

UPRAVLJAČKE KONTURE SA DOPUNSKIM INFORMACIJAMA

UVOD

Osnovni razlog koji ograničava brzinu djelovanja regulatora, a samim tim i tačnost regulisanja je inercionost objekta kao i kašnjenja bilo kojeg tipa unutar konture. Povećanje tačnosti regulisanja putem uvećavanja koeficijenta pojačanja regulatora nije moguće s obzirom na ograničenja koja diktira unaprijed zadata relativna stabilnost konture.

Problem povećanja tačnosti rada, sistema u tim uslovima može biti riješen putem odgovarajućeg usložnjavanja zakona upravljanja u regulatoru (dodatno diferenciranje, uvođenje specijalnih nelinearnih veza itd). Međutim, u praksi automatizacije tehnoloških procesa do danas se primjenjuju skoro isključivo nekoliko najprostijih zakona upravljanja koji su ranije razmotreni. To se objašnjava prije svega veoma oštrim zahtjevima koje tehnika eksploatacije sistema automatskog upravljanja nameće u pogledu jednostavnosti, pouzdanosti i prostoće podešavanja aparatura od kojih se sintetišu upravljački sistemi. Zato se, u slučajevima kada prosta jednokonturna šema ne može obezbijediti neophodnu tačnost pri korišćenju najprostijih zakona upravljanja ne ide na usložnjavanje tih zakona nego na usložnjavanje šema regulisanja. Taj put je opravdan i time što se realizacija složenijih struktura može ostvariti i bez povećanja nomenklature aparata što omogućava ostvarenje automatizacije složenih procesa na osnovu relativno malog broja tipičnih aparatura.

Navedeni problem sa proširenjem nomenklature upravljačkih algoritama je prevaziđen upotrebom digitalnih višekonturnih upravljačkih stanica unutar kojih se na jedinstvenoj opremi softverskim putem lagano organizuje bilo koji upravljački funkcionalni algoritam. Na primjer, promjena i usložnjavanje algoritma sa PID na PID kod koga je u kanalu proporcionalne obrade signala kvadrat greške ili na PID kod koga je u kanalu integralne obrade kvadrat greške ili prelaz na bilo koji drugi algoritam iz repertoara unaprijed smještenog u permanentnu memoriju stanice izvodi se davanjem jedne instrukcije koju bira algoritam u stanici.

Ali i u tom slučaju, bez obzira na fleksibilnost izbora i broja algoritama kojima raspolaže repetoar digitalnog regulatora, postoje određena ograničenja za primjenu različitog od klasičnog PID:

- najveća i najegzaktnija znanja kojima raspolaže projektantski i operativni personal vezana su za PID algoritam, jer je taj algoritam zasnovan na linearnoj teoriji automatskog upravljanja, te se najveća sigurnost u primjeni odnosi upravo na njega. Ostali algoritmi se koriste restriktivno i naknadno i uglavnom podešavaju eksperimentalno, nakon što je kontura podešavanja PID algoritma dovedena na maksimalni kvalitet koji je njime moguće dostići, sa nadom da se drugim algoritmima eventualno nešto i bolje postigne nego što je moguće sa PID algoritmom;

- ideja složenih kontura se sa informacionog aspekta svodi na povećanje količine informacija koje regulator dobija sa objekta. Regulatoru se dovode informacije koje dopunjavaju one informacije koje regulator prima u jednokonturnoj šemi. Obično se to svodi na davanje regulatoru informacija koje su više aktuelne sa vremenskog stanovišta (manje zakašnjele) nego one koje daje mjerenje regulisane veličine i formiranje greške poslije komparacije sa zadatom vrijednošću. A dovođenje povećanog prirodnog informacionog sadržaja koji ima kvalitet predikcionih karakter, uvijek je vezano sa manje teškoća i većim kvalitetom predikcionih informacija nego što je generisanje tih informacija u digitalnom regulatoru.

To je i osnovni razlog što su i nakon pojave digitalnih regulatora konture sa dopunskim informacijama i dalje veoma aktuelne, jer se praksa ne odriče strukturnih metoda za poboljšanje kvaliteta konture.

Dva su glavna tipa složenih kontura:

1.- kada u objektu postoji mogućnost kontrole nekih pomoćnih koordinata, koje se odzivaju na smetnje sa manjim kašnjenjem nego osnovna regulisana veličina (nekada su te veličine i same smetnje, ako su mjerljive).

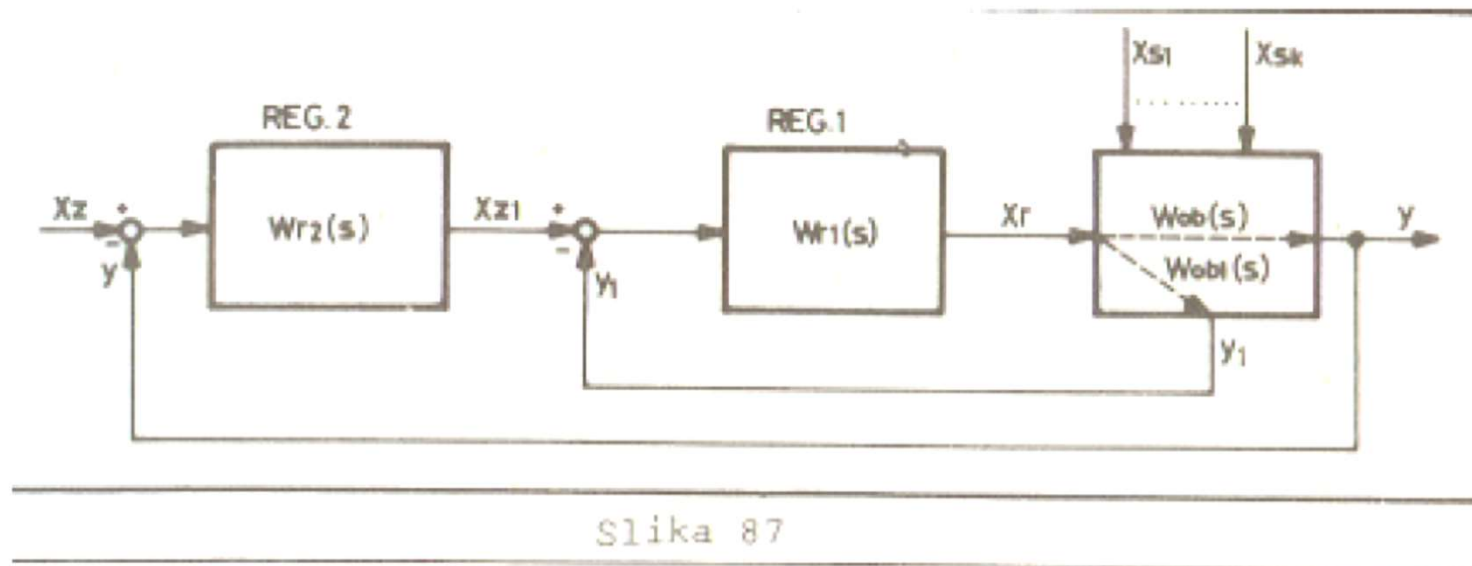
2.- kada objekat napadaju velike, mjerljive smetnje - informacije o tim smetnjama se uvode po posebnom informacionom kanalu.

Prvi tip šema se naziva **KASKADNIM** tipom, a drugi tip se naziva **UPRAVLJANJE PO SMETNJI**. Kao što će kasnije biti pokazano, u ove druge spadaju i šeme upravljanja objektima sa medjuvezanim koordinatama.

KASKADNE ŠEME

Jedna od rasprostranjenih šema regulisanja medju složenijim strukturama je šema u kojoj se uvodi dopunska stabilizacija neke pomoćne veličine dopunskim regulatorom.

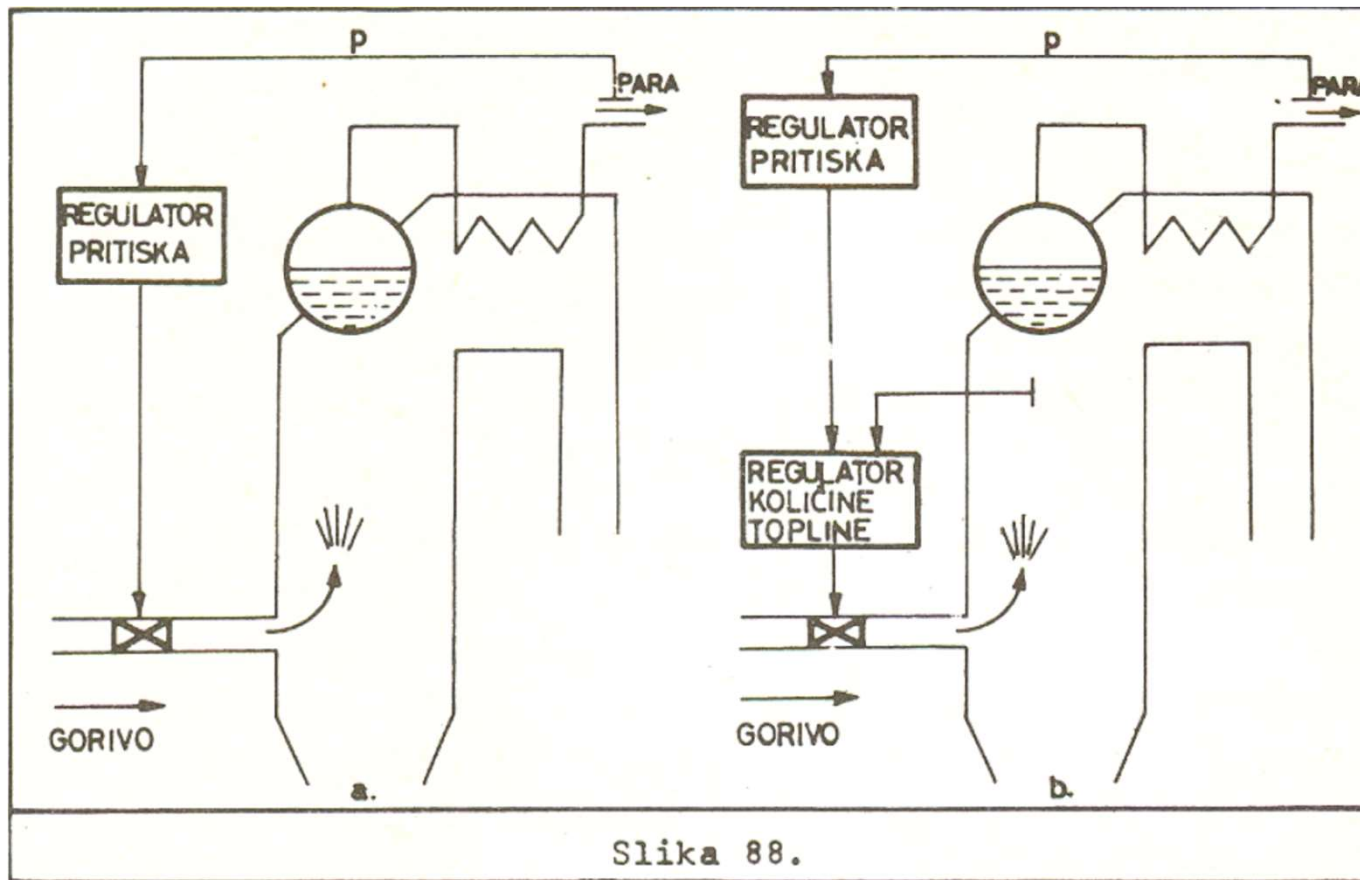
Strukturna šema takvog sistema je pokazana na sl. 87.



