratne ispitne funkcije.

Pri ispitivanju visokofrekventnih objekata, kada se registracija realizira 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 periodički signal koji se ne prekida sve dok objekat ne dođe u stanje stacionarnih oscilacija. U ovim slučajevima se koriste impulsne serije i simetrični signali.

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

Pri ispitivanju statičkih karakteristika aktivnim metodama točnost dobivenih podataka također u mnogome ovisi od toga koliko točno su zadane ulazne veličine. Pri sistematičkim 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, registrira stanje svih mjernih organa i prelazi na sljedeći režim rada.

Osim eksperimentalnih i analitičkih metoda, očividno je da široke mogućnosti daju kombinarne analitičko–eksperimentalne metode. Obično primjena čistih analitičkih ili pasivnih eksperimentalnih metoda dovodi do modela koji u općim crtama pravilno odražavaju proces u objektu, ali bez potrebne kvantitativne točnosti. Tada se pomoću aktivnih metoda pristupa povećanju točnosti brojevanih iznosa koeficijenata modela dobivenog analitičkim ili pasivnim eksperimentalnim putem.

U ovoj glavi biće opisana eksperimentalna identifikacija objekta metodama [1] koje se najčešće susreću, i to:

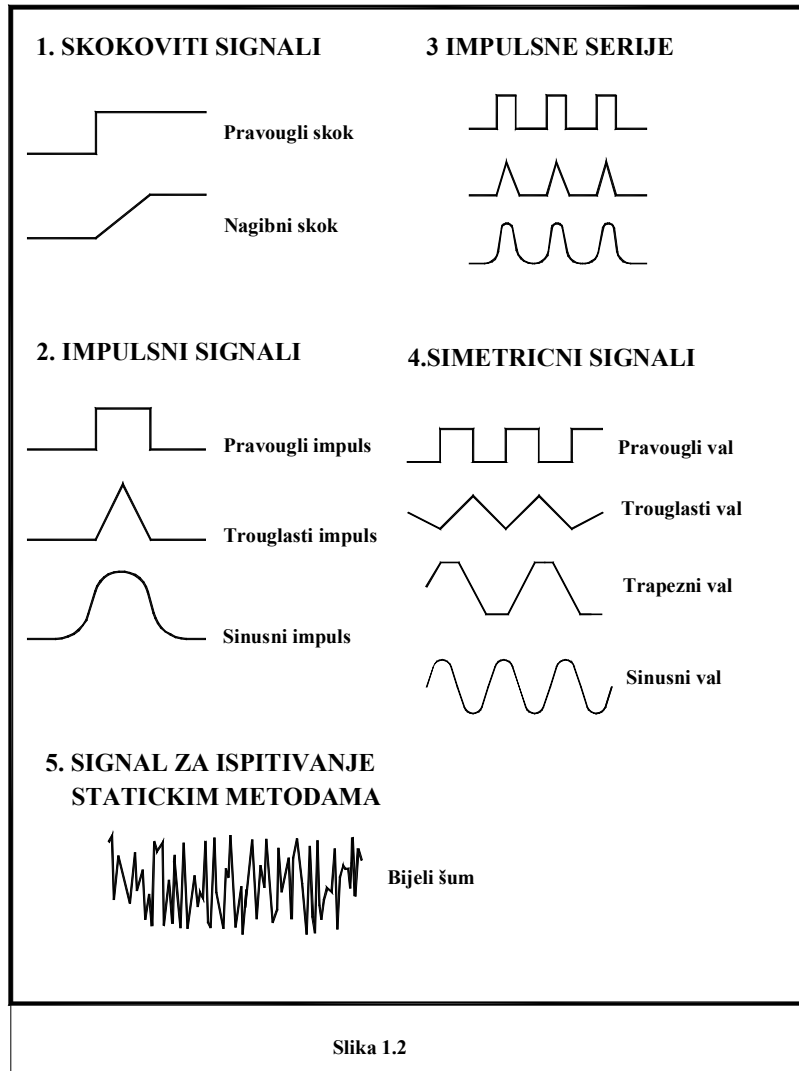
- aktivne metode
 - metoda skokovite pravougule funkcije
 - metoda impulske pravougule funkcije
 - metoda sinusnog i pravougllog vala

- metoda planiranog eksperimenta za određivanje statičkih karakteristika
- metoda identifikacije objekta u konturi sa regulatorom

pasivna metoda

- metoda spektralne funkcije.

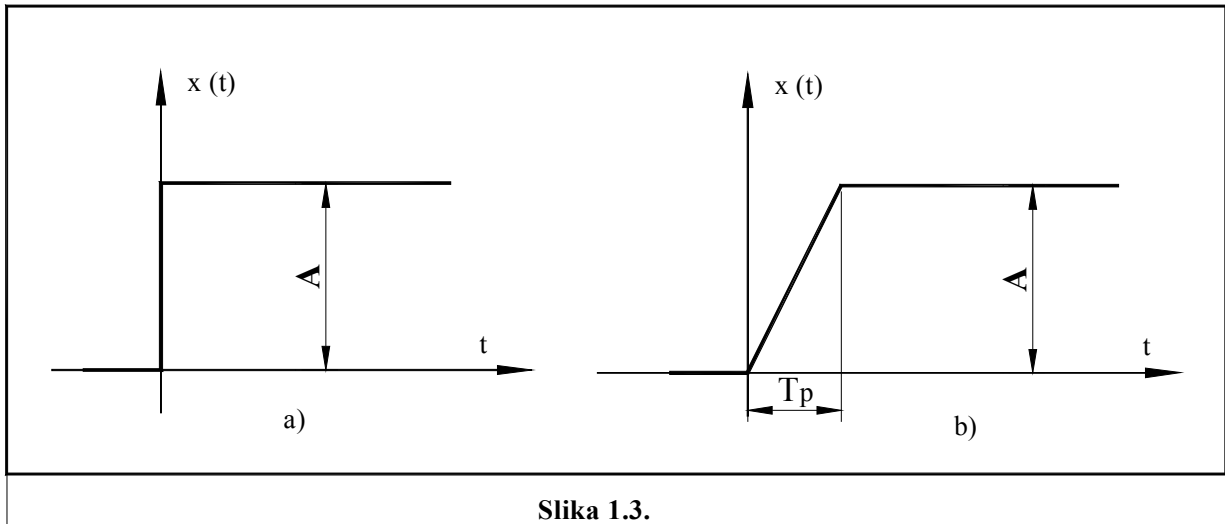
Također će biti opisani osnovni pojmovi metode fizičkog modeliranja.



1.2. METODA SKOKOVITE FUNKCIJE

1.2.1. Ispitno djelovanje i odziv objekta

Najrasprostranjenija forma ispitnog djelovanja na objekat je skokovita funkcija prikazana na sl. 1.3. Skokovita ispitna funkcija se definira kao trenutna promjena ulazne veličine ispitivanog objekta (skokovita pravouglava 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 uvjetu da se u momentu uvođenja ispitnog djelovanja objekat nalazio u stanju mirovanja.

Bez obzira na raznolikosti dinamičkih svojstava tehnoloških procesa koji se podvrgavaju reguliranju, može se ukazati na činjenicu da su im vremenske karakteristike obično monotone funkcije¹ vremena tipa prikazanog na sl. 1.4.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 samoizravnavanja ili astatiski objekti.

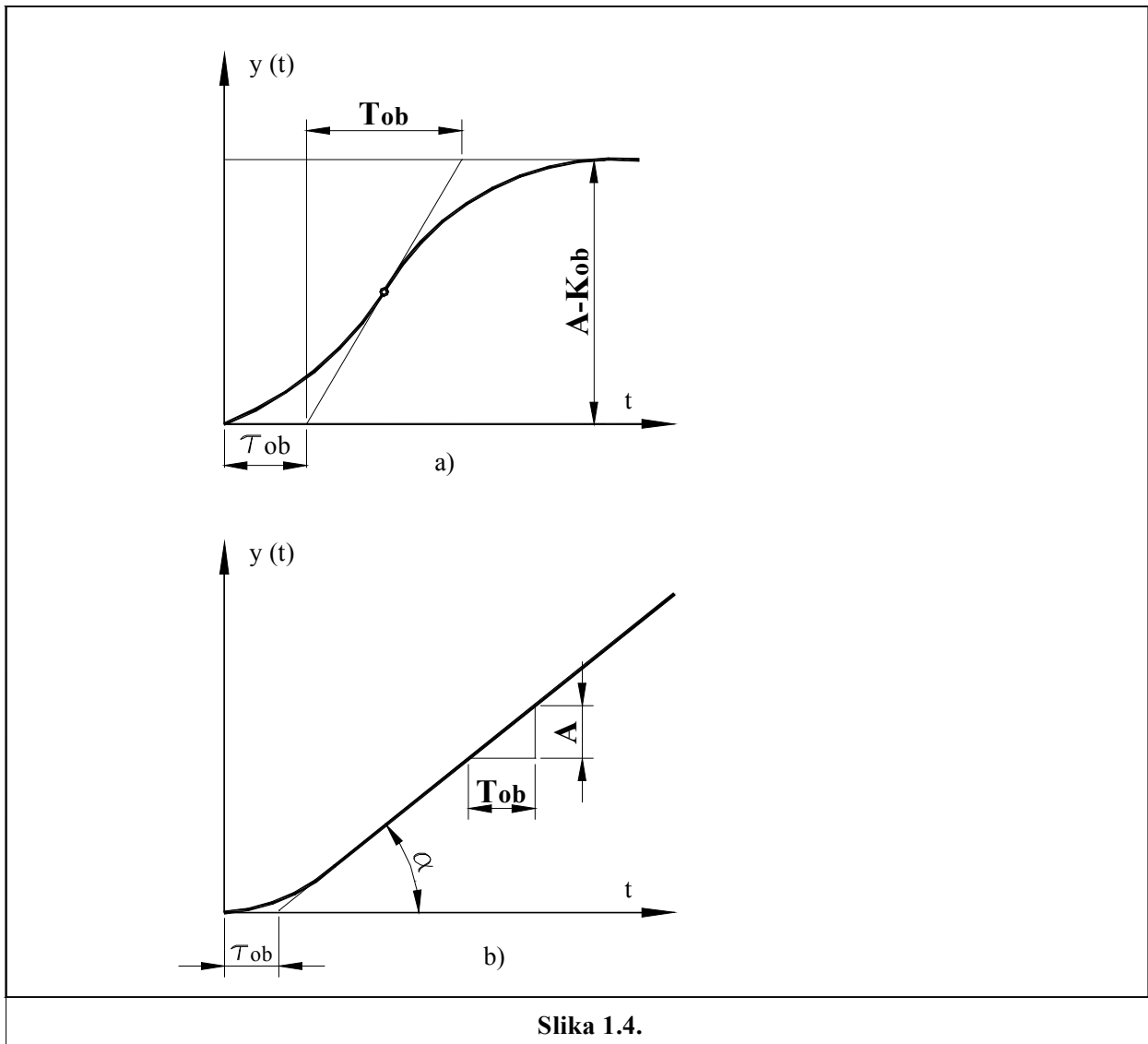
U početnom dijelu vremenske karakteristike zapaža se više ili manje izraženo kašnjenje. Kod tehnoloških procesa kašnjenje se uglavnom objašnjava ili transportnim efektom ili postojanjem u objektu nekoliko kapaciteta odvojenih jedan od drugoga u kojima se akumulira energija ili materijal, a takođe i postojanjem raspodijeljenih kapaciteta. Moguća je kombinacija transportnog i kapacitivnog kašnjenja.

Analiza oznaka sa sl. 1.4.a pokazuje da tangenta u točki infleksije odziva u presjeku sa starim i novim stacionarnim stanjem definira dva parametra odziva, i to τ_{ob} i T_{ob} . Treba napomenuti da se početak odziva računa od momenta skoka ispitnog djelovanja na ulazu u objekat. Prema tome:

- τ_{ob} je interval vremena određen momentom skoka ispitne funkcije i presjekom tangente povučene u točki infleksije sa starim stacionarnim stanjem odziva
- T_{ob} je interval vremena određen presjecima tangente povučene u točki infleksije sa starim i novim stacionarnim stanjem.

Da li je $Y(\infty)$ u izrazu 1.1 i dalje $y(\infty)$? Božo M.

¹Uz pretpostavku da se posmatranje ograniči na procese koji su klasificirani kao "molekularni sistemi".



Slika 1.4.

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

$$k_{ob} = \frac{Y(\infty) - Y(0)}{A} \quad (1.1)$$

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

$$\bar{k}_{ob} = \frac{\dot{Y}(\infty)}{A} \quad (1.2)$$

gdje \dot{Y} označava brzinu promjene koordinate Y . ili $\dot{Y}(\infty)$ B.M.

Očevidno je sa sl. 1.4b da vrijedi:

$$\bar{k}_{ob} = \frac{1}{\bar{T}_{ob}} \quad (1.3)$$

Ovakvim izborom definicija veličina k_{ob} , T_{ob} i τ_{ob} , odnosno \bar{k}_{ob} , \bar{T}_{ob} i τ_{ob} stvorena je mogućnost da su složeni, mnogo kapacitivni 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} i τ_{ob}) odnosno dva broja (\bar{k}_{ob} , i τ_{ob}) pri unaprijed fiksiranoj strukturi modela izraženoj prenosnim funkcijama:

$$W_{ob}(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} e^{-s\tau_{ob}} \quad (1.4)$$

za statičke objekte, odnosno

$$W_{ob}(s) = \frac{\bar{k}_{ob}}{s} e^{-s\tau_{ob}} \quad (1.5)$$

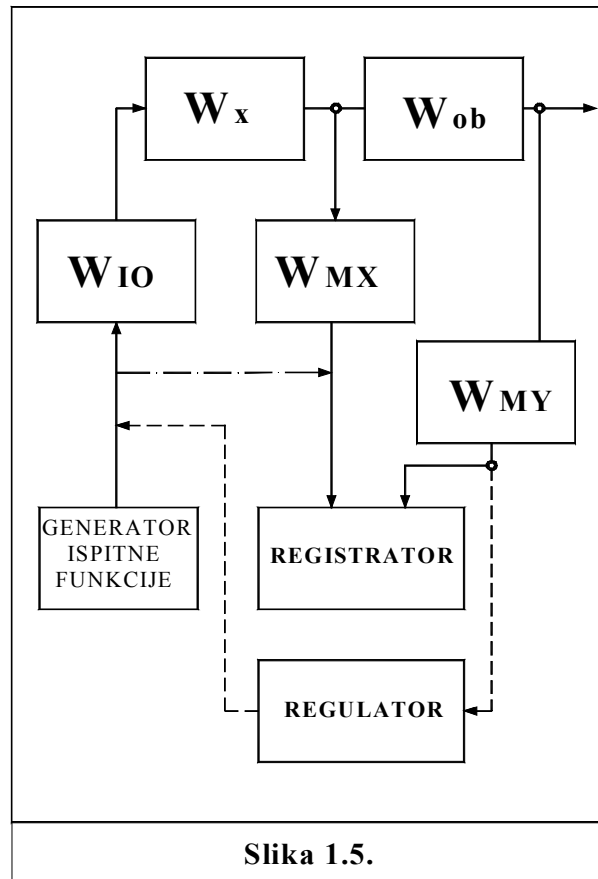
za astatičke objekte.

1.2.2. Tehnika izvođenja eksperimenta

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

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

Na sl. 1.5. prikazan je objekat, čije se karakteristike W_{ob} žele snimiti, opremljen tehničkim sredstvima za generiranje 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 je dinamička karakteristika 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, praktički 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. Pošto zbog dinamike mjernih i registracionih uređaja, to nije moguće izvesti direktno, kao rezultat eksperimenta dobiju se veličine x_2 i y_1 . Ukoliko se identifikacija ne izvodi u svrhe kasnijeg reguliranja tog objekta, te je potrebno znati W_{ob} bez uticaja dinamike 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 svrhu reguliranja, upravo je pogodno da se koleriraju 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 regulirane veličine. U tom slučaju govori se o objektu u širem smislu koji je definiran korelacijom veličina x_1 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.

$$\Delta t_{stac} \approx (2\tau_{ob})_{očekivano} \text{ ili } 2T_{ob} \quad (1.6)$$

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

Veličina amplitude A skokovite funkcije se bira prema kompromisnom kriteriju, koji zahtijeva amplitudu dovoljno veliku, da bi se vremenska karakteristika objekta mogla izdvojiti od uvijek prisutnih šumova, ali da pri tome uvjeti rada tehnološkog procesa ne budu znatnije narušeni. Pošto je skokovita ispitna funkcija trajna smetnja, to se amplituda obično ograničava na:

$$d\hat{a}$$

$$A \approx (5 - 15)\% \text{ efektivnog}^2 \text{ hoda izvršnog organa.} \quad (1.7)$$

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

Snimanje ispitne funkcije, tj. registriranje 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 $d\hat{a}$ funkciju kao na sl. 1.3.a), a na ulazu objekta se pojavi forma kao na sl. 1.3.b), što se pri obradi rezultata eksperimenta obavezno mora uzeti u obzir, ukoliko se želi identificirati 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 mjerenje veličine, može se računati sa dimenzijom veličine y_1 :

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

Ukoliko se ipak želi raditi sa stvarnom dimenzijom, onda

$$[y] \triangleq [\text{jedinica mjere tehnološke veličine}].$$

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 ispunjen **zadovoljen** uvjet:

$$T_{reg} \leq 0,1T_{ob} \quad (1.8)$$

gdje su: T_{reg} – vremenska konstanta registratora,

T_{ob} Type equation here.– očekivana vremenska konstanta objekta.