Ovdje se regulisanje rada objekta sprovodi sa dva regulatora pri čemu **REG 2** koji kontroliše osnovnu regulisanu veličinu y pri njenom odstupanju od zadate vrijednosti djeluje ne na izvršni organ objekta nego na pomoćni regulator **REG 1** dajući mu zadatu vrijednost. Taj regulator održava na zadatoj vrijednosti neku pomoćnu veličinu y_1 uzetu iz neke medjutačke regulisanog objekta. Pri tome se često može pokazati da uvođenje pomoćnog regulacionog kruga nije neophodno po rad sistema u cjelini, međjutim, njegovo uvođenje, u pravilu, daje mogućnosti za značajno povećanje tačnosti rada i kvaliteta regulisanja. Ove šeme su posebno efikasne u slučajevima kada na objekat djeluju velike smetnje na strani izvršnog organa, a pomoćna regulisana veličina se odziva na te smetnje sa znatno manjim kašnjenjem i inercionošću nego osnovna regulisana veličina.

Prema tome, da bi kaskadna regulacija uopšte imala smisla potrebno je naći pomoćnu veličinu koja je na pogodan način korelirana sa glavnom regulisanom veličinom, a da bi šema dobro radila potrebno je da pomoćna veličina ispunjava uslov koji traži njen brži odziv na smetnju u odnosu na brzinu odziva glavne regulisane veličine.

Na pr. takvo regulisanje je korisno primjeniti na regulisanje pritiska na parnom kotlu, ako se u njegov gorionik uvodi gorivo kod koga se mogu desiti nagle izmjene kvaliteta (kalorične moći). U tom slučaju, umjesto jednokonturne sheme (sl.88a) se upotrebljava dvokonturna (sl.88.b) sa stabilizacijom pomoćne veličine - u ovom slučaju količine toplote u gorioniku.



Zadata vrijednost količine toplote se određuje u svakom trenutku regulatorom pritiska.

U ovoj šemi poslije pojave smetnje sa strane goriva, vrlo brzo sa vrlo malim kašnjenjem dolazi do promjene količine toplote razvijene u gorioniku što se vrlo brzo izreguliše regulatorom količine toplote. Pošto je inercionost objekta u ovoj konturi (gorivo - gorionik - količina toplote) relativno neznatna u odnosu na objekat (gorivo - gorionik - količina toplote - temperatura vode - pritisak pare) u glavnoj konturi, brzina ovog regulisanja je tako, relativno velika. Zato se kao rezultat stabilizacije procesa gorenja na smetnje od strane goriva dobija veoma malo djelovanje te iste smetnje na glavnu regulisanu veličinu - pritisak pare.

S druge strane, pri pojavi drugih smetnji (promjena opterećenja potrošnja pare i sl.) regulator na odgovarajući način mjenja količinu toplote koja treba da se razvija u gorioniku i time vraća pritisak na zadatu vrijednost.

U skladu sa tim, regulator koji stabilizuje pomoćnu veličinu naziva se **stabilizacioni**, a onaj koji mu koriguje zadatu vrijednost naziva se **korekcioni** regulatorom.

Podešavanje regulatora u kaskadnoj strukturi

U opštem slučaju određivanje optimalnog podešavanja kaskadnih šema je vrlo komplikovan postupak. Na pr. u slučaju koji je opisan u prethodnom članu, za dva PI regulatora postoje četiri stepena slobode za podešavanje, te se zadatak podešavanja može uspješno i sigurno riješiti samo uz primjenu računara.

Medjutim, najčešće je moguće postupiti podešavanju približnim metodama od kojih svaka pristupa problemu sa istog stanovišta - pretpostavlja se mogućnost proračuna jedne konture nezavisno od druge. U opštem slučaju, to se čini kao prethodna analiza prije pristupa računarskoj obradi, ali se u većini praktičnih slučajeva sa dovoljnim stepenom tačnosti na tom približnom postupku može i ostati. Posebno u dva slučaja:

1.- U radu regulacionog sistema moguće je na kratko vrijeme isključenje korekcionog regulatora te se stabilizacioni podesi kao samostalan. Nakon toga se podesi korekcionog regulator koji u tom slučaju kao objekat osjeća cijeli ostatak strukture uključujući i već podešeni stabilizacioni regulator.

2. - Kada se inercionost stabilizacione konture može smatrati znatno manjom nego što je inercionost glavne konture. U tom slučaju prelazni procesi stabilizacione konture se praktično potpuno smire prije nego se pojave u glavnoj konturi. Tada je moguće sprovesti podešavanje jednog regulatora nezavisno od drugog. Ako se prisjetimo da se dvokonturna kaskadna regulacija najčešće primjenjuje tada kada je inercionost stabilizacione konture vrlo mala - tada se može sagledati važnost ovog slučaja za praksu

1. SLUČAJ:

Podešavanje se može sprovesti slijedećim redom:

1. Po amplitudno-faznoj karakteristici objekta $\mathbf{W}_{ob1}(j\omega)$ koja vezuje pomoćnu regulisanu veličinu \mathbf{y}_1 i regulacionu veličinu \mathbf{x}_r pronadje se običnim postupkom optimalna podešenost stabilizacionog regulatora uz pretpostavku da je korekcionni regulator isključen.

2. Odredi se optimalna podešenost korekcionnog regulatora. Pri tome se smatra da pod objekat spada cijeli sistem koji u sebe uključuje i stabilizacioni regulator.

Zato je potrebno prije svega konstruisati: karakteristiku toga složenog objekta $\mathbf{W}_{obe2}(j\omega)$ za taj regulator. Prenosna funkcija toga ekvivalentnog objekta se nadje iz slijedećeg sistema jednačina koji opisuje sl. 87.

$$Y(s) = W_{ob}(s) \cdot X_r(s)$$

$$X_r(s) = W_{r1}(s) \cdot [X_{z1}(s) - Y_1(s)]$$

$$Y_1(s) = W_{ob1}(s) \cdot X_r(s)$$

Eliminišući $X_r(s)$ i $Y_1(s)$ dobije se

$$\frac{Y(s)}{X_{z1}(s)} = W_{obe2}(s) = \frac{W_{ob}(s) \cdot W_{r1}(s)}{1 + W_{ob1}(s) \cdot W_{r1}(s)}$$

Ako se prenosna funkcija stabilizacionog regulatora REG1 predstavi u vidu $W_{r1}(s) = k_{r1} W'_{r1}(s)$ gdje je k_{r1} pojačanje tog regulatora – tada se poslednja jednačina može pisati kao

$$W_{obe2}(s) = \frac{W_{ob}(s) \cdot W'_{r1}(s)}{\frac{1}{k_{r1}} + W_{ob1}(s) \cdot W'_{r1}(s)}$$

Iz poslednje jed. slijedi da za konstruiranje $W_{obe2}(j\omega)$ prije svega treba nacrtati $W_{ob}(j\omega) \cdot W'_{r1}(j\omega)$ i $W_{ob1}(j\omega) \cdot W'_{r1}(j\omega)$ i zatim iz te dvije karakteristike odrediti W_{obe2} kao količnik dijeljenja vektora amplitudno-fazne karakteristike $W_{ob}(j\omega) \cdot W'_{r1}(j\omega)$ (vektor od koordinatnog početka do tačke na karakteristici za određenu frekvenciju) sa vektorom $W_{ob1}(j\omega) \cdot W'_{r1}(j\omega)$ (vektor od tačke $1/k_r$ na negativnoj realnoj osi do tačke na karakteristici za određenu frekvenciju ω).

Poslije određivanja karakteristike $W_{obe2}(j\omega)$ dalji postupak za određivanje podešenosti korekcionog regulatora REG 2 je standardan, kao za jednokonturnu šemu.

2 SLUČAJ

Ako je inercionost objekta s obzirom na pomocnu varijablu znatno manja nego s obzirom na glavnu varijablu, tada se brzina regulatora REG 1 može načiniti znatno većom nego brzina REG2. U vezi s tim, promjena zadate vrijednosti regulatora REG 1 - x_{z1} je vrlo spora što praktično znači da taj regulator održava veličinu x na konstantnoj vrijednosti, tj. u prvoj aproksimaciji može se obzirom na prelazne pojave u glavnoj regulacionoj konturi smatrati da je

$$y_1 \approx x_{z1}$$

Tada se ekvivalentna prenosna funkcija objekta s obzirom na regulator REG2 može naći iz sistema jednačina

$$Y_1(s) = W_{ob1}(s) \cdot X_r(s)$$

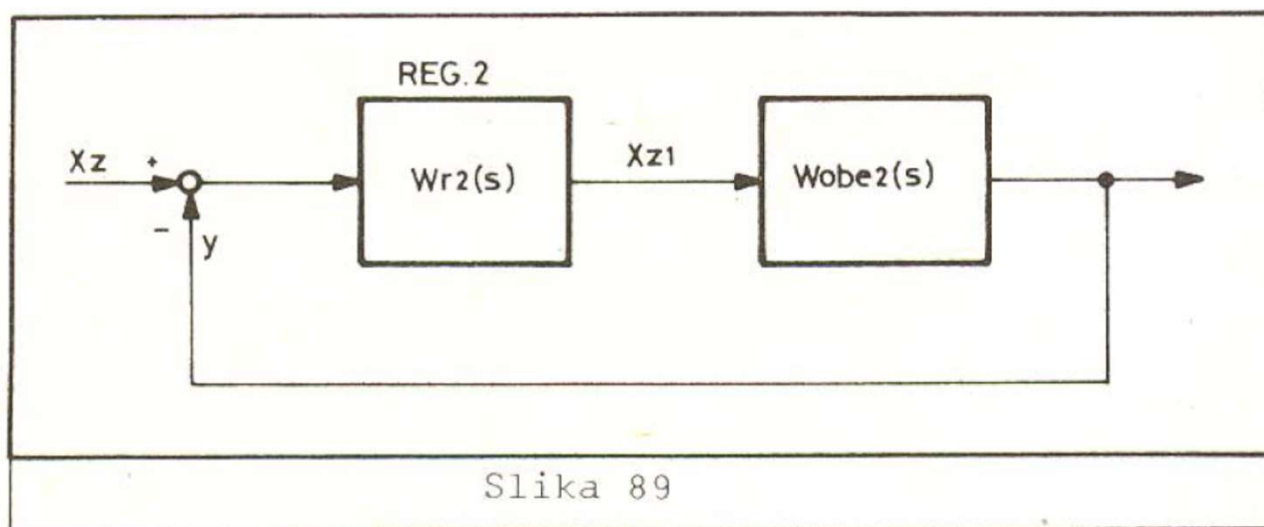
$$Y(s) = W_{ob}(s) \cdot X_r(s)$$

$$Y_1(s) = X_{z1}(s)$$

Eliminisanjem $X_r(s)$ i $Y_1(s)$ dobije se

$$\frac{Y(s)}{X_{z1}(s)} = W_{obe2}(s) \approx \frac{W_{ob}(s)}{W_{ob1}(s)}$$

U tom slučaju strukturna šema sa sl.87. može se zamjeniti približnom šemom jednokonturnog sistema sa jednim korekcionim regulatorom REG 2 i objektom sa prenosnom funkcijom $W_{obe2}(s)$.