T_{reg} se može jednostavno odrediti približnom relacijom:

$$T_{reg} \approx 0,1T_{ps} \quad (1.9)$$

gdje je T_{ps} vrijeme preleta pune skale pera registratora, pri skokovito promijenjenom 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. 1.4, mogu dobiti τ_{ob} , T_{ob} i k_{ob} za objekat u širem smislu. Ali, ako se žele dobiti ovi parametri za W_{ob} , tada predstoji procedura 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_{IO} i W_{MY} može se provesti veoma jednostavno u domenu prenosnih funkcija ili domenu amplitudno – fazne karakteristike:

$$W_{ob}(s) = \frac{\frac{k_{ob\hat{s}}}{T_{ob\hat{s}} \cdot s + 1} e^{-s\tau_{ob\hat{s}}}}{W_{MY}(s) \cdot W_{IO}(s) \cdot W_X(s)} \quad (1.10)$$

odnosno

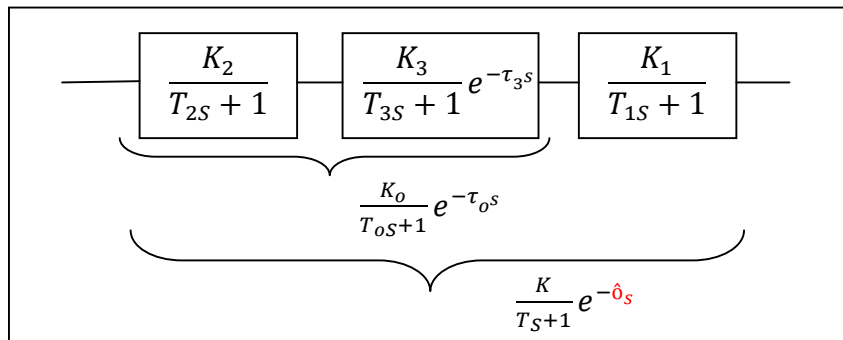
² Pod efektivnim hodom izvršnog organa se podrazumjeva hod unutar koga izvršni organ ima svojstvo upravljanja nad objektom. Kod loše odabranih izvršnih organa, efektivni hod je samo dio stvarnog hoda. Važno je da efektivni i stvarni hod budu jednaki.

$$W_{ob}(j\omega) = \frac{\frac{k_{ob\dot{s}}}{T_{ob\dot{s}} \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau_{ob\dot{s}}}}{W_{MY}(j\omega) \cdot W_{IO}(j\omega) \cdot W_X(j\omega)} \quad (1.11)$$

gdje indeks \dot{s} označava parametre objekta u širem smislu.

Navedeni postupak je točan i ne nosi u sebi nikakve aproksimacije, ali traži dosta obimna računanja. Zato je nekada, za račun žrtvovanja pune točnosti koju pružaju izrazi (1.10) ili (1.11), udobno poslužiti se jednostavnijom aproksimativnom metodom.

Tako npr. sl. 1.6. pokazuje objekat u širem smislu sa parametrima (k, T, τ) koji se sastoji od tri bloka sa parametrima k_1, T_1 (transmitter); k_2, T_2 (izvršni organ) i k_3, T_3, τ_3 (objekat).



Slika 1.6. da se stavi u okvir

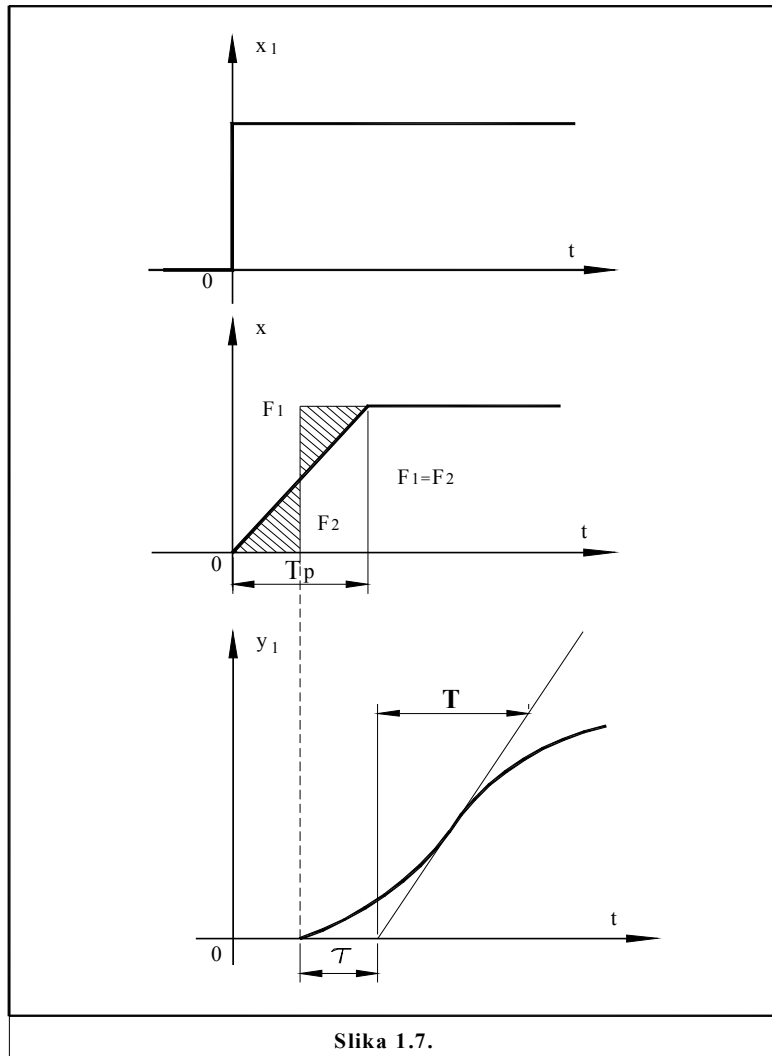
Tabela 1. označava veoma jednostavno, da se na osnovu podataka o $(k, T$ i $\tau)$, koji su rezultat identifikacije, uz poznate podatke o k_1, T_1 i k_2, T_2 koje daju proizvođači transmitera i izvršnih organa, eliminiira njihov uticaj, te da se kao rezultat dobiju podaci o k_3, T_3, τ_3 , koji opisuju sam objekat. Procedura eliminacije se sastoji od dva koraka. Najprije se izdvoji transmitter, a onda se iz "ostatka" opisanog sa k_0, T_0, τ_0 eliminiira izvršni organ.

Nekada nije potrebna točnost 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.

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 točki 0' koja se dobije grafičkom konstrukcijom sa drugog dijagrama. Od točke 0' se računaju i τ i T .

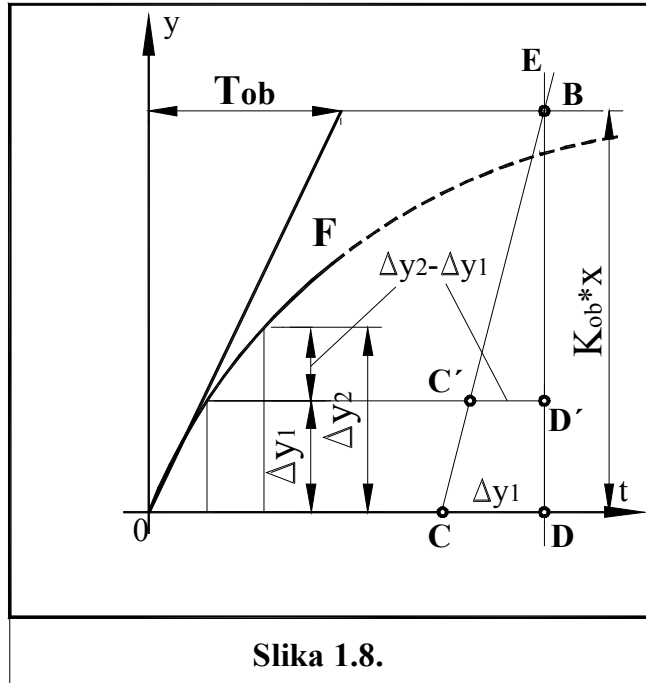
Tabela 1.

τ/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.

Što se tiče obračuna uticaja dinamičkih parametara mjernog pretvarača na rezultate eksperimenta, može se sa dosta sigurnosti konstatirati 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 npr. susreću kod regulacije pritiska i protoka) to zanemarenje bi ipak moglo značajno uticati na točnost rezultata identifikacije, te se uticaj mjernog pretvarača ipak mora obračunati saglasno (1.10), (1.11) ili saglasno proceduri uz Tabelu 1.



Slika 1.8.

U slučaju da uvjeti 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 definira novo stacionarno stanje odziva koje dalje omogućava određivanje k_o i T_o .

Na vremenskoj osi definiraju se dva jednaka odsječka Δt i pripadne ordinate Δy_1 i Δy_2 , koje se prenese vertikalno na liniju DE , prema slici. Formirane tačke C i C' određuju pravac koji presjekom sa pravcem DE definira tačku B . Tačka B određuje novo stacionarno stanje.

Dokaz je jednostavan:

$$\Delta y_1 = k_{ob}(1 - e^{-\Delta t/T_{ob}}) \quad (1.12)$$

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

$$D'D'' \equiv D'C' = \Delta y_2 - \Delta y_1 \quad (1.13)$$

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

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

$$\frac{BD}{BD - DD'} = \frac{DC}{D'C'} \quad (1.14)$$

Iz jednadžbi (1.12) do (1.14) slijedi

$$BD = k_{ob}. \quad (1.15)$$

Slika 1.8. kao i jednadžbe (1.12) do (1.14) su pokazane za odziv prvog reda, što ne umanjuje primjenjivost postupka i za odzive kao na sl. 1.4.a), pošto pomicanjem koordinatnog početka 0 za τ_{ob} udesno i saglasno usvojenoj aproksimaciji uz jednadžbu (1.4), ostatak odziva se može smatrati odzivom prvog reda.

1.2.4 Izvođenje eksperimenta sa impulsnom ispitnom funkcijom

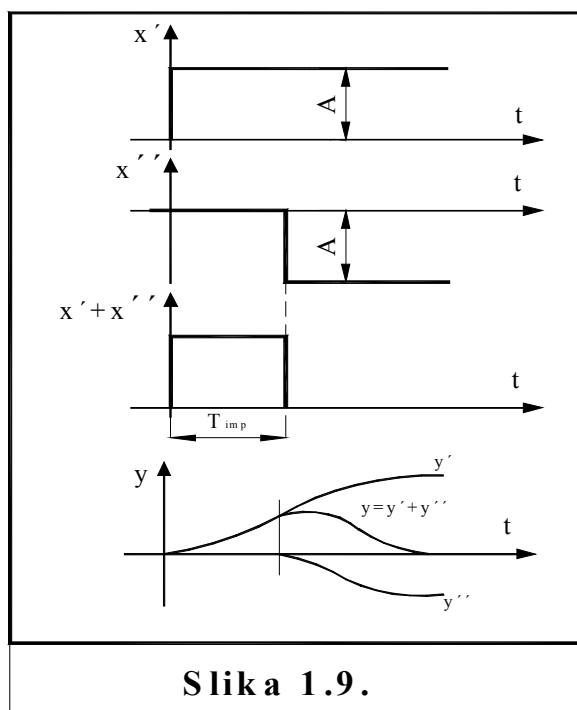
U slučaju da su šumovi koji normalno egzistiraju u objektu koji se identifikira takvog intenziteta da skokovita funkcija amplitude prema jednadžbi (1.7) nije dovoljno velika da bi se odziv izdvojio iz šumova, te šumovi dovode u pitanje pouzdanost rezultata eksperimenta, u svojstvu ispitne funkcije se koristi impulsna funkcija. S obzirom da impulsna funkcija nema karakter trajne smetnje, moguće je upotrijebiti funkciju sa amplitudom:

$$A \approx (15 - 25)\% \text{ efektivnog hoda izvršnog organa.} \quad (1.16)$$

što je svakako povoljnije od (1.7).

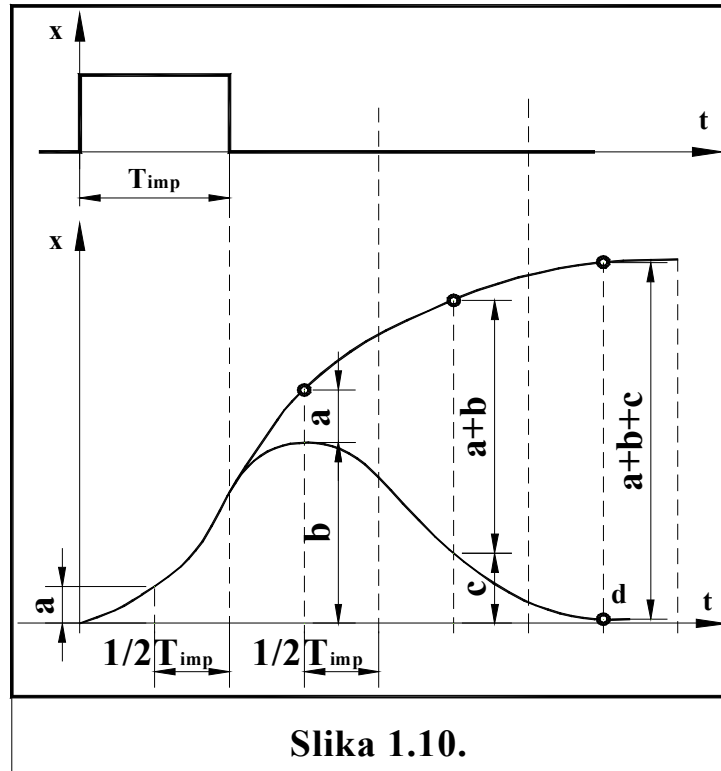
Impuls koji se primjenjuje pri realnim ispitivanjima je sastavljen od dvije skokovite ispitne funkcije jednakih, ali obrnuto polarisanih amplituda, sa vremenskim pomakom između pozitivnog i negativnog skoka, sl.1.9.

Odziv objekta na impulsnu funkciju se naziva impulsnom karakteristikom ili impulsnim odzivom objekta i vidi se da je sastavljen od dvije komponente protivnog znaka od kojih svaka odgovara jednom odzivu na skokovitu funkciju.



Trajanje realnog impulsa T_{imp} se odredi u toku samog eksperimenta prateći odziv y' . U trenutku kada vremenska karakteristika y' prođe točku infleksije potrebno je poništiti prvu skokovitu ulaznu funkciju drugom, te će se izlazna veličina objekta početi smanjivati nakon vremena kašnjenja τ_{ob} . U slučaju prisustva većih šumova, T_{imp} treba produžiti, te time dopustiti veću amplitudu odziva y .

Dobivanje parametara objekta, $k_{ob}, T_{ob}, \tau_{ob}$ na osnovu impulsne karakteristike zasniva se na konverziji impulsne karakteristike u odziv na skokovitu funkciju, saglasno slici 1.10, te se navedene veličine očitaju sa odskočnog odziva.



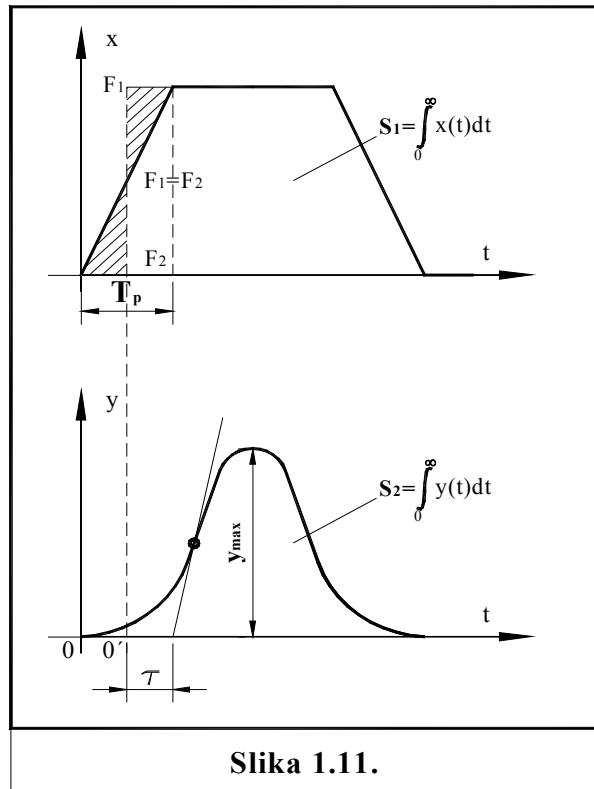
U vrijeme trajanja impulsa T_{imp} odskočna i impulsna karakteristika se poklapaju. U periodu trajanja T_{imp} , počevši poslije impulsa ordinate koje određuju odskočnu karakteristiku dobiju se kao suma ordinata impulsne karakteristike na odgovarajućem odsječku perioda T_{imp} itd. Na sl. 1.10. je kao korak unutar perioda T_{imp} uzeta polovina tog perioda.