Približnost šeme 89. realnoj situaciji određena je približnošću koja zahtijeva da su prelazni procesi stabilizacione konture mnogo kraći od prelaznih procesa glavne konture.

Poslije određivanja optimalne podešenosti korekcionog regulatora REG 2 po amplitudno faznoj karakteristici $W_{obe2}(s)$ nalazi se optimalna podešenost stabilizacionog regulatora **REG 1**.

Prenosna funkcija ekvivalentnog objekta za taj regulator se određuje na osnovu sl. 87.

$$W_{obe1}(s) = W_{ob1}(s) + W_{ob}(s)W_{r2}(s)$$

Nacrtavši amplitudno-faznu karakteristiku ekvivalentnog objekta može se običnim postupkom odrediti optimalna podešenost stabilizacionog regulatora REG 1.

Preporučuje se sledeći postupak proračuna:

1. Iz zadatih amplitudno faznih karakteristika objekta $W_{ob1}(s)$ i $W_{ob}(s)$ crta se amplitudno fazna karakteristika $W_{obe2}(j\omega)$ za regulator **REG 2**. Za to treba svaki vektor karakteristike $W_{ob}(j\omega)$ podjeliti odgovarajućim vektorom $W_{ob1}(j\omega)$ za odgovarajuću frekvenciju.
2. Iz nađene amplitudno-fazne karakteristike $W_{obe2}(j\omega)$ nalazi se optimalna podešenost korekcionog regulatora **REG 2** standardnim postupkom.
3. Crta se amplitudno-fazna karakteristika $W_{ob}(j\omega) \cdot W_{r2}(j\omega)$ poslije čega primjenjući pravilo paralelograma za sabiranje vektora, nalazimo karakteristiku ekvivalentnog objekta $W_{ob1}(j\omega) + W_{ob}(j\omega) W_{r2}(j\omega)$ za regulator **REG 1**.
4. Iz nađene karakteristike $W_{obe1}(j\omega)$ nalazi se optimalna podešenost stabilizacionog regulatora **REG 1**.

Šema sa uvođenjem diferenciranja – pomoćne veličine

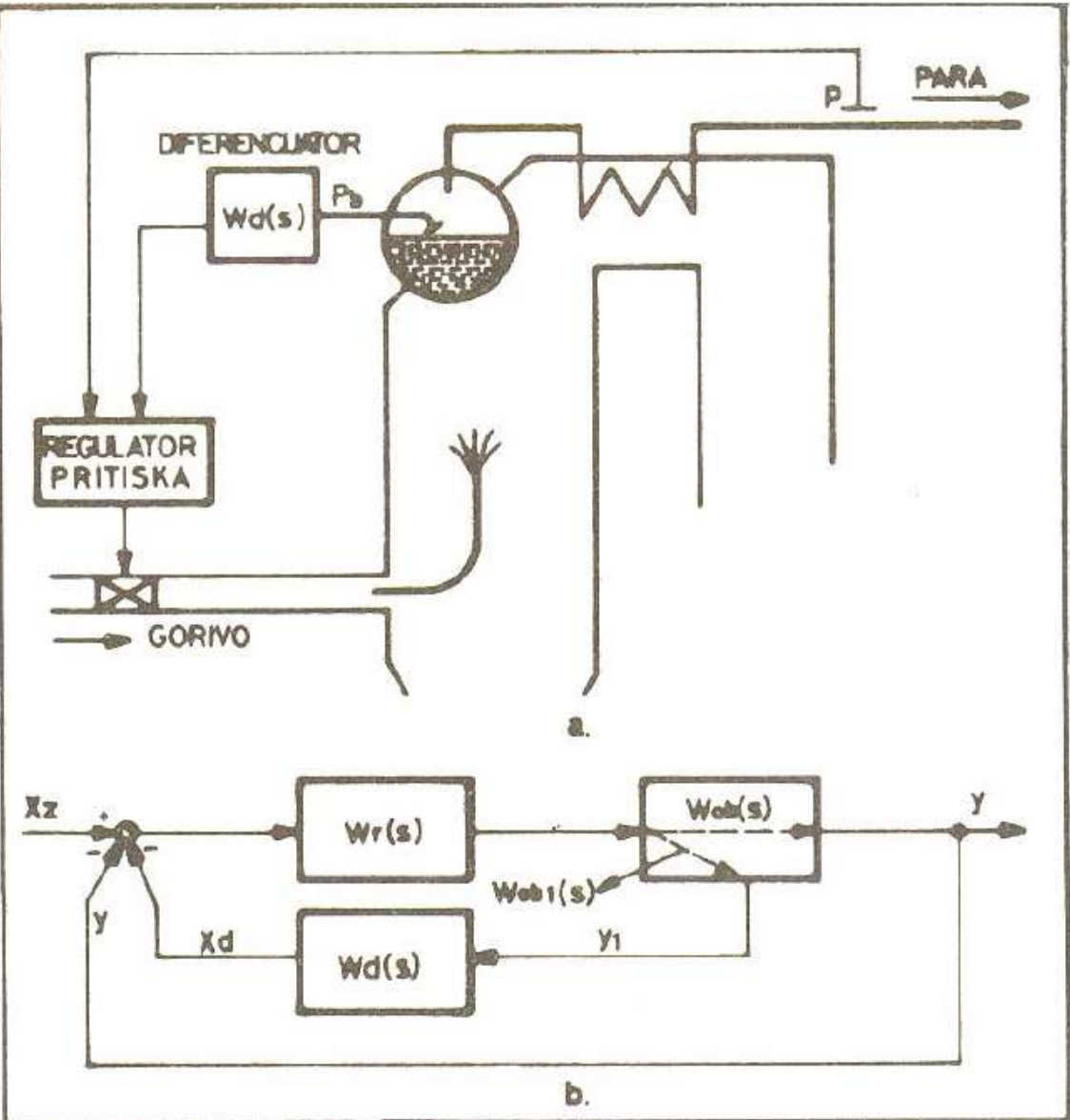
Uopšteno govoreći šema sa uvođenjem diferencijala pomoćne veličine se može razmatrati kao specijalni slučaj šeme za kaskadnu regulaciju. Jedina razlika je u činjenici što se stabilizacioni regulator zamjenjuje blokom diferenciranja (realni diferencijator)

$$W_d(s) = \frac{k_d T_d \cdot s}{T_d \cdot s + 1}$$

Idealni diferencijator $k_d T_d \cdot s$ se ne koristi zbog poznate činjenice da diferencijator izuzetno ističe uvijek prisutni šum na korisnom signalu. Oblast primjene ovih struktura sa diferenciranjem pomoćne veličine je identična onoj za kaskadnu regulaciju sa napomenom da je upotreba diferencijatora i jeftinija nego primjena stabilizacionog regulatora.

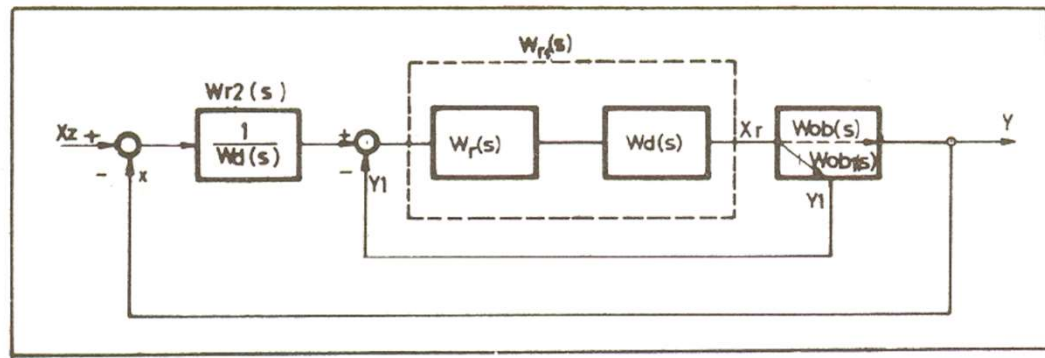
Diferenciranje, a ne proporcionalna funkcionalnost se koristi zato što u stacionarnom stanju uticaj pomoćne regulisane veličine treba da iščezne (u protivnom slučaju regulator bi održavao glavnu regulisanu veličinu ne na zadatoj vrijednosti nego na sumi zadate i pomoćne regulisane veličine).

Sa te tačke gledišta diferenciranje je ovdje (za razliku od uvođenja diferenciranja u zakon regulisanja) potrebno ne za poboljšanje dinamike regulisanja nego za dobijanje vremenski iščezavajućeg djelovanja (koji opet svojim postojanjem posebno poboljšava kvalitet regulisanja). Sl.90. pokazuje primjer primjene ovakve šeme u kojem se uzima diferencijal od pritiska u bubnju parnog kotla kao dopunska informacija



Slika 90

Strukturna šema sa slike 90 b formalno se može zamijeniti šemom sa slike 91. koja se ničim ne razlikuje od šeme sa stabilizacionim regulatorom s slike 87. ako se označi



Slika 91

$$W_{r1}(s) = W_d(s) \cdot W_r(s)$$

$$W_{r2}(s) = \frac{1}{W_d(s)}$$

Tako se npr. ako je u šemi sa diferenciranjem upotrebljen PI regulator tada su prenosne funkcije:

$$W_{r2}(s) = \frac{1}{k_d} \frac{T_d s + 1}{T_d s} \qquad W_{r1}(s) = k_d k_r \frac{T_d}{T_i} \frac{T_i s + 1}{T_d s + 1}$$

tj. korekcionni regulator je PI, a stabilizacioni ima vid integralno-diferencijalnog bloka. Za slučaj kada je inercionost unutrašnje konture znatno manja nego inercionost vanjske preporučuje se sledeći postupak proračuna podešavanja:

Iz poznatih amplitudsko-faznih karakteristika $\mathbf{W}_{ob}(j\omega)$ i $\mathbf{W}_{ob1}(j\omega)$ konstruiše se $\frac{W_{ob}(j\omega)}{W_{ob1}(j\omega)}$

karakteristika iz koje se zatim nađe optimalna podešenost parametara korekcionog regulatora $\mathbf{W}_{r2}(s)$. Znajući te parametre lako je naći optimalne parametre diferencijatora.