Inače, impulsnu karakteristiku je moguće obraditi s ciljem dobivanja $\tau_{ob}, k_{ob}, T_{ob}$ služeći se momentima impulsne karakteristike. Na sl. 1.11. pokazana je situacija, kada se kao ispitni impuls upotrebljava trapezoidni impuls, (što je realna situacija prilikom primjene izvršnih organa sa konstantnom brzinom prelaska dijapazona). Tada se τ odredi grafički, saglasno postupku opisanom uz sl. 1.7., **te su**:

$$k_{ob} = \frac{S_2}{S_1} \quad (1.17)$$

$$T = \frac{S_2}{Y_{max}} \quad (1.18)$$

Za dobivanje S_1 i S_2 je potrebno grafički integrirati ispitnu funkciju i impulsnu karakteristiku.

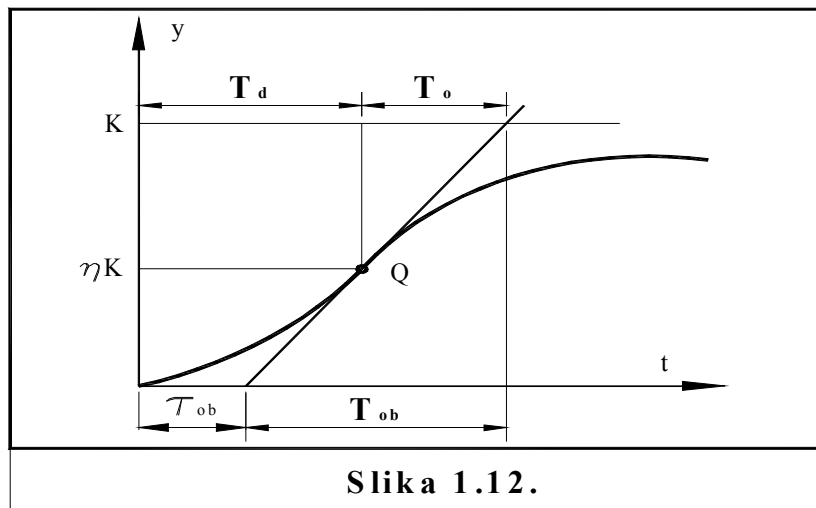


Slika 1.11.

1.2.5. 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 dobivala u transcendentnoj formi. Ako se želi iz rezultata eksperimenta ($k_{ob}, T_{ob}, \tau_{ob}$) 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 definiranih na sl. 1.12.

Pri tome je korištena aproksimacija [10]



Slika 1.12.

$$W_{ob}(s) \approx \frac{k}{(Ts + 1)^n} \approx \frac{k_{ob}}{T_{ob}s + 1} e^{-s\tau_{ob}} \quad (1.19)$$

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

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

Tabela 2.

No.	n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	τ_{ob}	0	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493	0,570	0,642	0,709	0,773
2.	η	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.	τ_{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

1.3. METODA PROSTE I SLOŽENE HARMONIJSKE ISPITNE FUNKCIJE (EKSPERIMENTALNO DOBIVANJE 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.

Ako se na ulaz objekta dovede ispitna funkcija tipa:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \Phi_x) \quad (1.20)$$

gdje je: A – amplituda ispitne funkcije,
 ω – frekvencija ispitne funkcije,
 Φ_x – faza ispitne funkcije.

tada će se po isteku nekog vremena, na izlazu objekta pojaviti stacionarne oscilacije izlazne veličine sa istom fekvencijom ω , ali drugom amplitudom B i pomakom faze Φ_y :

$$y = B \cdot \sin(\omega t + \Phi_y) \quad (1.21)$$

Jednačine (1.20) i (1.21), napisane u simboličkoj formi su:

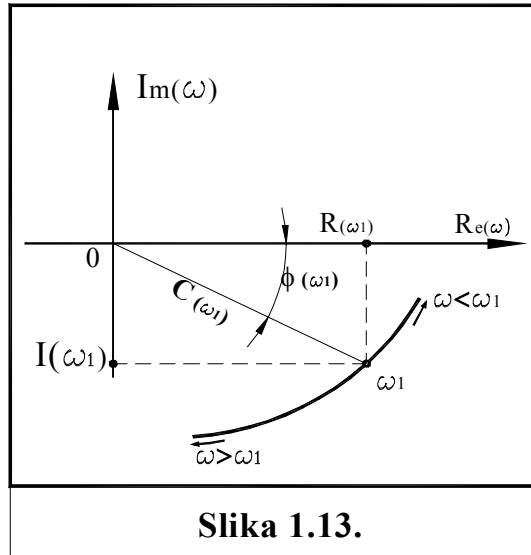
$$X = A e^{j(\omega t + \Phi_x)} \quad (1.22)$$

odnosno

$$Y = B e^{j(\omega t + \Phi_y)} \quad (1.23)$$

Uzimajući odnos (1.23) i (1.22), dobije se:

$$\frac{Y}{X} = \frac{B}{A} e^{j(\Phi_y - \Phi_x)} \quad (1.24)$$



Slika 1.13.

Ovo je kompleksna veličina čiji modul B/A mijenja svoju veličinu pri promjeni frekvencije ω . Zavisnost odnosa amplituda B/A sa fekvencijom:

$$C(\omega) = \frac{B(\omega)}{A} \quad (1.25)$$

naziva se amplitudno – frekventnom karakteristikom sistema, a razlika argumenata:

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

naziva se fazno – frekventnom karakteristikom sistema.

Kompleksna funkcija frekvencije:

$$W(j\omega) = C(j\omega)e^{j\Phi(\omega)} \quad (1.26)$$

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. 1.13.), tj. ta karakteristika je hodograf vektora $Ce^{j\Phi}$.

1.3.1. Tehnika provedbe eksperimenta

Opća shema pokazana na sl. 1.5. potpuno odgovara i u ovom slučaju. Generator ispitne funkcije predstavlja izvor sinusoidalnog kao prostoperiodičkog signala ili izvor pravouglog, ili trouglastog ili trapeznog vala kao složenog periodičkog 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} i W_{MY} koja su data u 1.2.2. vrijede i za ovaj slučaj, a jednažba (1.11) je direktno primjenljiva.

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 periodičkog signala, jer može doći do pogrešnog mjerenja faznih odnosa.

4. eksperimenat 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 (vidi glavu 4) 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 ω_0 do ω_π , 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:

$$\omega_{gr} = (2 \div 2,5)\omega_\pi \quad (1.27)$$

te se, u slučaju da je ipak potrebno poznavati dio karakteristike u II ili I kvadrantu, koristi opseg od ω_π do ω_{gr} .

Pod ω_{gr} se podrazumijeva ona frekvencija kod koje izlazne oscilacije imaju zanemarljivo malu amplitudu.

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 eksperimenat je korisno ponoviti dva do tri puta, te odbaciti ekstremno odstupajuće rezultate.

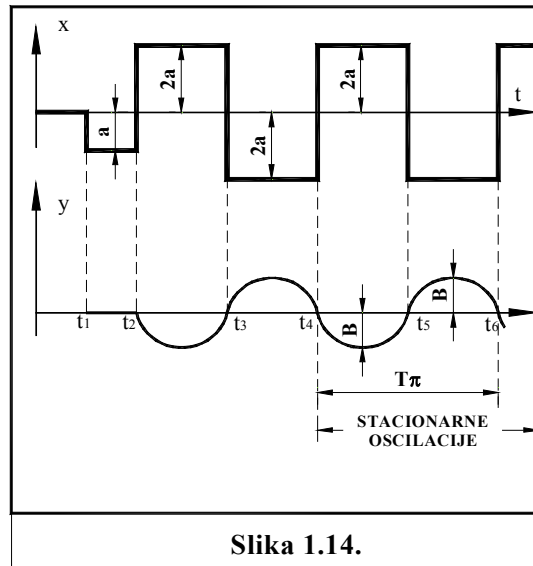
Amplituda A ulazne veličine treba biti:

$$A \approx (5 - 15)\% \text{ efektivnog hoda izvršnog organa.} \quad (1.28)$$

Kod spornih objekata ulaznu funkciju je moguće generirati i ručno, djelujući na izvršni organ. Ako je izvršni organ sa konstantnom brzinom, tada će on pravougli ulazni signal x_1 deformirati u trapezni ili čak trouglasti signal x na ulazu u objekat u užem smislu, te tu činjenicu treba uzeti u obzir pri analizi ulaznih valnih 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 ω_π , amplituda ulaznog signala mora biti viša s obzirom na niskopropusni karakter industrijskih objekata.

Karakteristična i veoma važna tačka ω_π se može odrediti specijalnim oblikom ulazne funkcije prema slici 1.14.



Slika 1.14.

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. Eksperimentat se produžava sve dok se ne postigne stacionaran oscilatorni proces i dok se ne registruju dva do tri perioda osciliranja T_π , te slijedi:

$$\omega_\pi = \frac{2\pi}{T_\pi} \quad [rad/s] \quad (1.29)$$

Vidljivo je sa slike da su prvi harmonik ulaza x i prvi harmonik izlaza y pomaknuti jedan prema drugom za π .

Za industrijske objekte sa sporo promjenljivim veličinama (temperatura, vlažnost, nivo) specijalnu ulaznu funkciju za provođenje eksperimenata za dobivanje ω_π moguće je generirati ručno, dok za brže procese (pritisci, protoci i sl.) treba imati specijalni generator ulazne funkcije. Granica pouzdanih rezultata pri ručnom generiranju tipkalima za uključanje izvršnog organa u jednu ili drugu stranu je jedno komutiranje u dvije sekunde.

1.3.2. Obrada rezultata eksperimenta

Ako se eksperimentat provodi prostim harmonijskim signalom, jednačina (1.24) 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 jednadbu (1.24) pojedinačno.

Važno je napomenuti da, uslijed efekta konačne brzine izvršnog organa kojim se u objekat unosi ispitna funkcija, koordinata x može imati trapeznu formu, iako je x_1 pravougli val.

Razlaganje ulaznih signala je veoma prosto i detaljni podaci se mogu naći u matematičkim priručnicima, gdje su tabelirani harmonici standardnih valnih formi, te će ovdje biti pokazani samo Tabelom 3. bez posebnog detaljiziranja. S obzirom da se radi o centralno simetričnim signalima, razlaganje daje samo neparne harmonike. Veličine koje se pojavljuju u tabeli definirane su na sl. 1.15.

Tabela 3.

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

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

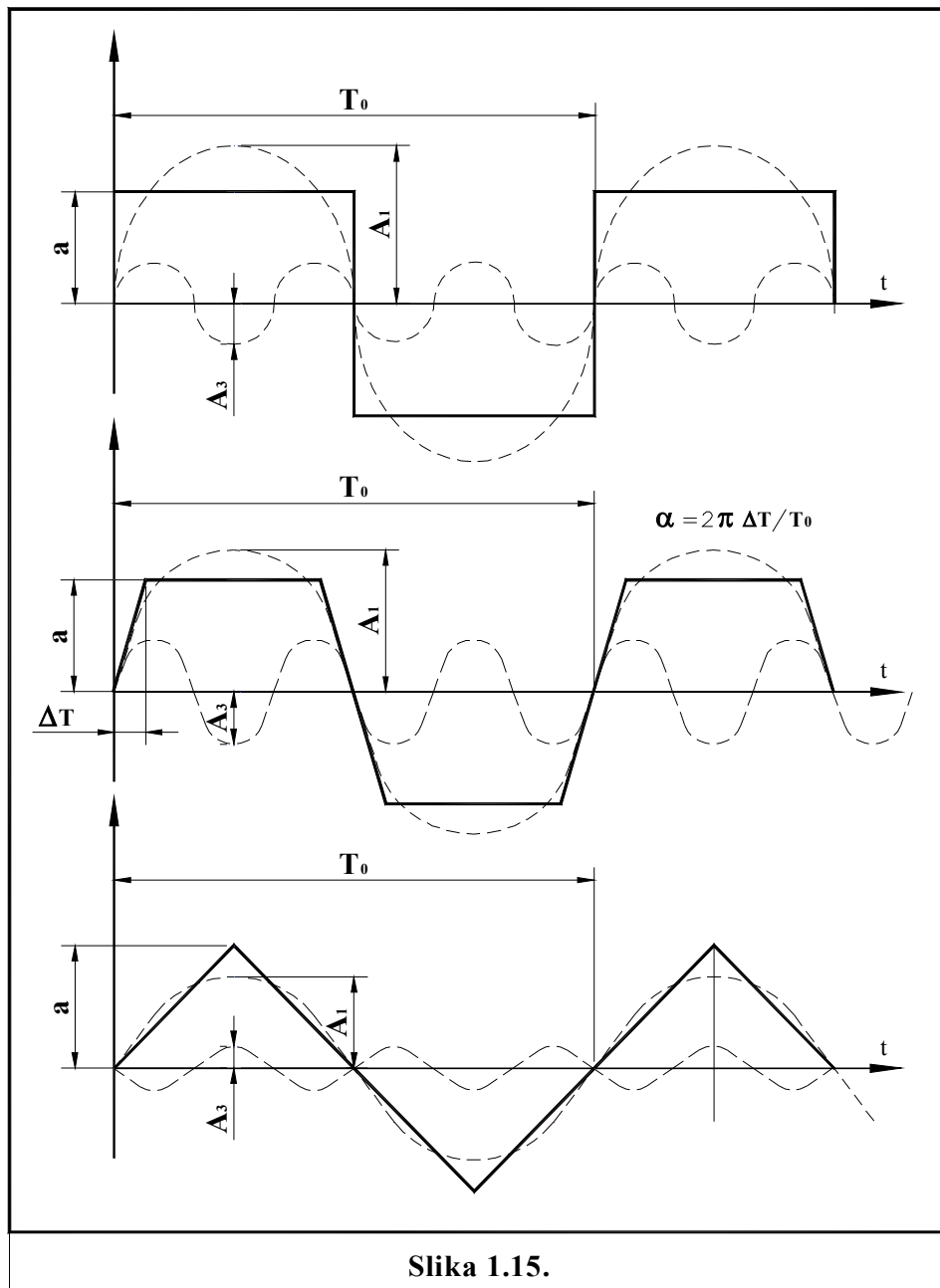
Opće svojstvo neoscilatornih sistema je monotono opadanje amplitudno–frekventne karakteristike sa porastom frekvencije, tj. energija visokofrekventnih harmonika se disipira intenzivnije.

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) (krivulja 4).

Takva krivulja 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 (krivulja 5–prvi harmonik, krivulja 6–treći harmonik). Zato, ako se izvede eksperimenat na nekoj frekvenciji ω , to se podaci toga eksperimenta obično koriste za dobivanje jedne tačke amplitudno–fazne karakteristike, i to na frekvenciji koja odgovara prvom harmoniku, tj ω . Korištenje tih podataka za određivanje tačke amplitudno–fazne karakteristike koja odgovara frekvenciji trećeg harmonika 3ω vezano je sa velikim greškama u slučaju kada je objekat koji se ispituje bogat šumovima (zbog neispunjavanja uvjeta datog jednadžbom (1.28) za treći harmonik), upotreba tih rezultata za dobivanje dvije tačke karakteristike jednim snimanjem se ne preporučuje, pogotovo ako postoji mogućnosti izvođenja nezavisnog eksperimenta na frekvenciji 3ω .

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



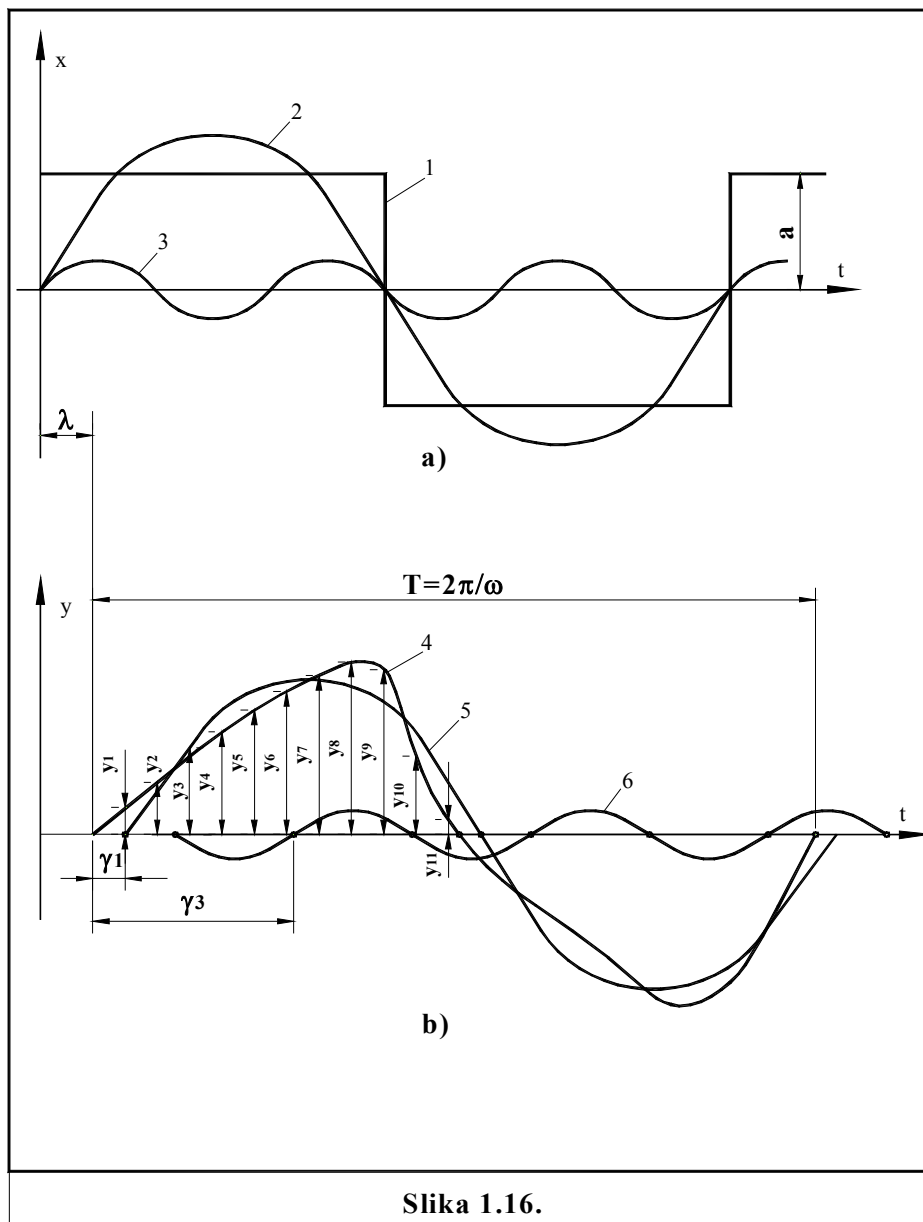
Slika 1.15.

Računaju se sume:

$$\begin{aligned}
 s_1 &= y_1 + y_{2v-1} \\
 s_2 &= y_2 + y_{2v-2} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 s_v &= y_v
 \end{aligned}
 \tag{1.30}$$

i razlike

$$\begin{aligned}
 d_1 &= y_1 - y_{2v-1} \\
 d_2 &= y_2 - y_{2v-2} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 d_{v-1} &= y_{v-1} - y_{v+1}
 \end{aligned}
 \tag{1.31}$$



Slika 1.16.

Na osnovu tih podataka se računaju a_1 i b_1 :

$$a_1 = \frac{d_1 \cos \frac{\pi}{2\nu} + d_2 \cos 2 \frac{\pi}{2\nu} + \dots + d_{\nu-1} \cos(\nu - 1) \frac{\pi}{2\nu}}{\nu} \quad (1.32)$$

$$b_1 = \frac{s_1 \sin \frac{\pi}{2\nu} + s_2 \sin 2 \frac{\pi}{2\nu} + \dots + s_\nu \sin \nu \frac{\pi}{2\nu}}{\nu}$$

ili kraće,

$$a_1 = \frac{1}{\nu} \cdot \sum_{k=1}^{k=\nu-1} d_k \cos k \frac{\pi}{2\nu} \quad (1.33)$$

$$b_1 = \frac{1}{\nu} \cdot \sum_{k=1}^{k=\nu} s_k \sin k \frac{\pi}{2\nu} \quad (1.34)$$

Prvi harmonik se može napisati u formi:

$$a_1 \cos t + b_1 \sin t = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} (\sin \gamma_1 \cos t + \cos \gamma_1 \sin t) = B_1 \sin(t + \gamma_1) \quad (1.35)$$

gdje je amplituda prvog harmonika

$$B_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (1.36)$$

a pomak faze prvog harmonika u odnosu na analiziranu krivu

$$\gamma_1 = \arctan \frac{a_1}{b_1} \quad (1.37)$$

Za treći harmonik:

$$a_3 = \frac{1}{v} \cdot \sum_{k=1}^{k=v-1} d_k \cos k \frac{3\pi}{2v} \quad (1.38)$$

$$b_3 = \frac{1}{v} \cdot \sum_{k=1}^{k=v} s_k \sin k \frac{3\pi}{2v} \quad (1.39)$$

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

$$B_3 = \sqrt{a_3^2 + b_3^2} \quad (1.40)$$

$$\gamma_3 = \arctan \frac{a_3}{b_3} \quad (1.41)$$

Nakon provođenja razlaganja ulaznog signala prema tabeli 3. i izlaznog signala prema jednadžbama (1.30) do (1.41), moguće je dobiti polarne koordinate točke $W(j\omega_k)$ kao:

$$|W(j\omega_k)| = \frac{B_1(\omega_k)}{A_1(\omega_k)} \quad (1.42)$$

$$\Phi(\omega_k) = \gamma_1(\omega_k) + \lambda(\omega_k) \quad (1.43)$$

gdje je λ fazni pomak koso simetrične krivulje izlazne veličine u odnosu na ulaznu funkciju.

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

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

Ako se objekat identificira metodom skokovite ili impulsne ispitne funkcije, rezultati eksperimenata 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:

$$W_I(s) = \frac{k_{ob}}{T_{ob} \cdot s + 1} \quad (1.44)$$

$$W_{\tau}(s) = e^{-s\tau_{ob}} \quad (1.45)$$

slijedi

$$W_{approx}(j\omega) = W_I(j\omega) \cdot W_{\tau}(j\omega) \quad (1.46)$$

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 kadrantu Re–Im ravni sa centrom na pozitivnoj Re osi i dijametrom jednakim k_{ob} , koji je poznat iz vremenske karakteristike. Znajući T_{ob} , odrede se frekvencije na tom hodografu:

$$\omega_i = \frac{\tan \Phi_{Ii}}{T_{ob}} \quad [rad/s] \quad (1.47)$$

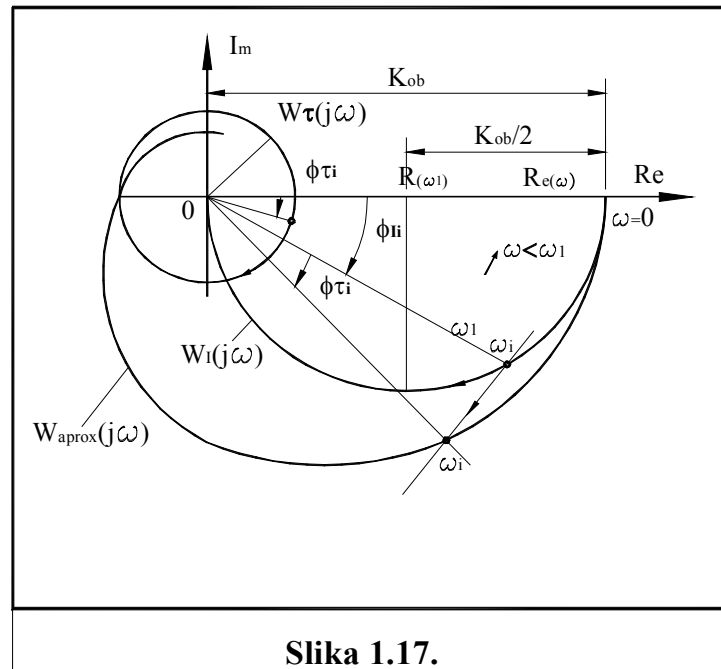
Time je karakteristika $W_I(j\omega)$ potpuno određena.

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:

$$\omega_i = \frac{\Phi_{\tau i}}{57\tau_{ob}} \quad [rad/s] \quad (1.48)$$

gdje je $\Phi_{\tau i}$ sa dimenzijom [lučni stepeni].



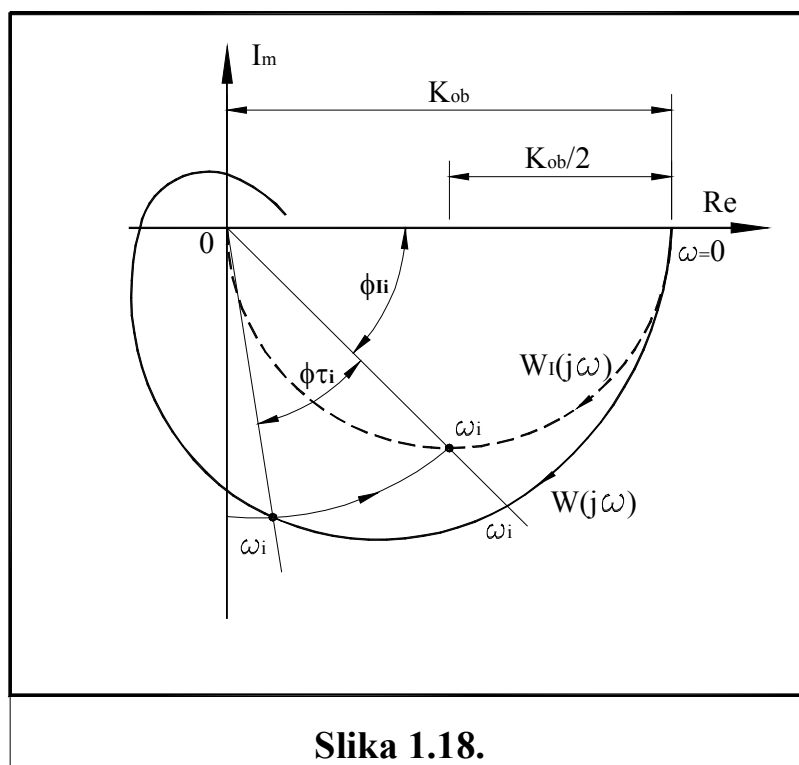
Slika 1.17.

Time je potpuno određena i karakteristika $W_{\tau}(j\omega)$.

Postupak za određivanje jedne točke $W_{approx}(j\omega)$ na frekvenciji ω_i je, prema sl. 1.17.

Uglu Φ_{Ii} dodaje se ugao $\Phi_{\tau i}$, povuče se zraka iz ishodišta Re–Im ravni pod tim uglom i točka sa frekvencijom ω_i se prenese lukom sa centrom u ishodištu Re–Im ravni sa $W_I(j\omega)$ na precjesište luka i zrake. Time se dobije jedna točka hodografa $W_{approx}(j\omega)$ za frekvenciju ω_i . Za sve sljedeće točke postupak je identičan.

Ova procedura je veoma korisna, jer se identifikacija objekta najčešće vrši metodom skokovite ispitne funkcije, a sinteza upravljačke konture na osnovu amplitudno–fazne karakteristike.



Slika 1.18.

Obrnuto pretvaranje, dobivanje parametara $k_{ob}, T_{ob}, \tau_{ob}$ na osnovu snimljene amplitudno–fazne karakteristike je pokazano na sl. 1.18.

Točka ω_i se po luku sa centrom u ishodištu 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 na $k_{ob}/2$.

k_{ob} je direktno moguće očitati, pošto je točka $\omega = 0$ zajednička za $W_{approx}(j\omega)$ i $W_I(j\omega)$. Uglovi $\Phi_{\tau i}$ i Φ_{Ii} se direktno sa te konstrukcije mogu dobiti, te se primijene na jednađžbe:

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau i}}{57\omega_i} \text{ [s]} \quad (1.49)$$

$$T = \frac{\tan \Phi_{Ii}}{\omega_i} \text{ [s]} \quad (1.50)$$

Jednađžbe (1.49) i (1.50) predstavljaju iste jednađžbe kao i (1.47) i (1.48), samo sa drugim veličinama izraženim eksplicite.

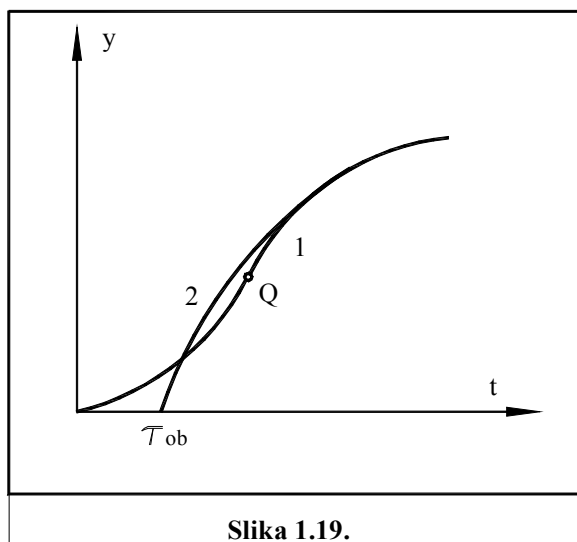
Obj procedure pretvaranja su pokazane na primjerima statičkih objekata, ali su direktno primjenjive i na astatičke objekte, kada $W_I(j\omega)$ predstavlja hodograf po negativnoj Im osi.

1.3.4. **Opravdanost aproksimacije objekta viskog reda, objektom prvog reda sa čistim kašnjenjem**

Pošto se aproksimacija data jednađžbom (1.19) često koristi, ima smisla detaljnije se pozabaviti njenom opravdanošću.

Na sl. 1.19. pokazani su odzivi objekta višeg reda (kriva 1), kao i objekta prvog reda sa čistim kašnjenjem (kriva 2) kojim se aproksimira kriva 1.

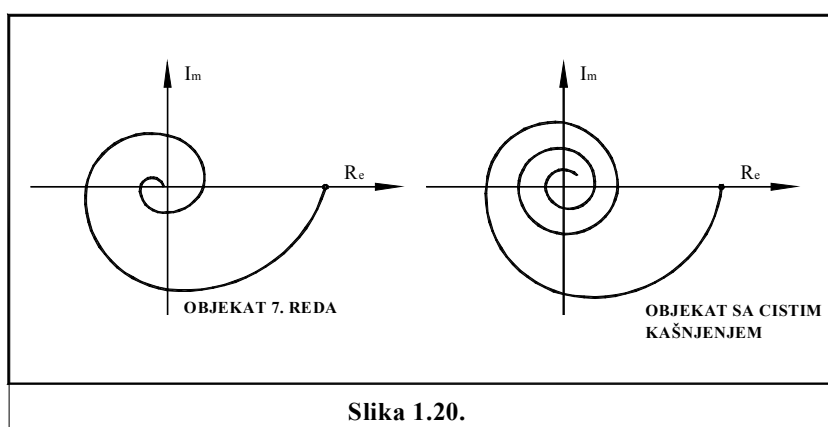
Obj krive imaju veoma približan tok, ali i jednu značajniju razliku.



Slika 1.19.

Kriva 1 ima zaobljen početni dio, što je rezultat većeg broja faznih kašnjenja sastavnih dijelova multikapacitivnog objekta, a kašnjenje definirano presjekom tangente u točki infleksije sa vremenskom osom je aproksimacija u sigurnu stranu, jer je očito 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 **negoli što** su proračunski.

Poredeći amplitudno–fazne karakteristike koje odgovaraju za oba slučaja, uočljiva je bitna razlika koja se ogleda u činjenici, da za objekat sa čistim kašnjenjem, karakteristika se beskonačno puta obavija oko ishodišta (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 (sl. 1.20). Dobro slaganje obiju karakteristika u 4. i 3. kvadrantu opravdavaju aproksimaciju, a da je aproksimacija „u sigurnu stranu“ očito je iz činjenice, da je lakše upravljati objektom n-tog reda nego objektom beskonačnog reda kojim aproksimiramo.



Slika 1.20.

1.4. METODA PASIVNOG EKSPERIMENTA

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 također i teška obrada

podataka. Zato se praktička obrada ovih informacija može provesti samo automatizacijom obrade, koja se sastoji u korištenju univerzalnih ili specijalnih računala. Kod off-line obrade računala se koriste kombinovano. Specijalno računalo (procesno) prima informaciju direktno sa mjernih pretvarača objekta i obrađuje informacije u trenutku njihovog dolaska sa objekta. Ovo računalo obično ne završava obradu, nego daje informaciju u kondenziranom 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 računalu. Međutim, kod on-line identifikacije brzih objekata, razvijena je posebna tehnika tzv. brze Furijeve transformacije (FFT), koja koristi velika superbrza računala ili specijalne paralelne računalske arhitekture, posebno strukturno prilagođene ovom vidu aplikacije (DSP—digitalno procesiranje signala), što omogućava da se zadatak riješi i bez velikih računala.