Odredi se amplitudno-fazna karakteristika ekvivalentnog objekta za regulator $\mathbf{W}_r(s)$ sa sl.

90.b.
$$W_{obe}(j\omega) = W_{ob1}(j\omega)W_d(j\omega) + W_{ob}(j\omega)$$

po kojoj se standardnim postupkom odredi optimalna podešenost regulatora $\mathbf{W}_r(s)$.

Sistemi za upravljanje po smetnji

1. Uslovi invarijantnosti regulisane veličine sa obzirom na smetnju

Kod svih ranije posmatranih sistema bilo je nemoguće postići potpuni nestanak odstupanja regulisane veličine od zadate vrijednosti. To se objašnjava činjenicom što se regulator koji se nalazi u zatvorenoj konturi nije moglo povećavati pojačanje u cilju povećanja tačnosti rada sistema zbog gubitka stabilnosti sistema. Uvodjenje dodatnih kontura u pravilu popravlja tačnost sistema, ali ne može potpuno odstraniti grešku u regulisanju. Sa te tačke gledišta, znatnim prednostima nad sistemima sa zatvorenim povratnom spregom raspolažu sistemi sa tzv. djelovanjem u otvorenoj konturi.

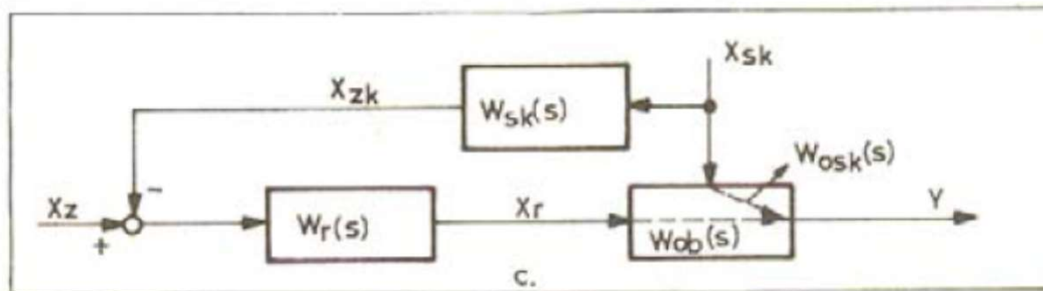
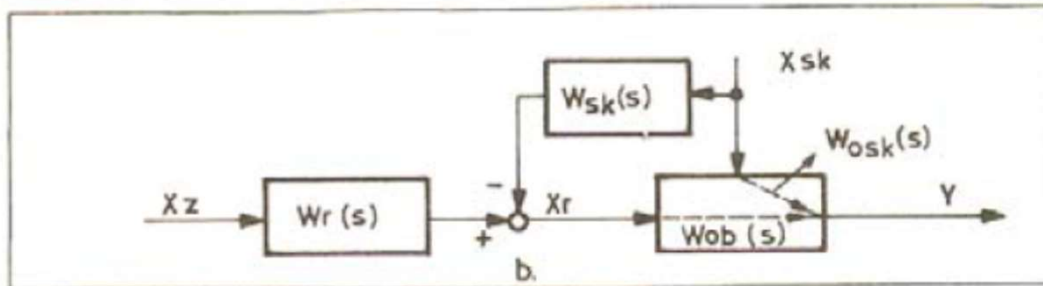
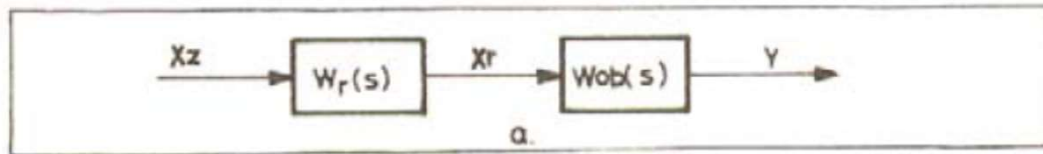
Najprostija varijanta strukturne šeme takvog sistema je prikazana na sl.92. a. U toj šemi nema povratne sprege i prema tome nema uslova za pojavu nestabilnog rada. U vezi sa tim, postoji velika sloboda izbora parametara regulatora prema zahtjevima upravljanja. Za tu strukturu važi:

$$Y(s) = W_r(s)W_{ob}(s)X_z(s)$$

gdje su $W_r(s)$ i $W_{ob}(s)$ prenosne funkcije regulatora odnosno objekta. U skladu sa tim izrazom, ako se odabere prenosna funkcija regulatora

$$W_r(s) = \frac{1}{W_{ob}(s)}$$

tada će biti ispunjeno idealno regulisanje, odnosno, regulisana veličina će apsolutno tačno slijediti promjenu zadate vrijednosti, ili će regulisana veličina apsolutno tačno biti održavana na zadatoj vrijednosti.



slika 92

Međutim, osnovni nedostatak ovakvog otvorenog sistema je mogućnost proizvoljnog otklanjanja regulisane veličine od zadate vrijednosti uslijed djelovanja vanjskih smetnji. Jedan od puteva i to najradikalniji da se otkloni uticaj smetnji je prelazak na sistem sa povratnom spregom, ali postoji i drugi put - upravljanje po smetnji. Strukturna šema sistema koji radi na tom principu se vidi na sl.92.b.

U tom sistemu dodatni regulator na osnovu informacije o smetnji djeluje na regulisani objekat u cilju spriječavanja odstupanja regulisane veličine u zavisnosti od smetnje.

$$Y(s) = [W_{osk}(s) - W_{sk}(s)W_{ob}(s)]X_{sk}(s)$$

gdje je: $W_{osk}(s)$ – prenosna funkcija objekta s obzirom na smetnju x_{sk} ,
 $W_{sk}(s)$ - prenosna funkcija regulatora koji djeluje po smetnji

Iz poslednje relacije slijedi da ako se prenosna funkcija regulatora po smetnji izabere iz uslova

$$W_{osk}(s) - W_{sk}(s)W_{ob}(s) = 0 \quad , \text{ tj.} \quad W_{sk}(s) = \frac{W_{osk}(s)}{W_{ob}(s)}$$

tada je $\mathbf{y}=\mathbf{0}$ i regulisana veličina \mathbf{y} uopšte ne reaguje na smetnju \mathbf{x}_{sk} ili drugim riječima regulisana veličina je invarijantna s obzirom na tu smetnju.

Vidi se da ova šema nema zatvorenih kontura, da radi na principu kompenzacije smetnje i zato izbor parametara regulatora u njoj nije ograničen uslovima stabilnosti.

Druga varijanta strukturne šeme sistema za upravljanje po smetnji je na sl. 92.c. Ovdje izlazna veličina regulatora po smetnji (ili kako će se ovaj regulator ubuduće zvati – uređaj za djelovanje po smetnji) dolazi na ulaz regulatora i djeluje zajedno sa zadatom vrijednošću

Odstupanje regulisane veličine u tom sistemu je dato sa

$$Y(s) = \left[W_{osk}(s) - W_{sk}(s)W_r(s)W_{ob}(s) \right] X_{sk}(s)$$

Ako se prenosna funkcija uređaja za uvođenje djelovanja po smetnji odredi iz uslova

$$W_{osk}(s) - W_{sk}(s)W_r(s)W_{ob}(s) = 0, \text{ tj.} \quad W_{sk}(s) = \frac{W_{osk}(s)}{W_r(s)W_{ob}(s)}$$

tada će sistem biti invarijantan s obzirom na smetnju. Uzimajući uz to u obzir i izraz za optimalnu prenosnu funkciju regulatora koji djeluje na objekat regulacionom veličinom, saglasno jednačini

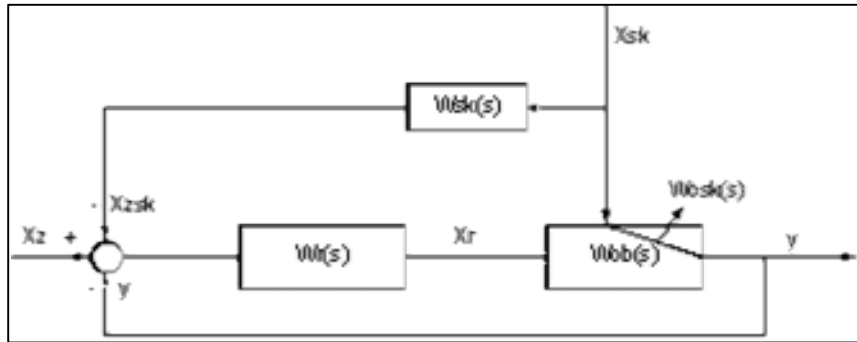
$$W_r(s) = \frac{1}{W_{ob}(s)} \quad \text{dobija se} \quad W_{sk}(s) = W_{osk}(s)$$

tj. uređaj za uvođenje djelovanja po smetnji treba da bude doslovni model prenosne funkcije objekta s obzirom na smetnju i zato će se u daljem tekstu kratko nazivati **“model”**.

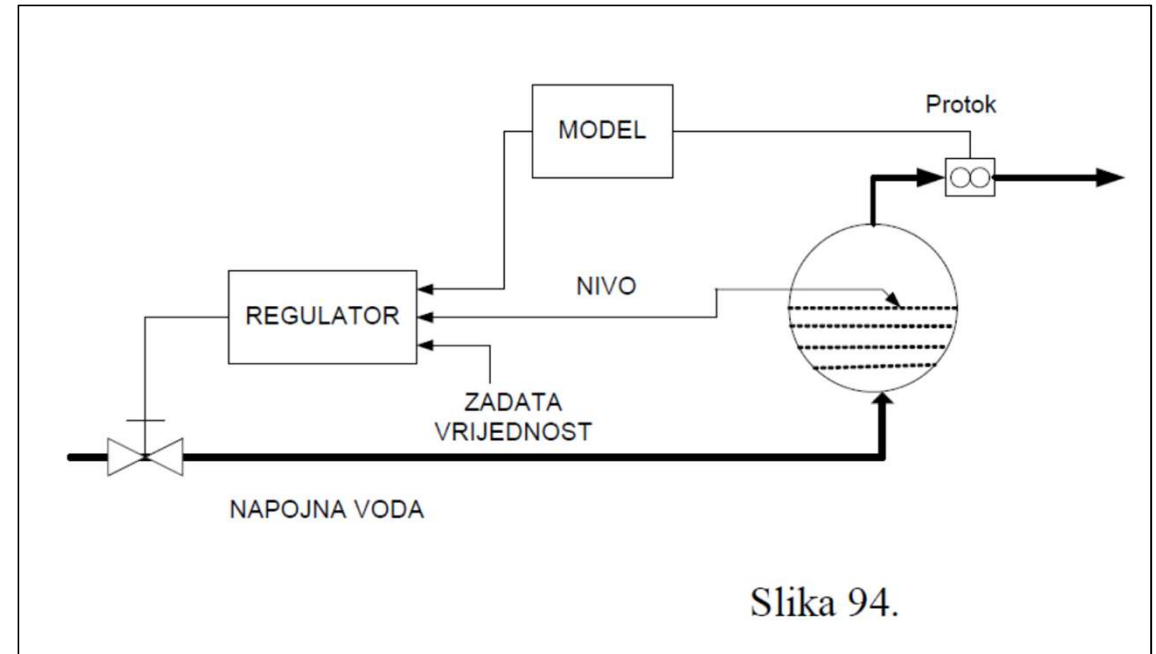
Međutim u realnim sistemima nije moguće obuhvatiti mjerenjem sve smetnje koje mogu djelovati na objekat i upravljati po njima. Zato ovaj ti uređaja ne može zadovoljiti osim u vrlo rijetkim slučajevima kada značajno veliko samoizravnavanje objekta svodi otklanjanje regulisane veličine uslijed neobuhvaćenih smetnji za zadovoljavajuće malu mjeru. Zato se ovakvi sistemi upotrebljavaju zajedno sa sistemima sa povratnom spregom i nazivaju se kombinovanim sistemima.