1.4.1. Definicija slučajne veličine

Neka je potrebno provesti neko ispitivanje. U tom slučaju zadaje se sveukupnost konkretnih uvjeta i razmatra se veličina koja se ispituje. Ako se pri jednim te istim uvjetima ponavljaju ta ispitivanja, tada se dobiveni 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 uvjeta, tada će se vrijednosti te veličine mijenjati. Ali ako se ponovi skup konkretnih uvjeta, uvijek će se dobiti isti iznosi ispitivane veličine, kao i u prethodnom ispitivanju pri istim uvjetima. Zahvaljavajući tome, za veličine prve grupe se može ustanoviti sasvim određena kruta zavisnost od konkretnih uvjeta.

Za veličine druge grupe takve mogućnosti nema, jer se dobiveni rezultati pri svakom ponavljanju konkretnih uvjeta mijenjaju. Veličina, vrijednost koja pri konkretnom skupu uvjeta nije određena zbog nejednoznačnosti drugostepenih uvjeta, naziva se slučajnom veličinom.

U svojstvu primjera može se razmotriti primjer nekoliko „jednakih“ kemijskih reaktora koji na izlazu daju neku koncentraciju izlaznog produkta. Mjerene veličine koncentracije razlikovat će se. 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 točnost mjerenja koncentracije izlaznog produkta u različitim reaktorima itd. Sve se to u krajnjoj konsekvenci odražava na koncentraciju izlaznog produkta.

Koncentracija izlaznog produkta, mjerena u jednom te istom momentu na izlazu različitih reaktora, je slučajna veličina. Slučajne funkcije vremena se nazivaju slučajnim procesima. Tako npr. koncentracija izlaznog produkta 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 tehnoloških, uglavnom sporih, objekata, slučajni procesi se zapisuju pomoću odgovarajućih registratora ili ručno. Prilikom izučavanja slučajnih procesa u industrijskim objektima, često se mogu koristiti postojeći registrogrami koji se normalno snimaju pri eksploataciji objekta. Zapisi slučajnih procesa u vidu tabela ili dijagrama, dobiveni 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:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (1.51)$$

gdje su:

$2T$ – interval vremena na kome se provodi usrednjavanje umnoška,

$$x = x(t) \cdot x(t + \tau)$$

τ – veličina vremenskog pomaka među umnošcima funkcije $x(t)$.

Kako slijedi iz izraza (1.51), autokorelaciona funkcija omogućava da se ustanovi srednja veličina veze koja postoji među dvjema veličinama funkcije $x(t)$, međusobno udaljenim u vremenu za τ . Obično veličina te veze se smanjuje sa povećanjem τ . Najveći iznosi funkcije $R_{xx}(\tau)$ su pri malim vrijednostima τ .

Pri $\tau = 0$ autokorelaciona funkcija ima maksimum:

$$R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2(t) dt \quad (1.52)$$

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

Kroskorelaciona funkcija je po definiciji:

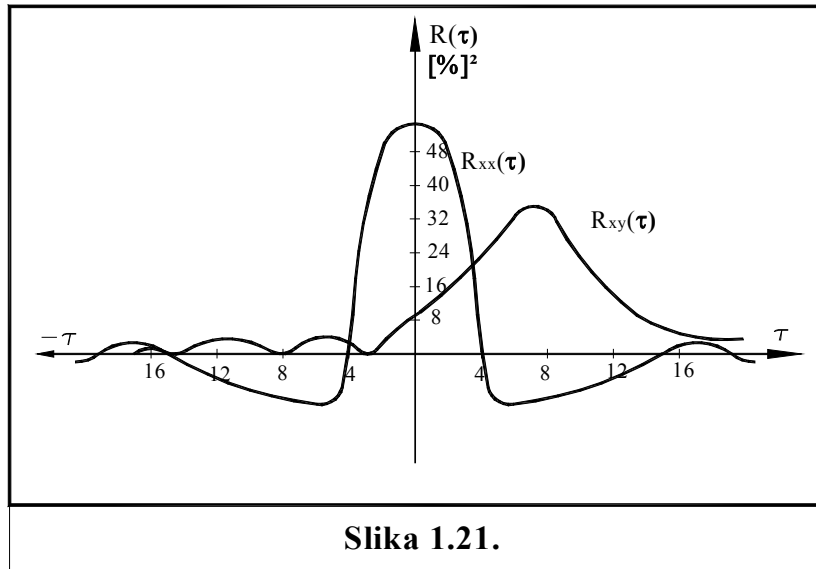
$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (1.53)$$

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

Za razliku od autokorelaciona, kroskorelaciona nije parna funkcija.

Na sl. 1.21. pokazana je 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.



Slika 1.21.

Normalizovana korelaciona funkcija s obzirom na $R_{xx}(0)$ je:

$$R_{xx}^n(\tau) = \frac{R_{xx}(\tau)}{R_{xx}(0)} \quad (1.54)$$

otkuda slijedi da je

$$R_{xx}^n(0) = 1 \quad (1.55)$$

1.4.3. Računanje korelacionih funkcija

Jednadžbe (1.51) i (1.53) pokazuju da je nemoguće provesti točno izračunavanje korelacionih funkcija pošto se traži da period promatranja $T \rightarrow \infty$. Za praktične svrhe moguće je ograničiti se na konačni interval T . Veličina intervala T se bira tako da bude zadovoljeno:

$$T \gg T_{nn} \quad (1.56)$$

gdje je T_{nn} vrijeme prelaznog procesa u ispitivanom sistemu. Očita je nezgoda u tom što se apriori mora poznavati barem grubo vrijeme prelaznog procesa objekta, čija identifikacija se tek želi 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 dobivanju ishodnog 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 digitalnom računaru veoma je pogodno informacije sabrati u diskretnoj formi, u cifarskom obliku. Uzorci se uzimaju u jednakim intervalima vremena.

Takva forma informacija se može dobiti primjenom specijalnih informacionih automata (data logger-i) ili primjenom računala u funkciji prikupljanja podataka (data aquisition). Moguće je registriranje informacija i u drugim formama, npr. kontinualno registriranje na magnetne trake za naknadnu obradu ili neposredno u memoriju računala sa istovremenom obradom.

Izbor najudobnijeg vida registracije se određuje suglasno konkretnim uvjetima eksperimenta i mogućnostima obrade dobivenih 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.

Korelacione funkcije signala $x(t)$ pri ograničenom intervalu vremena posmatranja T računaju se pomoću izraza:

$$R_{xx}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (1.57)$$

$$R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (1.58)$$

otkuda se vidi da je za dobivanje korelacionih funkcija za interval $\tau = 0$ do $\tau = \tau_{max}$ potrebno vršiti snimanje (promatranje) u vremenu $T + \tau_{max}$, te je u tom slučaju stupanj tačnosti jednak u cijelom intervalu.

Ako je potrebno smanjiti količinu računanja, uz dopuštanje neke greške pri većim τ , tada se može računanje provesti na temelju snimanja (promatranja) u vremenu T , ali jednačbe (1.57) i (1.58) postaju:

$$R_{xx}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (1.59)$$

$$R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (1.60)$$

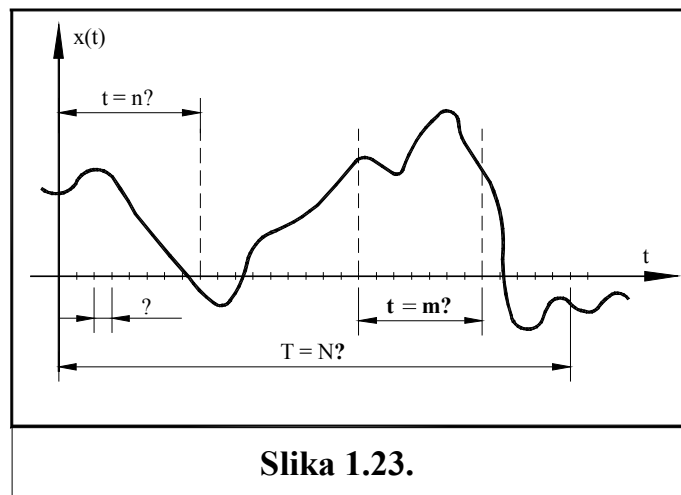
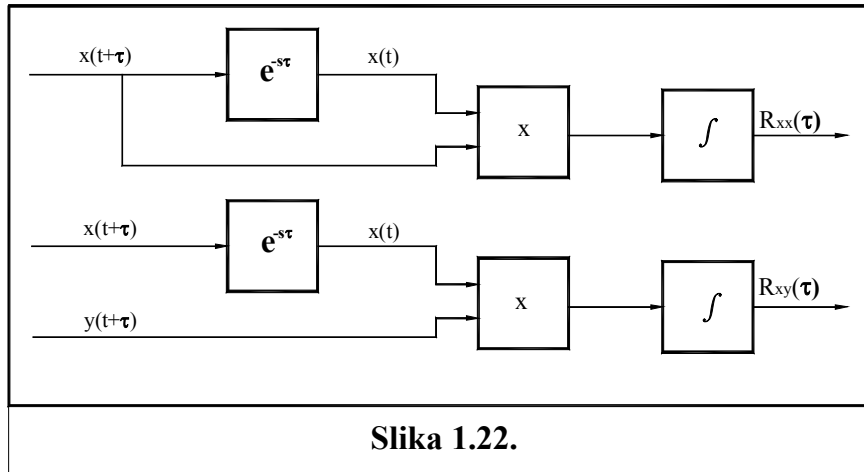
Pošto je potrebno održati uvjet $\tau_{max} \ll T$, obično se uzima

$$10\tau_{max} \leq T \quad (1.61)$$

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 računala, postupak je identičan. Polazna informacija se predstavi u vidu tabele diskretnih vrijednosti slučajnog procesa x_i uzetih na jednakim intervalima vremena Δ .

Veličina intervala Δ 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 Δ i odredi se N vrijednosti funkcije $x(t)$, odnosno $y(t)$. Zadajući fazni pomak τ , nađe se N vrijednosti pomaknute funkcije $x(t + \tau)$, odnosno $y(t + \tau)$. Poslije toga za svaku vrijednost τ odredi se suma umnožaka $x(t) \cdot x(t + \tau)$, odnosno $x(t) \cdot y(t + \tau)$. Pošto je $t = n \cdot \Delta$, a $\tau = m \cdot \Delta$, tada izrazi (1.59) i (1.60) prelaze u:

$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(m\Delta) = \frac{1}{N - m} \sum_{n=1}^{N-m} x(n\Delta) \cdot x[(n + m)\Delta] \quad (1.62)$$

$$R_{xy}(\tau) = R_{xy}(m\Delta) = \frac{1}{N - m} \sum_{n=1}^{N-m} x(n\Delta) \cdot y[(n + m)\Delta] \quad (1.63)$$

Na točnost računa utiču sljedeći faktori:

1. Točnost polaznih informacija, tj. točnost s kojom u računu korišteni cifarski podaci odgovaraju stvarnim vrijednostima signala. Osim točnosti registratora, veliku ulogu u tom igra i izbor intervala Δ .

Izbor tog intervala, najbolje je izvršiti suglasno sampling-teoremi Šenona, po kojoj je minimalno potrebni interval za punu rekonstrukciju signala jednak:

$$\Delta = \frac{\pi}{\omega_c} \quad (1.64)$$

gdje je ω_c frekvencija najvišeg sastojka unutar frekventnog sadržaja signala.

Pošto je ω_c obično nepoznata, to se može koristiti preporuka već iznesena uz definiciju Δ , uzimajući kao kriterij 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 točnosti formula za računanje korelacionih funkcija, ali i da se ipak smanjuje točnost 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:

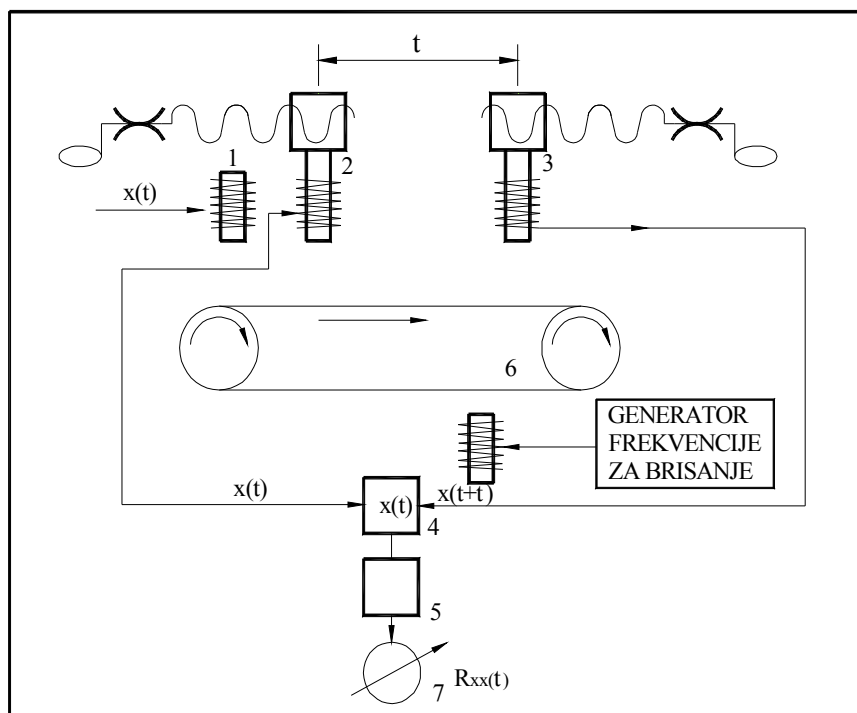
$$T \geq \frac{50}{\omega_n} \quad (1.65)$$

gdje je ω_n frekvencija najnižeg frekventnog sastojka slučajnog procesa.

3. Maksimalno vrijeme τ_{max} za koje se računaju korelacione funkcije. To vrijeme mora biti znatno kraće nego T . Iskustvo računanja korelacionih funkcija na računalima pokazuje da uvećanje τ_{max} vodi ka povećanju grešaka. Preporučuje se pridržavanje kriterija datog jednadžbom (1.61).

Računanje korelacionih funkcija se može prepustiti i specijaliziranim računalima-korelatorima.

Principijelna shema jednog analognog korelatora data je na sl. 1.24.



Slika 1.24.

Slučajna funkcija $x(t)$ se registrira na magnetnu traku 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 τ se zadaje položajem glava 2. i 3.

Kada su korelacione funkcije izračunate na bilo koji način, sljedeći korak je u nalaženju funkcija spektralnih gustina.

Spektralna gustina se dobije kao Furijeova transformacija korelacione funkcije:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1.66)$$

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1.67)$$

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:

$$W(j\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (1.68)$$

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 jednačbama (1.66) do (1.68) je samo primjer jednog od tih postupaka.

1.5. METODE IDENTIFIKACIJE OBJEKTA 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 pronalaženju prirodne frekvencije konture kada je u konturi proporcionalni regulator i pronalaženje pojačanja regulatora koje daje oscilacije konture na prirodnoj frekvenciji. Pošto je za definiciju kriterija za ovaj vid identifikacije potrebno razmatranje o zatvorenoj konturi, detalji će biti prikazani u glavi 4, koja se u cijelosti bavi ponašanjem objekta u zatvorenoj konturi. Ovdje je potrebno napomenuti da su period oscilacije T_o na prirodnoj frekvenciji ω_o i pojačanje proporcionalnog regulatora k_{kr} dovoljni podaci za podešenje 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 eksperimenat za određivanje vremena čistog kašnjenja τ . Ovo je veoma jednostavno 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 i zatvorenom konturom. Regulator, koji već postoji u konturi, služi kao pribor za testiranje.

1. Sa regulatorom u režimu RUČNO, generira se skokovita ili impulsna funkcija, koja djeluje na objekat 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 τ .

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 kojima se odredi period T_o , 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 τ . Bilo koji drugi tip eksperimentalne identifikacije drži konturu otvorenom duže vrijeme. Dio eksperimenta sa zatvorenom konturom opisuje proces pod uvjetima koji su od najvećeg značaja, tj. na prirodnoj frekvenciji konture. Dva kompletna perioda su dovoljna da se pouzdano izmjeri T_o . Ako nije praktički 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 $T_o/\tau = 2$ – proces je čisto transportno kašnjenje.
- Ako je $2 < T_o/\tau < 4$ – transportno kašnjenje je dominantno.
- Ako je $T_o/\tau = 4$ – u procesu je dominantan jedan kapacitet.
- Ako je $T_o/\tau > 4$ – više nego jedan kapacitet je prisutan u procesu.

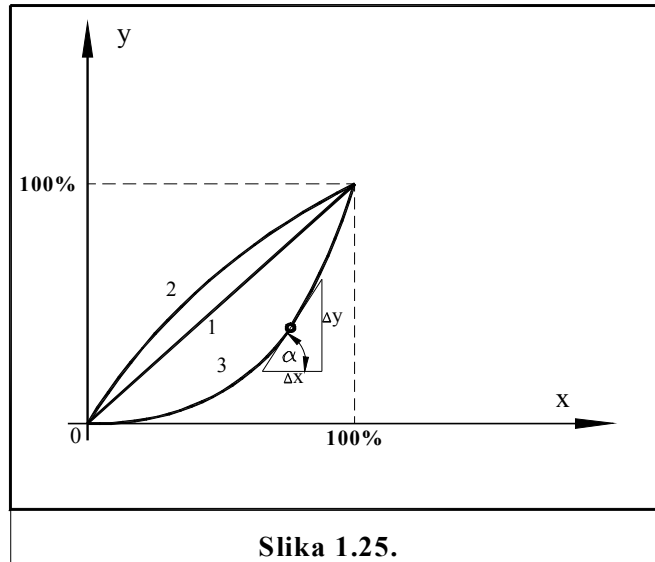
Ovo su dovoljne informacije za svrhe podešenja parametara regulatora, što će biti pokazano u glavi 4.

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

1.6. 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 nisu interesantne, nije racionalno pristupiti 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.

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. To je prikazano na sl. 1.25., gdje je 1. linearna, 2. nelinearna konveksna i 3. nelinearna konkavna karakteristika. Nagib tangente u bilo kojoj točki karakteristike definira pojačanje objekta u toj radnoj točki.



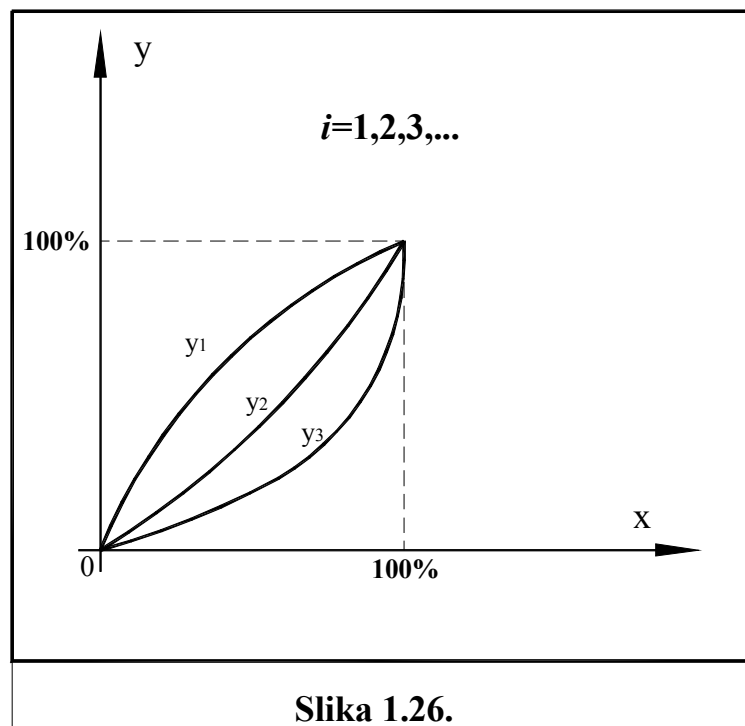
Slika 1.25.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = k_{ob} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.69)$$

Očevidno je da se linearna statička karakteristika odlikuje svojstvom

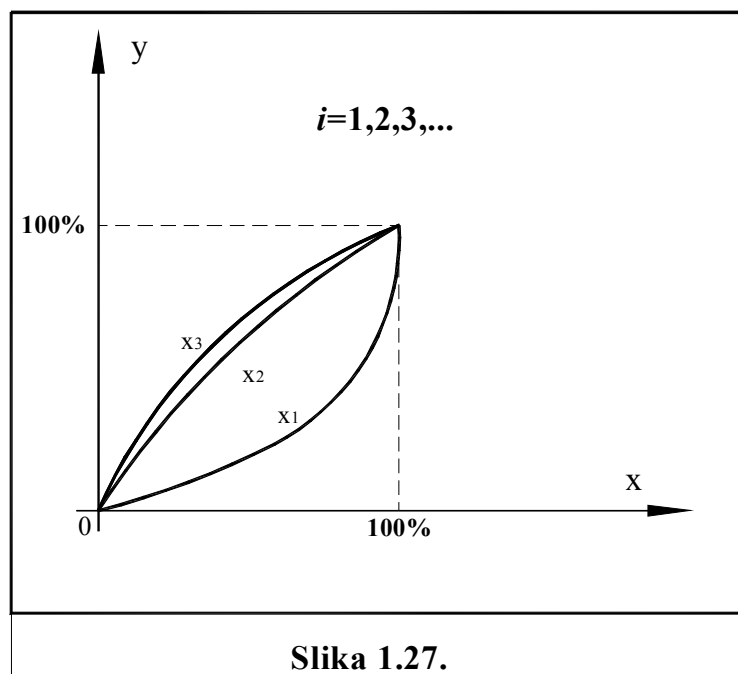
$$k_{ob} = \text{const. za } 0 < y < 100\% \text{ opsega} \quad (1.70)$$

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



Slika 1.26.

Za slučaj jedna ulazna – jedna izlazna veličina snimanje statičkih karakteristika je veoma jednostavno. Ulazna veličina x se mijenja u skokovima Δx unutar puno opsega, te se nakon smirenja prelaznog procesa izvrši očitavanja izlazne veličine.



Slika 1.27.

Pri tome se procedura može i automatizirati. Kao ulazna veličina x se upotrijebi nagibna funkcija koja se istovremeno vodi na x ulaz, a izlazna veličina y na y ulazu xy pisaača. 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 val. Ako je frekvencija trougllog vala previsoka, prividna nelinearnost se manifestira kao histerezis.

Ali, ako je objekat sa čistim kašnjenjem, ova automatizacija mjerenja nije provediva, te se snimanje mora provesti točku po točku sa obveznim čekanjem smirenja prelaznog procesa.

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

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.71)$$

pri čemu je funkcija f nelinearna.

Temelj eksperimentalne identifikacije u ovom slučaju je metod Boks–Vilsona. Ovaj metod omogućava pomoću specijalnog eksperimenta određivanje jednadžbe hiperavni ili hiperpovršine drugog reda koja približno opisuje u objektu stvarno postojeću zavisnost (1.71) u okolini nekog skupa argumenta $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}$ koji se naziva baznom točkom.

Opći vid jednadžbe aproksimirajuće funkcije koja se primjenjuje u metodu Boks–Vilsona je:

$$y_a = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j x_j + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n a_{jk} x_j x_k + \sum_{j=1}^n a_{jj} x_j^2 \quad (1.72)$$

gdje su a_0, a_j, a_{jk} i a_{jj} konstantni koeficijenti koje treba eksperimentom odrediti.

Temeljna primjena metoda je u njegovom korištenju za automatsku **optimizaciju** statičkih stanja objekta. Ovaj metod dozvoljava smanjenje na minimum broja neophodnih eksperimenata zahvaljući tome što se kretanje ka optimumu vrši u smjeru najstrmijeg uspona. Pri tome se radna točka na svakom koraku uzima za baznu točku. Negdje se ovaj metod naziva i metodom najstrmijeg uspona.

Eksperimentalna istraživanja pomoću ovog metoda mogu biti izvršena računalom, koji poslije provedbe eksperimenta, računa jednadžbu aproksimirajuće funkcije u okolini jedne bazne točke, koja odgovara tekućem režimu u objektu, daje upravljačko djelovanje u smjeru

najstrmijeg uspona suglasno s izračunatom jednadžbom. Poslije prelaza u točku, koja odgovara novom režimu u objektu, računalo ponavlja operaciju eksperimenta, računanja aproksimirajuće funkcije i generiranja upravljačkog djelovanja za novi pomak u smjeru najstrmijeg uspona. Na taj način optimizacija se sastoji od niza složenih eksperimenata od kojih svaki kao rezultat daje aproksimirajuću jednadžbu. Ovdje će se razmotriti samo postupak identifikacije, tj. izvedbe eksperimenta, a sam postupak optimizacije nije predmet ovog udžbenika, te će biti razmotren samo općenito.

Kada se pri optimizaciji, radna (bazna) točka eksperimenta priližava optimumu, koeficijenti "a" aproksimirajuće jednadžbe (1.72) postaju sve manji i u točki optimizacije su jednaki nuli.

Kada se eksperimentom, koji će u daljem tekstu biti prikazan detaljno, dobije aproksimirajuća jednadžba y_a , neophodno je razmotriti veličine njezinih koeficijenata. Ako su neki od njih maleni u usporedbi s drugim, to može značiti da je utjecaj odgovarajućeg argumenta neznatan ili po osi toga argumenta objekt se nalazi daleko od uvjetnog ekstrema, te je utjecaj malen samo u nekoj oblasti argumenata. U prvom slučaju je taj argument moguće zanemariti, ali u drugom slučaju se on mora uzimati u obzir u svim sljedećim koracima složenog eksperimenta.

Upravljajuća djelovanja Δx_i , pri kojima se dostiže kretanje u smjeru najstrmijeg uspona (gradijenta), se računaju na temelju koeficijenata aproksimirajuće jednadžbe:

$$\Delta x_i = k \cdot a_i \quad (1.73)$$

gdje je k – konstantni koeficijent, koji ne ovisi od i ; pri traženju maksimuma $k > 0$, a pri traženju minimuma $k < 0$.

Efikasnost metoda se povećava, ako se u oblastima daleko od ekstrema y_a , uzima kao hiperavan, a u oblasti ekstrema kao hiperpovršina.

Primjer hiperavni tri argumenta je:

$$y_a = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (1.74)$$

što je zapravo degenerirani oblik (1.72) gdje su zanemareni svi članovi izuzev prvog i prve sume. Drugi primjer je jednadžba hiperpovršine dva argumenta:

$$y_a = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2 \quad (1.75)$$

gdje su u obzir uzeti svi članovi (1.72).

Sam složeni eksperiment se sastoji od svojih faza – ispitivanja. U slučaju jednadžbe (1.74) svaki složeni eksperiment treba da ima 2^n ispitivanja, a u slučaju aproksimacije pomoću (1.75) složeni eksperiment ima 3^n ispitivanja, gdje je n broj argumenata aproksimirajuće funkcije, a 2, odnosno 3 broj vrijedosti koje se u tijeku eksperimenta zadaju svakom od n argumenata. Dakle, svaki složeni eksperiment u slučaju (1.74) ima $2^3 = 8$ ispitivanja, a u slučaju (1.75) $3^2 = 9$ ispitivanja.³

Računanje se znatno uproštava ako se koordinatni početak prenese u točku, koja odgovara baznim vrijednostima argumenata i ako se usvoje takvi skalni koeficijenti koji prevode vrijednosti argumenata pri eksperimentu na jedinicu. Obje operacije – prenos koordinata i promjena mjerila ispunjavaju se jednadžbom:

$$Z_i = \frac{x_i - x_{i0}}{|\Delta x_i|} \quad (1.76)$$

³ U općem slučaju a^r baza a određena je činjenicom da pravac određuje 2 točke, parabolu 3 točke itd., a eksperiment r je određen brojem argumenata, tj. dimenzijom ulaznog vektora. Očevidno je da (1.74) je linearna, a (1.75) parabolična aproksimacija.

gdje je Δx_i – broj jedinica starog mjerila argumenta x_i koji se u novom mjerilu usvaja za jedinicu.

Jednadžba (1.76) daje:

$$x_i = Z_i |\Delta x_i| + x_{i0} \quad (1.77)$$

te se uvrštavanjem u (1.74) dobije:

$$y_a = b_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 \quad (1.78)$$

gdje su:

$$b_0 = a_0 + a_1 x_{10} + a_2 x_{20} + a_3 x_{30}$$

i

$$b_i = |\Delta x_i| a_i \text{ pri } i \neq 0,$$

odnosno u (1.75):

$$y_a = b_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_{11} Z_1^2 + b_{12} Z_1 Z_2 + b_{22} Z_2^2 \quad (1.79)$$

gdje su:

$$b_0 = a_0 + a_1 x_{10} + a_2 x_{20} + a_{11} x_{10}^2 + a_{12} x_{10} x_{20} + a_{22} x_{20}^2$$

$$b_1 = (a_1 + 2a_{11} x_{10} + a_{12} x_{20}) \cdot |\Delta x_1|$$

$$b_2 = (a_2 + 2a_{22} x_{20} + a_{12} x_{10}) \cdot |\Delta x_2|$$

(1.80)

$$b_{11} = a_{11} |\Delta x_1|^2$$

$$b_{12} = a_{12} |\Delta x_1| \cdot |\Delta x_2|$$

$$b_{22} = a_{22} |\Delta x_2|^2$$

U tijeku eksperimenta argumentima se zadaju različite vrijednosti, po modulu jednake jedinici novog mjerila. Ove vrijednosti se nazivaju operacionim uvjetima. Pri tome se dobivaju u stacionarnom stanju razne vrijednosti funkcije i one se bilježe. Primjerice pri provedbi eksperimenta tipa 2^3 dobiveni podaci se bilježe u Tabelu 4.

Tabela 4.

Broj ispitivanja i	Operacioni uvjeti			Vrijednosti aproksimirane funkcije y_i
	Z_{1i}	Z_{2i}	Z_{3i}	
1	1	1	1	y_1
2	1	1	-1	y_2
3	1	-1	1	y_3
4	1	-1	-1	y_4
5	-1	1	1	y_5
6	-1	1	-1	y_6
7	-1	-1	1	y_7
8	-1	-1	-1	y_8

Koristeći se podacima iz tabele mogu se odrediti koeficijenti po formuli:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^m Z_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^m Z_{ji}^2} \quad \text{za } j = 1, 2, 3 \quad (1.81)$$

gdje je m broj ispitivanja u eksperimentu, tj. $m = 2^3 = 8$. Jednadžba (1.81) je primjenljiva samo u slučaju ako su ispunjeni uvjeti:

$$\sum_{i=1}^m Z_{ji} = 0 \quad \text{za } j = 1, 2, 3 \quad (1.82)$$

i uvjet ortogonalnosti bilo koja dva stupca tablice Z_α i Z_β prema

$$\sum_{i=1}^m Z_{\alpha i} \cdot Z_{\beta i} = 0 \quad (1.83)$$

Nije se teško uvjeriti da su za Tabelu 4. oba uvjeta ispunjena. Primjerice, za Z_1 i Z_2 :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^8 Z_{1i} \cdot Z_{2i} &= 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + 1 \cdot (-1) + (-1) \cdot 1 + \\ &+ (-1) \cdot 1 + (-1) \cdot (-1) + (-1) \cdot (-1) = 0 \end{aligned}$$

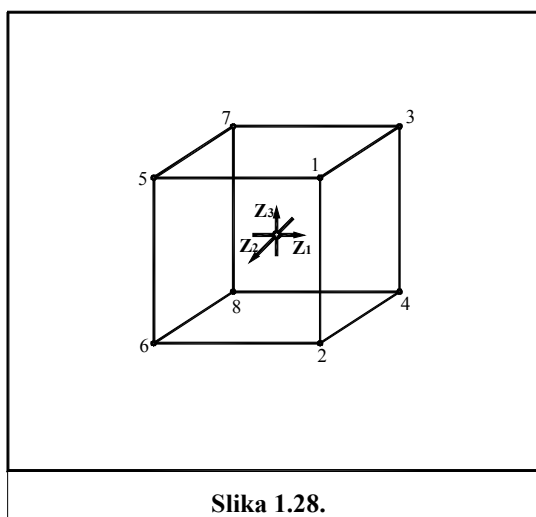
za Z_1 i Z_3 :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^8 Z_{1i} \cdot Z_{3i} &= 1 \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + 1 \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + (-1) \cdot 1 + \\ &+ (-1) \cdot (-1) + (-1) \cdot 1 + (-1) \cdot (-1) = 0 \end{aligned}$$

i za Z_2 i Z_3 :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^8 Z_{2i} \cdot Z_{3i} &= 1 \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + (-1) \cdot 1 + (-1) \cdot (-1) + 1 \cdot 1 + \\ &+ 1 \cdot (-1) + (-1) \cdot 1 + (-1) \cdot (-1) = 0 \end{aligned} \quad (1.84)$$

Na sl. 1.28. pokazana je oblast argumenata u kojoj su njihove vrijednosti označene kružićima za eksperiment 2^3 .



Slika 1.28.

Brojevi uz kružiće označavaju broj istraživanja.

Koeficijent b_0 se određuje kao srednja aritmetička vrijednost koju poprima funkcija za

vrijeme provedbe eksperimenta.

$$b_0 = \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} y_i \quad (1.85)$$

Ako se stvarna funkcija želi aproksimirati paraboličnom hiperpovršinom, tada se provodi eksperiment 3^n . Za slučaj dva argumenta, jednačba (1.79), to je $3^2 = 9$ ispitivanja unutar jednog eksperimenta. Pri ispunjenim uvjetima:

$$\sum_{i=1}^m Z_{1i} = \sum_{i=1}^m Z_{2i} = \sum_{i=1}^m Z_{1i} \cdot Z_{2i} = 0$$

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{1i}^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{2i}^2 = \frac{2}{3} \quad (1.86)$$

tabela operacionih uvjeta je,

Tabela 5.