Kombinovani sistemi

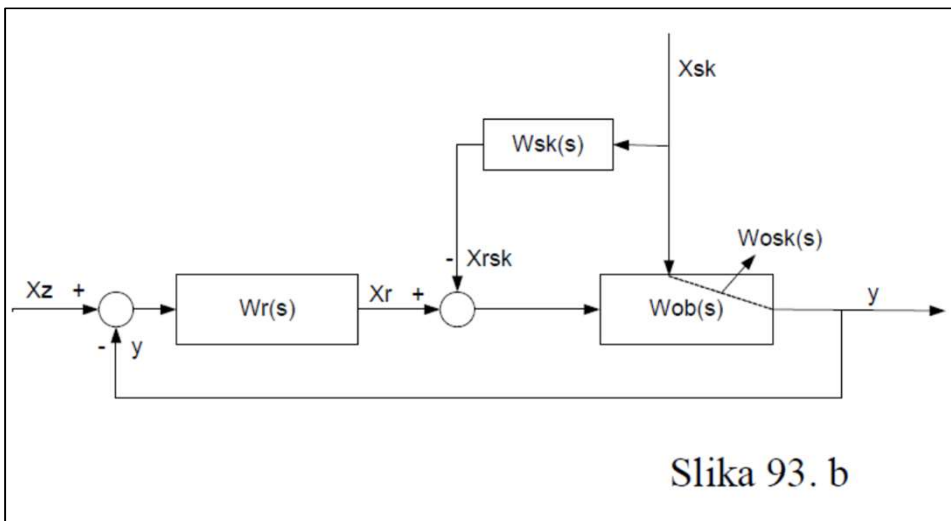
Šema prikazana na slici 93.a prikazuje principijelnu strukturu djelovanja kombinovanog sistema po smetnji na ulazu regulatora, a slika 93.b šemu sa djelovanjem po smetnji na ulazu objekta. Kao primjer kombinovane strukture biće prikazana tzv. "dvoimpulsna" regulacija napajanja bubnja kotla vodom sl.94. Za razliku od "jednoimpulsne" šeme, kod koje na ulaz regulatora dolazi samo podatak o nivou u bubnju kotla, u ovoj šemi na ulaz regulatora dolazi i dodatno djelovanje o potrošnji pare iz kotla



Slika 93. a

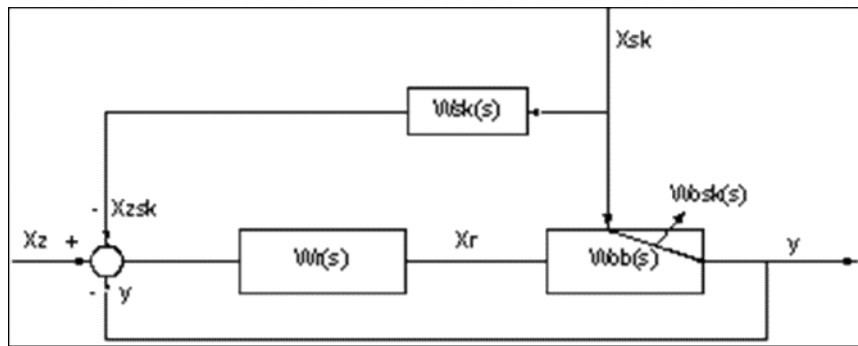


Slika 94.



Slika 93. b

Kod kombinovanih sistema osnovna prednost u odnosu na prosti regulacioni krug je činjenica da postoji mogućnost izbora željene prenosne funkcije "modela" bez obaziranja na stabilnost sistema.



Za sliku 93. a vrijedi

$$Y(s) = W_{ob}(s) \tilde{X}_r(s) + W_{osk}(s) X_{sk}(s)$$

$$X_r(s) = W_r(s) [X_z(s) - Y(s) - W_{sk}(s) X_{sk}(s)]$$

gdje je $W_{sk}(s) = X_{zsk}(s) / X_{sk}(s)$ prenosna funkcija uređaja za uvođenje djelovanja po smetnji ("modela").

Isključivši iz tog sistema jednačina koordinatu $X_r(s)$ dobije se:

$$Y(s) = \frac{W_{ob}(s) W_r(s)}{1 + W_{ob}(s) W_r(s)} X_z(s) + \frac{W_{osk}(s) - W_{ob}(s) W_r(s) W_{sk}(s)}{1 + W_{ob}(s) W_r(s)} X_{sk}(s)$$

Ovaj izraz se može napisati i kao:

$$Y(s) = \tilde{\Phi}_y(s) [X_z(s) + W_{\tilde{\Phi}_{sk}}(s) X_{sk}(s)]$$

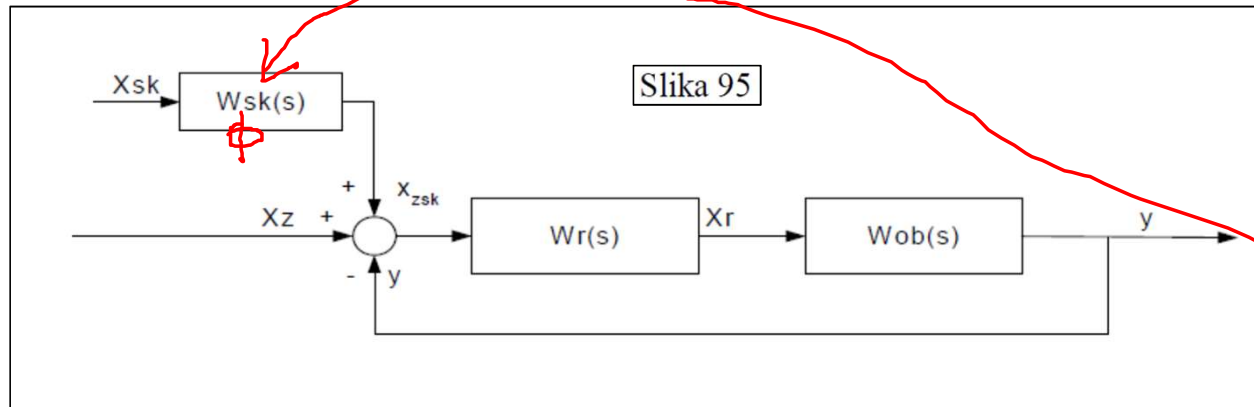
Pri ovakvom obliku šema saslrike 93 a se može prikazati slikom 95. gdje je dio sa prenosnom funkcijom

$$\Phi_y(s) = \frac{W_{ob}(s) W_r(s)}{1 + W_{ob}(s) W_r(s)}$$

određuje stabilnost, a dio sistema sa prenosnom funkcijom

$$W_{\Phi_{sk}}(s) = \frac{W_{osk}(s)}{W_{ob}(s) W_r(s)} - W_{sk}(s)$$

ima ulogu filtra koji prolaze smetnje prije svog ulaska u sistem.



Ove poslednje formule odgovaraju onima koje su izvedene za jednokonturne sisteme sa razlikom što je kod jednokonturnih sistema povećanje filterske sposobnosti filtera moguće samo izmjenom podešenosti regulatora, što vodi istovremenom pogoršanju stabilnosti sistema jer prenosna funkcija regulatora ulazi i u izraz za prenosnu funkciju filtera i u izraz za prenosnu funkciju zatvorenog sistema $\Phi_y(s)$ dok se kod kombinovanih sistema podešavanje filterskih sposobnosti filtera može sprovesti ne samo promjenom parametara regulatora nego i promjenom parametara "modela".

Konkretno ako se prenosna funkcija "modela" za k-tu smetnju odabere po uslovu

$$W_{sk}(s) = \frac{W_{osk}(s)}{W_{ob}(s) W_r(s)}$$

odstupanje regulisane veličine pri djelovanju te smetnje će biti jednako nuli jer filter u tom slučaju uopšte ne propušta smetnju. Prema tome, ovaj uslov je uslov apsolutne invarijantnosti regulisane veličine sa obzirom na k-tu smetnju.

Analognim putem se može pokazati da je za šemu sa sl.93 b prenosna funkcija filtra s obzirom na k-tu smetnju

$$W_{\Phi sk}(s) = \frac{W_{osk}(s)}{W_{ob}(s) W_r(s)} - \frac{W_{sk}(s)}{W_r(s)}$$

a uslov apsolutne invarijantnosti se ostvaruje blokom

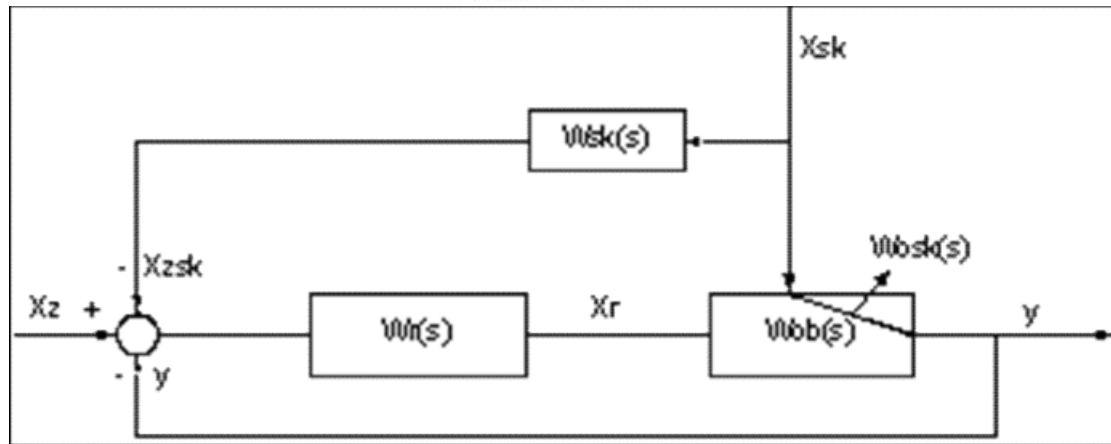
$$W_{sk}(s) = \frac{W_{osk}(s)}{W_{ob}(s)}$$

Sinteza „modela”

Proračun podešenosti sistema sa kompenzacijom smetnje se svodi na izbor optimalnih parametara regulatora i „modela” da bi sistem radio sa najvećom mogućom tačnošću uz neophodnu rezervu stabilnosti. Važno je napomenuti da uslovi apsolutne invarijantnosti nisu uvijek dostiživi iz razloga što prenosne funkcije dobijene po tim uslovima mogu biti nekada vrlo teške za realizaciju. U praksi najčešće se ide na izbor „modela” koji se može realizovati jednostavnim blokovima, što opet omogućava samo približno ispunjavanje uslova apsolutne invarijantnosti.