Broj ispitivanja i	Operacioni uvjeti		Vrijednosti aproksimirane funkcije y_i
	Z_{1i}	Z_{2i}	
1	1	1	y_1
2	1	0	y_2
3	1	-1	y_3
4	0	1	y_4
5	0	0	y_5
6	0	-1	y_6
7	-1	1	y_7
8	-1	0	y_8
9	-1	-1	y_9

a koeficijenti aproksimirajuće funkcije y_a se izračunavaju prema izrazima:

b_1 i b_2 prema jednačbi (1.81),

b_{11} i b_{22} prema

$$b_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(Z_{ji}^2 - \frac{2}{3} \right) y_i}{\sum_{i=1}^m \left(Z_{ji}^2 - \frac{2}{3} \right)} \quad \text{za } j = 1, 2 \quad (1.87)$$

a b_{12} prema

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^m Z_{1i} \cdot Z_{2i} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^m (Z_{1i} \cdot Z_{2i})^2} \quad (1.88)$$

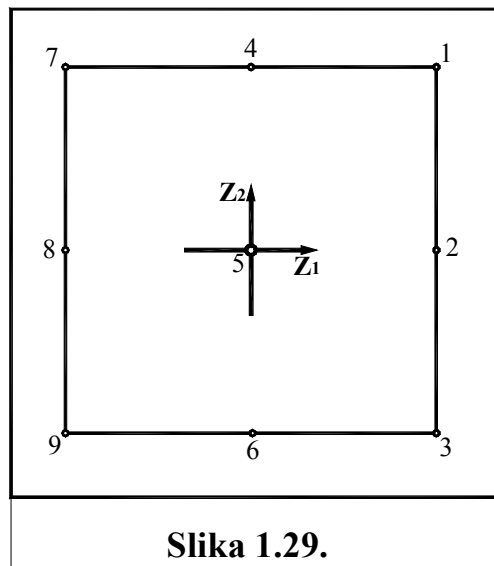
a b_0 prema

$$b_0 = y_{sr} - \frac{2}{3} b_{11} - \frac{2}{3} b_{22} \quad (1.89)$$

gdje je

$$y_{sr} = \frac{1}{3^n} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} y_i \quad (1.90)$$

Odgovarajuća oblast argumenata data je na sl. 1.29.



Slika 1.29.

Očividno je da se broj ispitivanja značajno uvećava sa brojem argumenata, i to eksponencijalno.

Ako je prije provedbe eksperimenta poznato da nema međudjelovanja argumenata, broj ispitivanja u eksperimentu se može skratiti na polovicu i takav eksperiment se naziva djelomičnim eksperimentom.

Djelomični eksperiment, kao i varijanta Boks–Vilsonovog metoda, tzv. evolucioni metod koji je u uporabi, a u slučaju da funkcija ima više od jednog ekstrema, kao i u slučaju da objekt ima izražene šumove, ovdje neće biti prikazani, ali su dati u literaturi [1].

Osnovna prednost ovih metoda identifikacije pri statičkoj optimizaciji u odnosu na klasične metode je u tome što oni dopuštaju istovremenu promjenu svih argumenata, a ne sukcesivno kao kod klasičnih metoda, te se izbjegava mogućnost pogreške, koja se sastoji u tome što se kod klasičnog metoda može pri nailasku na uvjetni ekstrem pojaviti pogrešan utisak da se radi o apsolutnom ekstremu, što je ovdje isključeno.

1.7. METODE FIZIČKOG MODELIRANJA

Postoje slučajevi kada je nemoguće provesti eksperimentiranu identifikaciju objekta, a čisto analitičke metode su neefektivne zbog složenosti objekta.

Primjerice, 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 dijelovi, najprije se razrade u laboratorijskim uvjetima, a zatim se izvedu kao minijaturizirani eksperimentni agregati.

Kako pokazuje iskustvo toga razvoja, pri prelazu od laboratorijske na eksperimentiranu, a također i pri prelazu od eksperimentirane na industrijsku izvedbu agregata, tehnološki proces dobiva nove osobenosti, tj. svakoj izvedbi odgovara različit matematički model.

Zbog toga se ne mogu neposredno koristiti rezultati identifikacije eksperimentiranog agregata za projektovanje sistema upravljanja industrijskim agregatom ili procesom. Međutim, postoji mogućnost da se rezultati identifikacije eksperimentiranog agregata iskoriste, ali putem dopunske obrade, o čemu je u daljem tekstu riječ.

Fizičko modeliranje sastoji se u provedbi eksperimentiranih ispitivanja na modelu u kojem protiču procesi identični po svojoj fizičkoj prirodi procesima u objektu sa preračunavanjem rezultata da se dobiju rezultati koji su adekvatni za realni objekt.

Fizički model mora u određenom smislu odgovarati realnom objektu. Ta korespondencija se naziva sličnost ili podobnost.

Za korištenje fizičkog modeliranja neophodno je raspolagati projektnim podacima o budućem objektu, podacima o materijalima iz kojih se planira graditi objekt, podacima o radnim medijima i njihovim parametrima u različitim točkama objekta. Mora se izučiti kvalitativna strana tehnoloških procesa, da bi bilo jasno kakvi parametri procesa su vezani međusobno, što je važno, a što se može zanemariti.

Ispitivanje karakteristika objekta pomoću fizičkog modeliranja uključuje sljedeće etape:

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

2 – Proračun, projektovanje i izgradnja fizičkog modela objekta.

3 – Provedba eksperimentiranog modeliranja, tj. eksperimentirano ispitivanje na modelu, da bi se dobili podaci za određivanje karakteristika modela, istoimenim karakteristikama objekta.

4 – Izračunavanje karakteristika modela i preračunavanje dobivenih podataka da bi se dobile karakteristike objekta.

Fizičko modeliranje u novije vrijeme je našlo svoju primjenu u mnogim oblastima znanosti i tehnike, posebice u aerodinamici, hidraulici, toplotehnici, kemijskom inženjerstvu, procesnoj tehnici itd. Razvoj ove metode za izučavanje objekata provodi se intenzivno i u današnje vrijeme.

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 protječu tehnološki procesi i

b) podobnost samih tehnoloških procesa.

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

Modeliranje omogućuje promjenu brzine kretanja radnih medija, te usporavanje ili ubrzavanje vremenske skale u modelu u odnosu na objekt. U svrhe udobnijeg promatranja 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 skalnih koeficijenata za sve linearne dimenzije objekta. Ako se neka dimenzija objekta označi sa n_{10} , a analogna dimenzija modela sa n_{1m} , to se uvjet geometrijske sličnosti može zapisati u vidu:

$$\frac{n_{1m}}{n_{10}} = K_l = konst. \quad (1.91)$$

gdje je K_l geometrijski skalni koeficijent.

Osim geometrijske podobnosti, neophodna je i tehnološka podobnost, koja se osigurava jednakošću odgovarajućih potencijskih kompleksa i simpleksa, koji se nazivaju kriterijima podobnosti za odgovarajuće točke 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 skalne koeficijente koji određuju odnose istoimenih parametara modela i objekta. Pretpostavimo da se tehnološki proces u objektu opisuje nekom jednadžbom:

$$F(n_{10}, n_{20}, \dots, n_{j0}, \dots, n_{k0}) = 0 \quad (1.92)$$

gdje su $n_{10}, n_{20}, \dots, n_{j0}, \dots, n_{k0}$ tehnološki parametri (procesne varijable) koji opisuju proces u

objektu.

Proces u modelu se opisuje jednažbom:

$$F(n_{1m}, n_{2m}, \dots, n_{jm}, \dots, n_{km}) = 0 \quad (1.93)$$

gdje su $n_{1m}, n_{2m}, \dots, n_{jm}, \dots, n_{km}$ parametri koji opisuju proces u modelu.

Za neku i -tu točku radnog volumena objekta i za tu istu točku modela može se zapisati:

$$\frac{n_{1im}}{n_{1i0}} = K_{1i}; \dots; \frac{n_{2im}}{n_{2i0}} = K_{2i}; \dots; \frac{n_{jim}}{n_{ji0}} = K_{ji}; \dots; \frac{n_{kim}}{n_{ki0}} = K_{ki} \quad (1.94)$$

gdje su $K_{1i}, K_{2i}, \dots, K_{ji}, \dots, K_{ki}$ skalni koeficijenti.

Skalni koeficijent K_{ji} izabran za neki parametar n_{jm} , mora ostati neizmijenjen za sve točke radnog volumena modela, tj.:

$$K_{j1} = K_{j2} = \dots = K_{ji} = K_{jk} = K_j \quad (1.95)$$

Izbor skalnih koeficijenata osnovnih parametara vrši se na temelju zahtjeva da se dobiju najudobniji uvjeti za eksperiment na modelu.

Skalni koeficijenti za derivacije parametara moraju biti izabrani tako da bude održana podobnost procesa u modelu i procesa u objektu. Za to se koriste bezdimenzioni potencijalni kompleksi – kriteriji podobnosti.

Ograničenje, postavljeno na izbor skalnih koeficijenata u formi kriterija R_i , obično se piše kao:

$$R_i = idem \quad (1.96)$$

Gdje «idem» ima značenje «to isto».

Da se jasnije prikaže smisao toga izraza, razmotrimo konkretni kriterij.

Neka je potrebno održati uvjet:

$$\frac{Fl}{mv^2} = idem \quad (1.97)$$

tada se može zapisati i

$$\frac{F_0 l_0}{m_0 v_0^2} = \frac{F_m l_m}{m_m v_m^2} \quad \text{ili} \quad \frac{K_F K_l}{K_m K_v^2} = 1 \quad (1.98)$$

otkuda slijedi, da ako su bilo koja tri skalna koeficijenta izabrana, tada četvrti ne može biti proizvoljno izabran.

Da se dobije kriterij podobnosti za neki proces, koristi se sljedeći postupak:

Jednažba procesa se transformira u bezdimenzionalni oblik. U općem slučaju potrebno je u tu svrhu podijeliti sa jednim članom sve ostale.

Poslije toga se svaki član razmatra posebice. Veličine koje u njega ulaze se zamjenjuju odgovarajućim skalnim koeficijentima. Dobiveni izrazi su kriteriji podobnosti.

Broj kriterija podobnosti, a također i njihov vid ovisi od fizičke prirode procesa koji protiču u objektu. Pomoću π teoreme Bakingema može se naći broj neovisnih kriterija. Ako se koristi manji broj kriterija, tada podobnost može biti nepotpuna. Suprotno, ako je broj kriterija veći od broja koji diktira teorema, to znači da neki kriteriji nisu neovisni i da se mogu izraziti kroz ostale kriterije, te neophodni broj ograničenja koji se postavlja na skalne koeficijente opet odgovara π teoremi.

Suglasno toj teoremi, broj d kriterija podobnosti je jednak razlici između ukupnog broja parametara c koji karakteriziraju proces i broja f parametara čije dimenzije su neovisne:

$$d = c - f \quad (1.99)$$

Neovisnim se nazivaju one dimenzije, koje ne mogu biti izražene dimenzijama drugih parametara toga procesa, u vidu nekog potencijalnog kompleksa. Na taj način, za određivanje broja kriterija, nije obvezno poznavanje jednadžbi procesa. Potrebno je samo, da se raspolaže podacima o tome, koji parametri karakteriziraju promatrani proces.

Primjerice, fizički proces se karakterizira sljedećim parametrima:

$\lambda [W/m \cdot K]$	– koeficijent termovodljivosti
$\alpha [W/m^2 \cdot K]$	– koeficijent termoprenosa
$\nu [m^2/s]$	– koeficijent kinematičke viskoznosti
$v [m/s]$	– brzina radnog fluida
$l [m]$	– karakteristična geometrijska dimenzija objekta.

U datom slučaju $c = 5$. Nije teško zaključiti da je broj neovisnih dimenzija $f = 3$.

Tako, ako se za neovisne dimenzije uzmu $[m]$, $[m/s]$ i $[W/m \cdot K]$, tada dvije preostale nisu neovisne, jer mogu biti izražene kroz prve tri:

$$[W/m^2 \cdot K] = \frac{[W/m \cdot K]}{[m]} \quad (1.100)$$

$$[m^2/s] = [m/s] \cdot [m]$$

Kriteriji, čiji broj određuje d iz jednadžbe (1.99), mogu imati vid kompleksa i simpleksa.

Količina k kriterija podobnosti, koji imaju vid kompleksa, može se odrediti ako se zna broj r parametara procesa koji su osnovni u apsolutnom sistemu jedinica:

$$k = c - r \quad (1.101)$$

Broj kriterija podobnosti koji imaju vid kompleksa još je lakše odrediti, ako se raspolaže jednadžbom procesa. Taj broj je za jedinicu manji od broja članova jednadžbe, jer pri prevođenju jednadžbe u bezdimenzioni vid jedan od njenih članova postaje jednak jedinici, kao rezultat dijeljenja sa samim sobom.

Na primjeru jednadžbe kretanja sa jednolikim ubrzanjem bit će pokazano određivanje kriterija.

Jednačina je :

$$S = v_0 \cdot t + \frac{at^2}{2} \quad (1.102)$$

gdje su: S – put pređen u vrijeme t ,

v_0 – početna brzina,

a – ubrzanje.

Razdijelivši sve članove sa S dobije se:

$$1 = \frac{v_0 \cdot t}{S} + \frac{at^2}{2S} \quad (1.103)$$

Označe se skalni koeficijenti:

$$K_v = \frac{V_{0m}}{V_{00}}; \quad K_l = \frac{S_m}{S_0}; \quad K_t = \frac{t_m}{t_0}; \quad K_a = \frac{a_m}{a_0} \quad (1.104)$$

Zamijenjivši u svakom članku parametre koji odgovaraju skalnim koeficijentima, dobiju se dva kompleksa:

$$\frac{K_v K_t}{K_l}; \quad \frac{K_a K_t^2}{2K_l}. \quad (1.105)$$

Za realizaciju (**osiguranje**) podobnosti procesa u modelu i procesa u objektu neophodno je osigurati uvjete:

$$\frac{K_v K_t}{K_l} = idem \quad i \quad \frac{K_a K_t^2}{2K_l} = idem \quad (1.106)$$

U ovom slučaju je moguće napisati:

$$\frac{v_{0m} t_m}{S_m} = \frac{v_{00} t_0}{S_0}; \quad \frac{a_m t_m^2}{2S_m} = \frac{a_0 t_0^2}{2S_0} \quad (1.107)$$

U drugom izrazu jednadžbe (1.107) se koeficijent 2 skrati i ne igra ulogu u iznosu za kriterij.

Uvjeti (1.106) ograničavaju proizvoljnost u izboru skalnih koeficijenata. Očividno, ograničenje se sastoji u tome, što se za grupu od tri skalna koeficijenta K_v, K_t i K_l samo dva mogu izabrati proizvoljno, jer se veličina trećeg kruto određuje veličinom ostala dva. Isto se može reći za drugu grupu K_a, K_t i K_l . Pošto su K_t i K_l već izabrani u analizi prvog kriterija, K_a se izračuna iz njih.

Skalni koeficijenti za derivaciju određuju se iz skalnih koeficijenata argumenta i funkcije. Ako je za argumet izabran koeficijent K_x :

$$x_m = K_x \cdot x_0 \quad (1.108)$$

a za funkciju izabran koeficijent K_y , tj.

$$y_m = K_y \cdot y_0 \quad (1.109)$$

tada, uvrštavajući u izraz za derivaciju (1.108) i (1.109), dobije se

$$\frac{dy_m}{dx_m} = \frac{K_y}{K_x} \cdot \frac{dy_0}{dx_0}; \quad \frac{K_y}{K_x} = K_{yx} \cdot \quad (1.110)$$

Analogno tome, za derivaciju n -tog reda:

$$\frac{d^n y_m}{dx_m^n} = \frac{K_y}{K_x^n} \cdot \frac{d^n y_0}{dx_0^n}; \quad \frac{K_y}{K_x^n} = K_{yx^n} \cdot \quad (1.111)$$

Ako funkcija y zavisi od argumenata x i z , tada za miješanu derivaciju vrijedi:

$$\frac{\partial^n y_m}{\partial x_m^r \partial z_m^q} = \frac{K_y}{K_x^r K_z^q} \cdot \frac{\partial^n y_0}{\partial x_0^r \partial z_0^q}; \quad \frac{K_y}{K_x^r K_z^q} = K_{yx^r z^q} \quad (1.112)$$

Odnosi (1.110), (1.111) i (1.112) se koriste kada je neophodno odrediti kriterije podobnosti pomoću diferencijalne jednadžbe. U tom slučaju se derivacije zamjenjuju kompleksima skalnih koeficijenata određenih navedenim izrazima (1.110), (1.111) i (1.112).