Zato se prilikom rješavanja ovoga problema ide na maksimalno moguće približenje tim uslovima uz primjenu standardnih blokova u „modelu”. U daljem razmatranju sve će biti izvedeno za shemu sa Sl. 93a, dok se sa nebitnim razlikama sve može izvesti i za onu sa Sl. 93b.

Slika 93. a



Proračun kombinovanog sistema se sastoji od dvije etape:

1. Odredi se u prostoru parametara podešavanja oblast gdje sistem ima rezervu stabilnosti ne manju od zadate.
2. Odredi se u toj oblasti tačka koja odgovara optimalnoj podešenosti sistema (najtačnijem radu sistema).

Kao kriterijum optimalnosti opet se uzima uslov da amplitudno-fazna karakteristika filtra kroz koji prolazi smetnja bude što manje različita od nule u opsegu frekvencija bitnom za dati sistem.

Kako se vidi iz prethodnih razmatranja, stabilnost sistema ne zavisi o podešenosti „modela“ i u cijelosti je određena podešenjem regulatora. Zato se određivanje oblasti zadate rezerve stabilnosti može izvesti načinom kao kod jednokonturnih sistema, a isto tako se određuje i optimalna podešenost regulatora jer se mora računati da će na sistem djelovati i druge smetnje neobuhvaćene kompenzacijom. (Kompenzacija se, po pravilu, provodi samo na nekom ograničenom broju smetnji — jednoj do dvije najsnažnije.) U odnosu na smetnje neobuhvaćene kompenzacijom, sistem će se ponašati kao jednokonturni bez kompenzacije.

Poslije određivanja optimalne podešenosti regulatora pristupa se određivanju optimalne podešenosti „modela„. Prema uslovu apsolutne invarijantnosti s obzirom na smetnju x_{sk} , amplitudno-fazna karakteristika odgovarajućeg filtra

$$W_{\Phi_{sk}}(j\omega) = \left| \frac{W_{osk}(j\omega)}{W_{ob}(j\omega)W_r(j\omega)} - W_{sk}(j\omega) \right| =$$

$$= |W_{\Phi_k}(j\omega) - W_{sk}(j\omega)|$$

mora biti jednaka nuli za $0 < \omega < \infty$.

To znači da „model“ $\mathbf{W}_{sk}(j\omega)$ i filter $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega)$ moraju imati amplitudno-fazne karakteristike koje se poklapaju. Treba napomenuti da $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega)$ odgovara filtru jednakoturnog sistema kod koga nema kompenzacije.

Ako punu invarijantnost nije moguće dostići, optimalnim podešenjem „modela“ se smatra takvo podešenje da $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega)$ i $\mathbf{W}_{sk}(j\omega)$ što manje odstupaju jedna od druge u bitnom, za taj sistem, opsegu frekvencija. Širina toga opsega se određuje frekventnim opsegom koji propušta sistem pri djelovanju sa strane zadate vrijednosti, tj. frekventnim opsegom $\Phi_y(j\omega)$. Pošto je forma $\Phi_y(j\omega)$ već određena pri proračunu optimalne podešenosti regulatora, to je širina interesantnog opsega već poznata.

Iz oblika amplitudno-frekventne karakteristike zatvorenog sistema s obzirom na zadanu vrijednost \mathbf{x}_z , slijedi da sistem pri odsustvu kompenzacije po smetnji najlošije filtrira harmonike sa frekvencijama bliskim nuli i rezonantnoj frekvenciji sistema.

U vezi s tim ima smisla poslužiti se metodom interpolacije prema kojoj je slaganje dvije forme najbolje ako se podudaraju (ili najmanje odstupaju) u zadatim tačkama. Prema tome, optimalna podešenost „modela“ se može formulisati kako slijedi :

Podešenost „modela“ je optimalna ako je amplitudno-frekventna karakteristika filtra jednaka nuli u krajnjem slučaju samo u dvije tačke, i to pri $\omega=0$ i $\omega=\omega_r$. Pri ispunjenju ovoga kriterijuma treba da se amplitudno-fazna karakteristika „modela“ $W_{sk}(j\omega)$ i filtra sistema bez kompenzacije po smetnji

$$W_{\Phi k}(j\omega) = \frac{W_{osk}(j\omega)}{W_{ob}(j\omega)W_r(j\omega)}$$

poklapaju za $\omega=0$ i $\omega=\omega_r$, tj.

$$W_{sk}(j0) = \frac{W_{osk}(j0)}{W_{ob}(j0) \cdot W_r(j0)}$$

$$W_{sk}(j\omega_r) = \frac{W_{osk}(j\omega_r)}{W_{ob}(j\omega_r) \cdot W_r(j\omega_r)}.$$

Iz ovih jednačina se određuju slobodni parametri „modela“.

Naravno, slaganje u više od dvije tačke daje veću približnost uslovima apsolutne invarijantnosti, a istovremeno omogućava podešavanje većeg broja parametara „modela“, tj. upotrebu „modela“ sa više stepeni slobode.

Uslovi definisani sa poslednje dvije jednačine omogućavaju definisanje sledećih preporuka pri izboru prenosne funkcije modela u zavisnosti o karakteru zakona regulisanja zatvorene konture:

1. Ako regulacioni sistem bez kompenzacije po smetnji radi sa statičkom greškom (sistem sa P regulatorom), tada pri nultoi frekvenciji vektor amplitudno-fazne karakteristike njegovog filtra je:

$$W_{\Phi k}(j0) = \frac{k_{osk}}{k_{ob} \cdot k_{ropt}}$$

Prema tome, prenosnu funkciju „modela“ je potrebno uzeti u obliku:

$$W_{sk}(s) = k_v \frac{T_{vn}^n s^n + \dots + T_{v1} s + 1}{T_n^n s^n + \dots + T_1 s + 1}$$

jer je kod ovakve prenosne funkcije vrijednost za nultu frekvenciju jednaka k_v , tj. vektor se takođe poklapa sa realnom pozitivnom osom. To omogućava uz izbor

$$k_v = \frac{k_{osk}}{k_{ob} \cdot k_{ropt}}$$

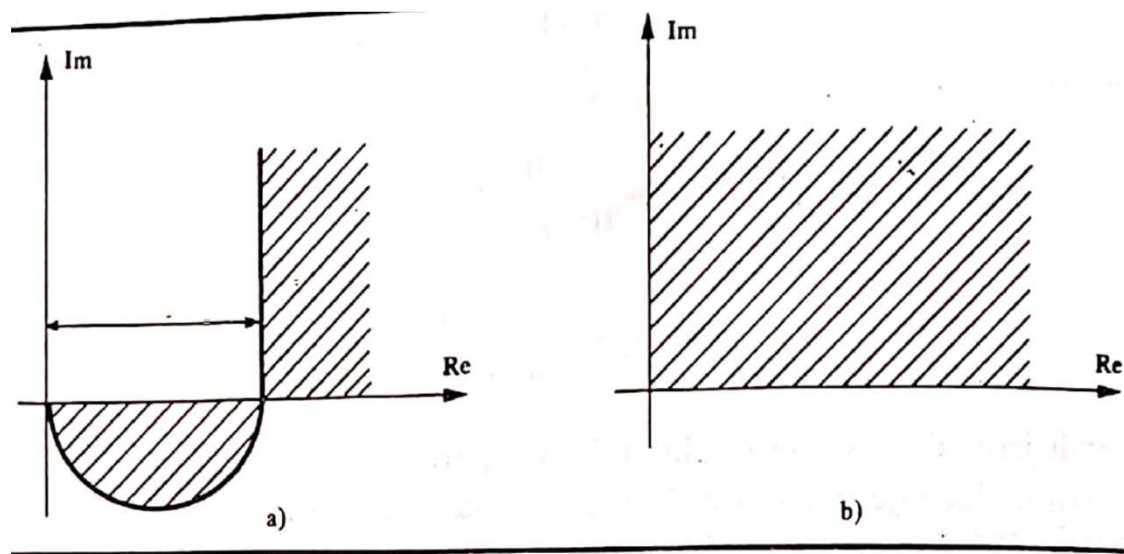
da se dostigne potpuno slaganje karakteristika $W_{\Phi k}(j\omega)$ i $W_{sk}(j\omega)$ pri $\omega=0$.

Varirajući zatim veličinu vremenskih konstanti T_v i T i birajući neophodnu veličinu n , može se u većini slučajeva dobiti slaganje tih karakteristika takode i pri rezonantnoj frekvenciji.

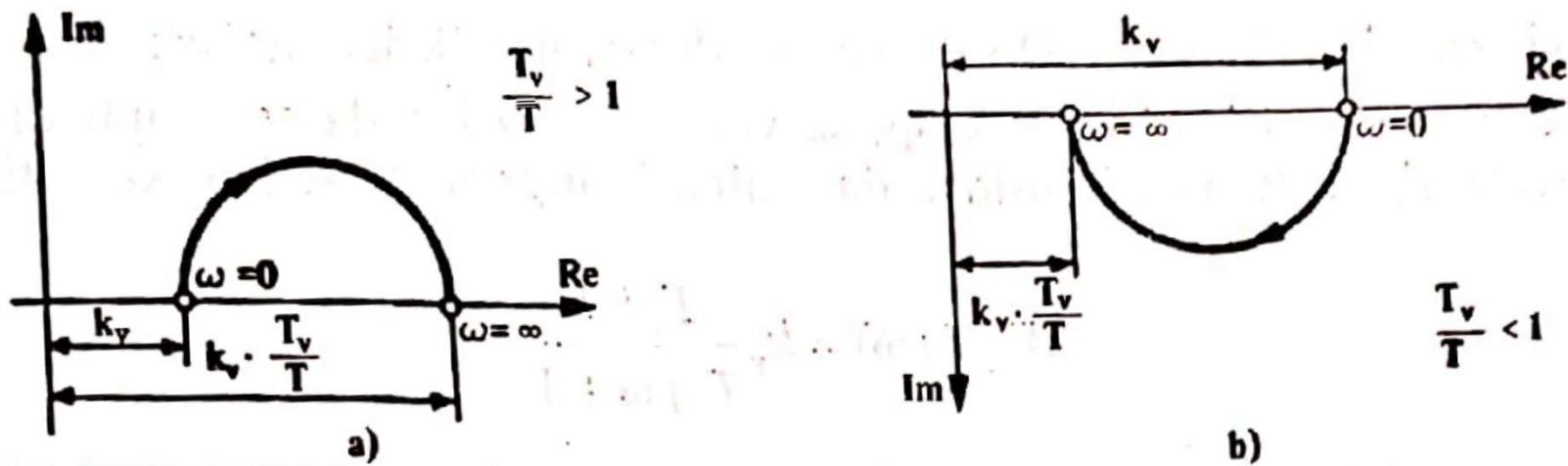
U praksi se najččće primjenjuje najprostiji slučaj predložene prenosne funkcije kada je $n=1$, tj. Pri upotrebi integralno –diferencijalnog bloka