Pri ovom metodu modeliranja mogu se pojaviti dva slučaja:

1. Poznat je sistem jednažbi koji opisuje procese u objektu; no, zbog složenosti tog sistema, određivanje karakteristika objekta čisto analitičkim putem je teško. U tom se slučaju, neophodni kriteriji za modeliranje dobijaju na osnovu tih jednažbi.

2. Jednažbe koje opisuju proces u objektu su nepoznate, ali je kvalitativna slika procesa poznata.

Ovaj drugi slučaj je najčešći. Da se odrede skalni koeficijenti, koriste se kriteriji podobnosti koji su karakteristični za neke fizičke pojave.

Neki od tih kriterija imaju specijalne nazive i široko se primjenjuju, npr. pri istraživanju pojava u tečnim medijima, često se koriste Frudov i Rejnoldsov broj, pomoću kojih se određuju skalni koeficijenti brzine:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l} \quad (1.113)$$

gdje je: v – brzina,
 g – ubrzanje sile teže,
 l – odgovarajuća linearna dimenzija.

Frudov broj se primjenjuje u slučajevima kada viskoznost tečnosti ne pokazuje značajan uticaj na ispitivani proces. Ti uvjeti se pojavljuju npr. u vrijeme modeliranja valnog otpora broskog trupa koji plovi. Uvjeti podobnosti se zapisuju u vidu sljedeće jednažbe:

$$\frac{v_m^2}{g_m l_m} = \frac{v_0^2}{g_0 l_0} \quad (1.114)$$

Pošto je $g_m = g_0$, to slijedi:

$$\left(\frac{v_m}{v_0}\right)^2 = \frac{l_m}{l_0} \quad (1.115)$$

tj. pri modeliranju, skalni koeficijent brzine K_v je jednak kvadratnom korijenu geometrijskog skalnog koeficijenta K_l

$$K_v = \sqrt{K_l} \quad (1.116)$$

tj. model, smanjen u odnosu na originalni objekat, mora se kretati sporije od originalnog objekta $\sqrt{K_l}$ puta.

Rejnoldsov broj:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (1.117)$$

gdje je ν koeficijent kinematičke viskoznosti.

Taj kriterij uzima u obzir viskoznost.

Ako je koeficijent viskoznosti u modelu i objektu isti, tada se kriterij podobnosti:

$$\frac{v_m l_m}{\nu_m} = \frac{v_0 l_0}{\nu_0} \quad (1.118)$$

može uprostiti na

$$\frac{l_m}{l_0} = \frac{\nu_0}{\nu_m} \quad (1.119)$$

ili

$$K_v = \frac{1}{K_l} \quad (1.120)$$

otkuda slijedi da, ako je model smanjen u odnosu na objekat, mora se kretati brzinom $1/K_l$ puta većom.

Pri ispitivanju dviju tečnih sredina vezanih s neophodnom podobnošću primjenjuje se Njutnov kriterij:

$$N_e = \frac{F \cdot l}{mv^2} \quad (1.121)$$

gdje je F sila, m masa.

Vrlo je važan u aerodinamici Mahov broj:

$$M = \frac{v}{a} \quad (1.122)$$

gdje je a brzina zvuka, u datoj sredini $a = \sqrt{E/\rho}$, E je modul elastičnosti sredine, a ρ gustina.

Ovaj kriterij omogućava uzimanje u obzir promjenu svojstava medija u odnosu na osnovni režim koji odgovara brzini zvuka.

Pri modeliranju periodičkih pojava, oscilatornih procesa, obrtnih ili sa kretanjima kao klatno, koristi se Struhalov kriterij:

$$S_h = \frac{v}{l \cdot n} \quad (1.123)$$

gdje je n broj periodskih gibanja koji se dešavaju u jedinici vremena.

Kriteriji M i S_h se obično koriste zajedno sa R_e .

Pri modeliranju tokova tečnosti u uvjetima postojanja padova pritiska i kada se ostvaruje prenos tople, koristi se Ojlerov kriterij:

$$E_u = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \quad (1.124)$$

gdje su: Δp = razlika pritiska u dvjema točkama volumena,
 ρ = gustina.

Istraživanja slobodnog kretanja jedne tečnosti u drugoj, osnovana su na kriterijima Galileja:

$$G_a = \frac{gl^3}{v^2} \quad (1.125)$$

i Arhimeda

$$A_r = \frac{gl^3}{v^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (1.126)$$

a gdje je: $\Delta\rho = |\rho_1 - \rho_2|$ (1.127)

ρ_1 = gustina prve tečnosti,
 ρ_2 = gustina druge tečnosti.

Neki kriteriji se sistematski primjenjuju pri modeliranju procesa prenosa toplote.

Proces termičke konvekcije, kao i slobodno kretanje tečnosti rezultat su sile teže. Za modeliranje toga procesa koristi se Grashofov kriterij:

$$G_r = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \beta \Delta T \quad (1.128)$$

gdje su:

$$\beta = \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (1.129)$$

$$\theta = (T - T_1),$$

$$\Delta T = (T_2 - T_1),$$

β – koeficijent širenja po volumenu,

T_1 i T_2 – krajnje granice temperature u razmatranoj oblasti,

T – temperatura u proizvoljnoj točki prostora u K.

Pekleov, Furijeov, Nuseltov kriterij omogućavaju da se načini model koji ima podobnost temperaturnih polja i toplotnih tokova u uvjetima kada su hidraulička i geometrijska podobnost osigurane.

Pekleov kriterij karakterizira prostiranje toplote u tečnosti koja se kreće:

$$P_e = \frac{v \cdot l}{a} \quad (1.130)$$

gdje su:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \text{ – koeficijent temperaturne vodljivosti,}$$

λ – koeficijent toplotne vodljivosti,

c_p – toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku.

Furijev kriterij omogućava osiguranje određene korespondencije među tempom promjene uvjeta u okolnoj sredini i tempom promjene temperaturnog polja u promatranom volumenu:

$$F_0 = \frac{a \cdot t}{l^2} \quad (1.131)$$

gdje je t vrijeme.

Toplotnu izmjenu među tečnošću koja se kreće i čvrstim tijelom karakterizira Nuseltov kriterij:

$$N_u = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (1.132)$$

gdje je α koeficijent toplotne izmjene.

Korespodencija među geometrijskim dimenzijama modela i vremena izučava se preko kriterija homomorfnosti:

$$H_0 = \frac{v \cdot t}{l} \quad (1.133)$$

Fizički model je dinamički sistem koji mora jednoznačno održavati svojstva objekta. Ta korespondencija se definira uvjetima jednoznačnosti, karakter koji ovisi od procesâ u objektu koji se žele ispitivati. Među najrasprostranjenije uvjete jednoznačnosti spadaju: geometrija objekta, vidovi radnih sredina u kojima se dešavaju procesi, parametri radnih sredina u radnom volumenu i na granicama objekta, početni uvjeti parametra, materijali od kojih je izgrađen objekat itd.

Suglasno jednoj od teorema teorije podobnosti, fizički model će biti podoban objektu ako je za model i objekat osigurana podobnost uvjeta jednoznačnosti, a također i brojčano jednaki kriteriji podobnosti koji su izvedeni iz uvjeta jednoznačnosti.

Na taj način izgradnja fizičkog modela, geometrijski podobnog objektu, sa procesom koji

ima istu fizičku prirodu kao i proces u objektu, je neophodan, ali ne i dovoljan uvjet za provedbu eksperimenta. Geometrijskom podobnošću može biti npr. osigurana podobnost diferencijalnih jednadžbi objekta i modela. Ali jedna te ista diferencijalna jednadžba ima različita rješenja u ovisnosti od graničnih uvjeta, te se mora voditi računa o njima i pri fizičkom modeliranju, jer model je «neka vrsta računске mašine» koja treba da da rješenje jednadžbe koja se tiče objekta.

Granični uvjeti uključuju u sebe početne uvjete, tj. polja fizičkih parametara u početnom trenutku ispitivanja i krajnje uvjete, tj. promjenu fizičkih polja u vremenu na dijelu objekta na kome se događa uzajamno djelovanje objekta i okoline koja ga okružava.

Za osiguranje podobnosti neophodno je da se za vrijeme cijelog eksperimenta održi podobnost graničnih uvjeta.

Jedna od teškoća koja se javlja pri projektovanju modela je protivrječnost zahtjeva koje postavljaju neki od kriterija podobnosti. Tako, upoređujući jednadžbe (1.116) i (1.120), vidi se da oba ova zahtjeva u općem slučaju nije moguće jednovremeno zadovoljiti. Zato nema druge mogućnosti nego se pomiriti sa činjenicom da nije moguće osigurati zadovoljenje svih kriterija, nego treba izabrati kriterij koji je u tom konkretnom slučaju bitniji, te njega zadovoljiti. Na primjer, za kriterije F_r i R_e vrijedi preporuka da se razmotri utjecaj viskoznosti na proces i, ako je ona malena, upotrebljava se F_r , a ako je značajna R_e .

Skalni koeficijenti moraju biti jednaki za sve točke radnog volumena modela. To također nije moguće u potpunosti osigurati. Pri hidrauličkim ispitivanjima na smanjenim modelima dešava se da turbulentna tečenja u objektu postaju laminarna u modelu. Da bi se «turbilirali» protoci u modelu, koriste se različiti skalni koeficijenti u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Horizontalno se model smanjuje više nego vertikalno, tj.:

$$K_{lv} > K_{lh} \quad (1.134)$$

K_{lv} – vertilani geometrijski skalni koeficijent,

K_{lh} – horizontalni geometrijski skalni koeficijent.

Još teže je održati postojanost skalnih koeficijenata u vremenu.

Pri realizaciji fizičkog modela u uvjetima kada ne postoje jednadžbe procesa koji se dešava u objektu, dodatna teškoća proizilazi iz neophodnosti pravilne ocjene najvažnijih faktora koji utječu na proces, zanemarivanja onih od drugostepenih važnosti i pravilnog izbora kriterija podobnosti.

Ako je fizički model objekta sačinjen, tada je sljedeći korak identifikacije toga modela, koja se može provesti nekim od postupaka opisanih u ovoj glavi.

Eksperimentirani podaci dobiveni sa modela se obrađuju i sastavlja se matematički model u vidu jednadžbi ili nejednadžbi.

Matematički opis modela je polazni materijal iz koga se dobiva matematički opis objekta. U svrhu toga preračunavanja jednadžbi, nejednadžbi, tabela i grafova koji opisuju model, koriste se jednadžbe koje nije teško dobiti iz (1.94). Tako, za neki tehnološki parametar može se napisati:

$$n_{j0} \cdot K_j = n_{jm} \quad (1.135)$$

Ako je model opisan jednadžbom koja povezuje tehnološke parametre $n_{1m}, \dots, n_{jm}, \dots, n_{km}$:

$$F(n_{1m}, \dots, n_{jm}, \dots, n_{km}) = 0 \quad (1.136)$$

Tada se u toj jednadžbi zamijene svi argumenti n_{jm} sa $(n_{j0} \cdot K_j)$ i dobije se

$$F(n_{10} \cdot K_1, \dots, n_{j0} \cdot K_j, \dots, n_{k0} \cdot K_k) = F^*(n_{10}, \dots, n_{j0}, \dots, n_{k0}) = 0 \quad (1.137)$$

Ova jednadžba je matematički model objekta koji vrijedi sukladno s ograničenjima prema

kojima je građen model.

Ako jednačba modela ima derivacije, tada se za pretvaranje koriste skalni koeficijenti prema (1.110) do (1.112).

Pri određivanju opisa objekta upravljanja, najčešći slučaj je kada matematički opis modela, dobiven kao rezultat eksperimenta, povezuje ne sve, nego samo neke parametre od kojih ovisi proces u objektu. U tim uvjetima će matematički opis modela, nađen eksperimentalno, imati traženu točnost samo pri određenim ograničenjima postavljenim na parametre koji ne ulaze u nađeni matematički opis.

Ako npr. matematički opis modela ima potrebnu točnost pri uvjetu da nekom parametru n_{jm} modela odgovara nejednačba:

$$a_{jm} < n_{jm} < b_{jm} \quad (1.138)$$

tada iz jednačbe (1.135) se dobije

$$a_{jm} < n_{j0} \cdot K_j < b_{jm} \quad (1.139)$$

otkuda nije teško odrediti da matematički opis objekta pri promjeni parametara n_{j0} u oblasti

$$a_{j0} \leq n_{j0} \leq b_{j0} \quad (1.140)$$

gdje je

$$a_{j0} = \frac{a_{jm}}{K_j}; \quad b_{j0} = \frac{b_{jm}}{K_j}; \quad (1.141)$$

osigurava istu relativnu točnost, kao matematički opis modela pri pridržavanju uvjeta (1.138).

U slučajevima, kada se izučavaju procesi u objektu koji su veoma složeni za fizičko modeliranje, a neophodno ih je točno ispitati, objekt se uvjetno dijeli na prostije dijelove koji se neovisno modeliraju, a opći opis objekta se dobiva čisto analitičkim putem, prema opisu pojedinih dijelova.

1.8. IZBOR METODA EKSPERIMENTNE IDENTIFIKACIJE

Pokazan je određeni broj metoda za eksperimentnu identifikaciju i kao prirodno pitanje se postavlja problem odluke u trenutku kada se mora prići objektu i identificirati ga.

Sama činjenica da je metoda mnogo i da su sve razvijene do praktičke uporabljivosti, navodi na zaključak da nijedna od njih nije univerzalna u tolikoj mjeri da bi mogao isključiti ostale iz izbora. Svaka metoda ima jednu oblasti primjene gdje je nadmoćna, a kriterijumi izbora su upravo primjenjivost i ograničenja na primjenjivost. Oblast primjene se preklapa, te je u slučaju moguće uporabe dvije ili više metoda, presudna efikasnost metoda u smislu bržeg dobivanja rezultata, niže cijene eksperimenta, što manje količine instrumentacije, koja se mora uporabiti i sl.

Jedan od putova razmišljanja bi mogao biti ovaj:

1. Ako objekt fizički ne postoji, nego samo projektno, jedino što preostaje je metoda matematičkog ili metoda fizičkog modeliranja.

2. Ako objekt fizički postoji – izgrađen i dostupan, bira se jedna od eksperimentalnih metoda.

3. Ako je objekt dopušteno promatrati, ali ne i djelovati na njega, mora se uporabiti pasivna metoda, ali ta pogodnost što objekt neće biti ometen u radu ispitnim smetnjama, skupo se plaća glomaznom obradom rezultata eksperimenta i složenošću aparature za tu obradu.

4. Ako je na objekt dopušteno djelovati aktivnim utjecajima u vidu ispitnih funkcija, a zadovoljavaju aproksimativni rezultati (objekt višeg reda se tretira kao objekt prvog reda sa čistim kašnjenjem) i pri tome objekt podnosi trajnu ispitnu smetnju, malene amplitude, koja daje odziv koji je moguće separirati od šumova – prirodno je uporabiti metodu skokovite 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 dopušta trajni karakter ispitne funkcije – upotrebljava se impulsna ispitna funkcija.

6. Ako se traži točna dinamička identifikacija objekta koji podnosi aktivno djelovanje ispitnih funkcija, preostaje harmonijska metoda koja točne rezultate plaća dosta složenom obradom rezultata mjerenja, dugotrajnim mjerenjima, složenom opremom koja učestvuje u eksperimentu.

7. Ako je cilj identifikacije dobijanje polaznih podataka za podešenje 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 Šinski, jedan od cijenjenih autora – praktičara u tehnici upravljanja tehnoloških procesa. On kaže:

«Koncem 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 dobivena korištenjem te metode, dvije glavne prepreke su se pojavile:

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

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

Druga prepreka indicira da rezultati testa na procesima sa nelinearnim elementima mogu biti ne samo netočni i nevrijedni, nego i mogu dovesti projektanta u značajnu tehničku zabludu. Frekventne metode eksperimentne identifikacije procesa su pogodne samo za brze linearne objekte, kao što su instrumenti, regulatori, pojačala itd.

Bio sam pozivan mnogo puta da interveniram 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 neovisna od nelinearnosti, koja će dati da se identificiraju dominantna svojstva sistema. Dobro vođen eksperiment ukazat će na probleme bez velikog ometanja procesa.

Da se eksperimentiranje održi na minimalnom obimu, sva znanja o procesu moraju biti iskorištena. Volumeni posuda i protoci su uvijek poznati od kuda se mogu izračunati vremenske konstante. Dužina i dijometri 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 i promatrajući posude i cjevovode, istražujući u procesu uključenu fiziku i kemiju i razgovarajući sa operatorima.

Preliminarne informacije dobivene na taj način su od neočekivano velike koristi, jer indiciraju šta promatrati i gdje. Iznenađujuće je, koliko mnogo može, često biti naučeno o određenom procesu čak i ne čineći nikakav eksperiment. Ponekad eksperiment neće potvrditi očekivanja, što ipak ne opravdava napuštanje postupka preliminarnog upoznavanja procesa prije bilo kakvog zahvata».

Nakon ovoga izlaganja autor preporučuje metodu identifikacije opisanu u 1.5.