$$W_{sk}(s) = k_v \frac{T_v s + 1}{Ts + 1} .$$

Pošto amplitudno-fazna karakteristika toga bloka pri promjeni k_v , T_v i T pada u prvi i četvrti kvadrant kompleksne ravni, tada pri fiksnim vrijednostima k_v (čija veličina se određuje iz uslova kompenzacije pri $\omega=0$) slaganje vektora $W_{\phi_k}(j\omega_r)$ i $W_{sk}(j\omega_r)$ na rezonantnoj frekvenciji sistema $\omega = \omega_r$ je moguće samo u slučaju kada kraj vektora $W_{\phi_k}(j\omega)$ pri $\omega = \omega_r$ pada u osjenčenu oblast na sl. 5.10a. U protivnom slučaju se može dobiti samo približno slaganje vektora $W_{\phi_k}(j\omega_r)$ i $W_{sk}(j\omega_r)$. (Ovo razmatranje postaje očevidno ako se promatraju amplitudno-fazne karakteristike integrodiferencijalnog bloka za $T_v > T$ i $T_v < T$, saglasno slici 5.11 a. i b).



Slika 5.10.



Slika 5.11.

2. Ako sistem radi bez statičke greške (integralna komponenta u zakonu upravljanja), tada amplitudno-fazna karakteristika $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega)$ za $\omega=0$ postaje nula. Zato prenosnu funkciju „modela” treba tako odabrati da ona takode bude jednaka nuli za $\omega=0$. U tom slučaju najčešće se primjenjuje u praksi „model” u vidu realnog diferencijatora čija je prenosna funkcija

$$W_{sk}(s) = k_v \frac{T_v s}{T_v s + 1}.$$

Varirajući veličine koeficijenta pojačanja k_v i vremenske konstante T_v , može se dobiti tačno slaganje amplitudno faznih karakteristika $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega)$ i $\mathbf{W}_{sk}(j\omega)$ na $\omega = \omega_r$ samo u slučaju da se vektor $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega_r)$ nalazi u prvom kvadrantu kompleksne ravni koja je osjenčena na sl. 5.10b. To se objašnjava činjenicom da je amplitudno-fazna karakteristika realnog diferencijatora pri bilo kojoj frekvenciji uvijek u prvom kvadrantu.

Sada će biti razmotren slučaj grafoanalitičke sinteze optimalne podešenosti „modela” korišćenjem formuliranog kriterijuma optimalnosti. Pri tome se pretpostavlja da je podešavanje regulatora već učinjeno, te je poznata rezonantna frekvencija sistema kao i da su već nacrtani vektor $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega_r)$ i $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j0)$. Slučaj sa \mathbf{P} regulatorom neće biti razmatran jer se \mathbf{P} regulator kod boljih regulacija izbjegava zbog postojanja statičke greške.

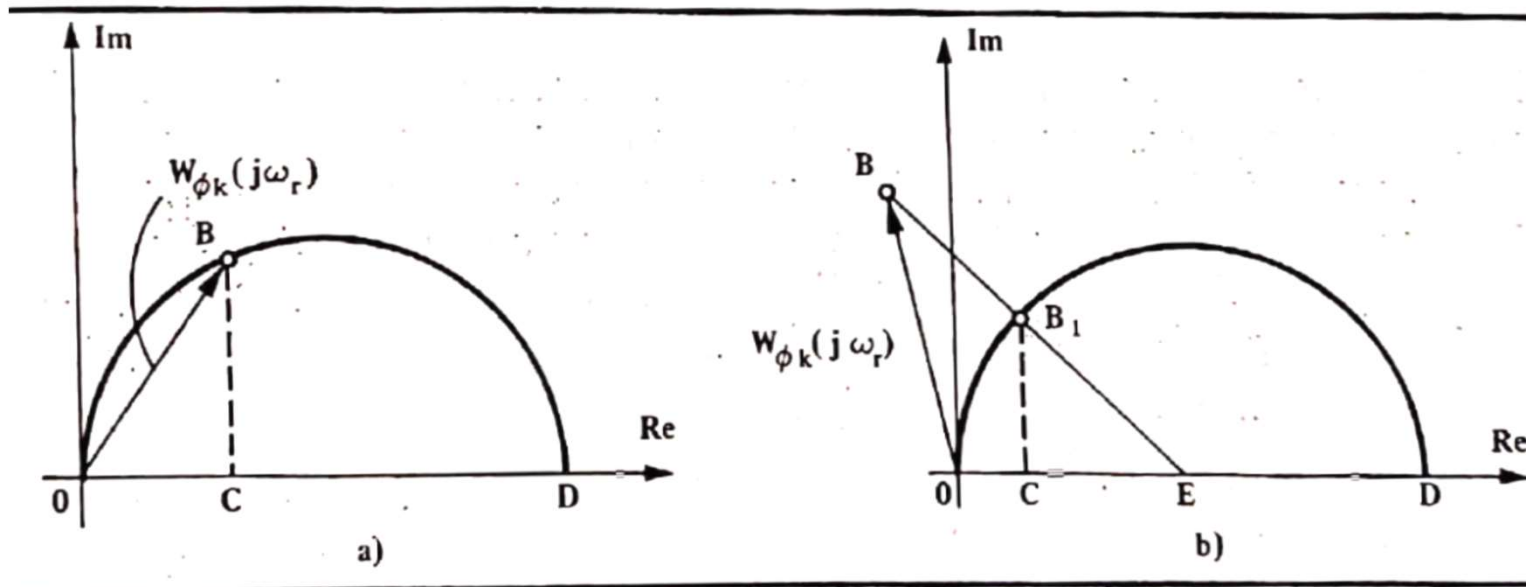
Kako je već rečeno, u sistemu koji radi bez statičke greške najjednostavnije je upotrijebiti „model“ u vidu realnog diferencijatora.

Amplitudno-fazna karakteristika toga bloka je polukrug u prvom kvadrantu sa dijametrom k_v na pozitivnoj realnoj poluosi. Raspoređenost frekvencija po karakteristici zavisi o vremenskoj konstanti T_v .

Ako je i vektor amplitudno-fazne karakteristike $\mathbf{W}_{\phi_k}(j\omega_r)$ za rezonantnu frekvenciju smješten u prvom kvadrantu kompleksne ravni, postoji mogućnost odabiranja podešenosti parametara „modela“ da bude obezbijedeno poklapanje amplitudno-faznih karakteristika $\mathbf{W}_{\phi_k}(j\omega)$ i $\mathbf{W}_{sk}(j\omega)$ na frekvenciji $\omega = \omega_r$.

Redoslijed proračuna je kako slijedi:

1. Nacrta se vektor amplitudno-fazne karakteristike $\mathbf{OB} = \mathbf{W}_{\phi_k}(j\omega_r)$ za frekvenciju ω_r , Sl. 5.12a.
2. Nacrta se krug sa centrom na realnoj pozitivnoj poluosi koji prolazi kroz koordinatni početak (tačka 0) i tačku B.



Slika 5. 12.

3. Iz tačke B spusti se normala BC na realnu osu. Nakon toga se mogu izračunati parametri podešavanja „modela“ kao

$$k_{VOPT} = \overline{OD}$$

$$T_{VOPT} = \frac{1}{\omega_r} \sqrt{\frac{\overline{OC}}{\overline{CD}}}$$

(Prvi izraz je evidentan, Do drugog se dolazi na sljedeći način: Ako treba na $\omega = \omega_r$ da se vektor $\mathbf{W}_{sk}(j\omega_r)$ poklopi sa vektorom \mathbf{OB} , tada se neophodna za taj uslov veličina T_v može naći iz uslova da realna komponenta te karakteristike

$$W_{SK}(j\omega) = k_v \frac{j\omega T_v}{j\omega T_v + 1}, \quad tj. \quad R(\omega) = k_v \frac{T_v^2 \omega^2}{\omega^2 T_v^2 + 1}$$

na $\omega = \omega_r$ je jednaka projekciji OC vektora OB na realnu pozitivnu poluosu, tj

$$\overline{OC} = k_v \frac{T_v^2 \omega_r^2}{T_v^2 \omega_r^2 + 1} = \overline{OD} \frac{T_v^2 \omega_r^2}{T_v^2 \omega_r^2 + 1}.$$

Odatle proizlazi izvedena vrijednost za T_{vOPT} . uz napomenu da je $\mathbf{OD} = \mathbf{OC} + \mathbf{CD}$.

Ponekad će se pokazati da nije moguće provući krug kroz točku B (ako nije vektor OB u prvom, nego npr. u drugom kvadrantu). Nekada, opet, može biti slučaj da kružnica treba da ima toliki radijus koji odgovara pojačanju u sistemu koje nije moguće aparaturom uopšte ostvariti. U tim slučajevima podešavanje parametara „modela“ se provodi iz uslova najmanje udaljenosti vektora amplitudno-fazne karakteristike realnog diferencijatora od tačke B.

Proračun se može sprovesti na sledeći način:

1. Nacrta se vektor **OB** amplitudno-fazne karakteristike $\mathbf{W}_{\Phi_k}(j\omega_r)$.
2. Nacrta se krug sa centrom na realnoj pozitivnoj poluosi i dijametrom koji je jednak maksimalnom mogućem pojačanju diferencijatora.
3. Tačka **B** se spoji sa centrom **E** dobijene kružnice i iz presjeka **B₁** linije **BE** sa kružnicom se povuče normala **B₁C** na realnu osu. Poslije toga se mogu naći parametri „modela“ kao

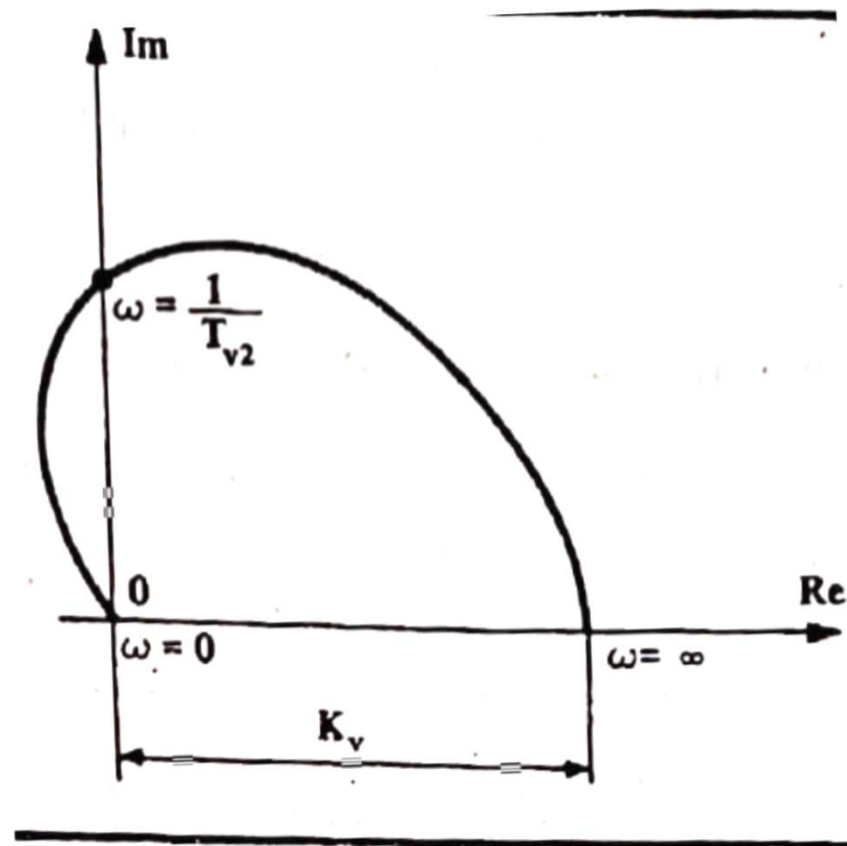
$$k_{VOPT} \approx \overline{OD} = k_{Vaprox}$$

$$T_{VOPT} \approx \frac{1}{\omega_r} \sqrt{\frac{\overline{OC}}{\overline{CD}}} = T_{vaprox}$$

Potpuno poklapanje odgovarajućih vektora na karakteristikama $W_{\Phi_k}(j\omega_r)$ i $W_{sk}(j\omega_r)$ čak i kad je vektor $W_{\Phi_k}(j\omega_r)$ smješten u drugom kvadrantu je moguće dobiti uz upotrebu diferencijatora drugog reda sa prenosnom funkcijom:

$$W_{sk}(s) = k_v \frac{T_{v2}^2 s^2}{T_{v2}^2 \cdot s^2 + T_{v1} \cdot s + 1}.$$

Amplitudno-fazna karakteristika toga bloka je na Sl. 5.13.



Slika 5.13.

MULTIVARIJABILNI SISTEMI

U dosada opisanim složenim šemama režim rada objekta je bio određen samo jednom regulisanom veličinom (pomoćna regulisana veličina kod kaskadne regulacije uvedena je samo radi povećanja tačnosti regulisanja glavne regulacione veličine).

Sistemi koji posjeduju više ulaza i više izlaza nazivaju se MIMO - Multi Input Multi Output sistemima. To su sistemi sa više upravljačkih i mjerenih veličina. Za razliku od SISO - Single Input Single Output sistema, upravljanje multivarijabilnim sistemima zahtjeva održavanje određenog broja regulisanih veličina na njihovoj zadatoj vrijednosti pomoću više upravljačkih promjenljivih. Prilikom projektovanja MIMO sistema potrebno je obratiti pažnju na koji način će ove promjenljive uticati jedna na drugu. Prisustvo više ciljeva upravljanja otežava zadatak, pa upravljanje MIMO sistemima zahtjeva više truda i analize nego što je to slučaj kod SISO sistema.

KARAKTERISTIKE MULTIVARIJABILNIH SISTEMA

Na slici je prikazan je pojednostavljen blok dijagram MIMO sistema. Jedna od ključnih stvari jeste način na koji su povezane odgovarajuće mjerene i upravljane veličine. Moguće je sa svakom mjerenom veličinom povezati tačno jednu, nezavisnu upravljačku promjenljivu, i tada se takva strukutra upravljanja naziva *multi-loop* kontrolerom. Ipak, inženjer koji vrši upravljanje može da uzme u obzir sve ili samo dio upravljačkih promjenljivih kako bi ispunio sve, ili opet samo dio ciljeva upravljanja. To je jedan od najvažnijih izazova u MIMO upravljanju kada je u pitanju veliki broj alternativnih strukutra upravljanja, prelazak sa *multi-loop* na potpuno multivarijabilno upravljanje. Odabir odgovarajuće konfiguracije upravljanja je glavni i najteži zadatak.



Proces sa više ulaza i više izlaza

MIMO sistemi imaju određen broj specifičnosti koje su posledica interakcija između varijabli koje se moraju pažljivo razmatrati:

1. Interakcija među promjenljivim utiče na stabilnost i performanse sistema upravljanja.
2. Izvodljivost sistema upravljanja zavisi od sveukupnog procesa.
3. Način na koji će biti povezane mjerene sa upravljanim veličinama preko određenih petlji je odluka koja se donosi prilikom projektovanja sistema.
4. Neki procesi mogu imati različit broj mjerenih i upravljanih promjenljivih.
5. Neki MIMO sistemi mogu biti vrlo osjetljivi na greške u modeliranju.

Sa obzirom na zavisnost među regulisanim veličinama, objekti se mogu podijeliti na dvije osnovne grupe:

- Objekti sa međusobno nezavisnim regulisanim veličinama
- Objekti sa međusobno zavisnim veličinama

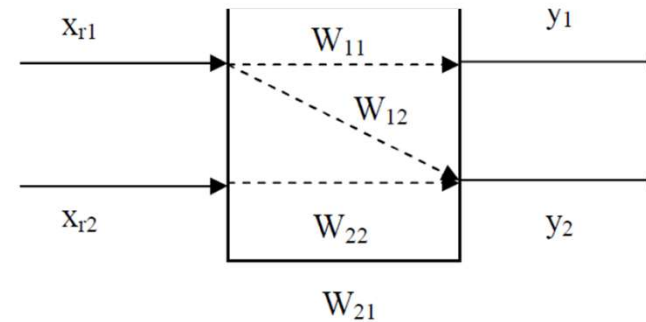
U prvom slučaju svaka regulisana veličina se može regulisati jednim izvršnim organom koji nema uticaja na ostale regulisane veličine. Takav objekat se može podijeliti na nekoliko nezavisnih djelova – svaki sa po jednom regulisanom veličinom. Očito je da se podešavanje svakog takvog sistema može sprovesti nezavisno jedno od drugog, a metode koje se koriste su one standardne koje su opisane za jednokonturne sisteme.

Složeniji je problem podešavanja sistema sa nekoliko regulisanih veličina kada između njih postoji uzajamno djelovanje kroz objekat. Određivanje optimalnog podešavanja velikog broja parametara regulatora vodi u opštem slučaju ka vrlo složenim proračunima.

Zadatak se može jednostavno riješiti ako se postavi dodatni zahtjev na autonomnost regulisanih veličina.

Jedna međuveza u objektu – dostizanje autonomnosti

Na slici 5.1.1 je šematski prikazan najjednostavniji slučaj objekta sa dvije regulisane veličine y_1 i y_2 . Regulisana veličina x_{r1} djeluje na obje regulisane veličine, a regulisana veličina x_{r2} djeluje samo na y_2 .



Slika 5.1.1 a

Za ovaj sistem važi:

$$Y_1(s) = W_{11}(s)X_{r1}(s) \quad (5.1.1)$$

$$Y_2(s) = W_{12}(s)X_{r1}(s) + W_{22}(s)X_{r2}(s) \quad (5.1.2)$$

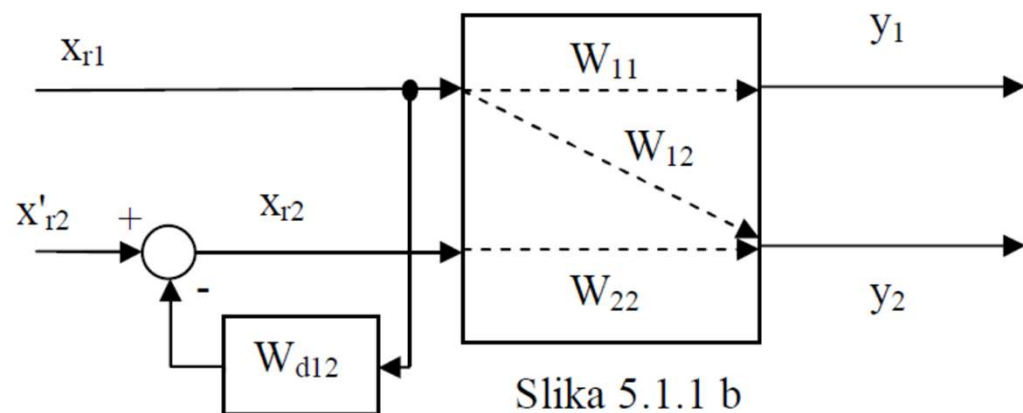
gdje su $W_{11}(s)$, $W_{12}(s)$ i $W_{22}(s)$ prenosne funkcije objekata, pri čemu važi:

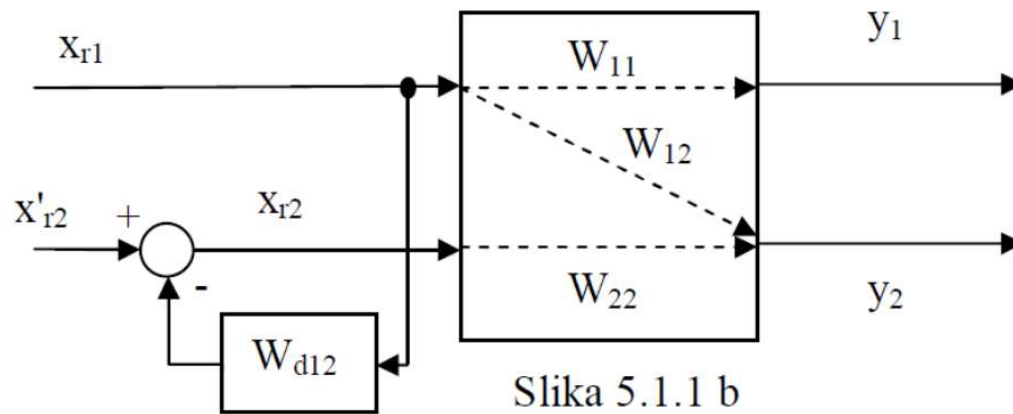
$W_{11}(s)$ - opisuje djelovanje x_{r1} na y_1

$W_{12}(s)$ - opisuje djelovanje x_{r1} na y_2

$W_{22}(s)$ - opisuje djelovanje x_{r2} na y_2

Nije teško uočiti da se posmatrani objekat formalno može predstaviti kao da se sastoji od dva dijela, svaki sa svojom regulisanom veličinom, sa tim što dio sa regulisanom veličinom y_2 ima osobinu da na njega djeluje regulisana veličina prvog dijela x_{r1} koja se može posmatrati kao smetnja. Za otklanjanje utcaja smetnje može se primjeniti princip kompenzacije smetnje što je i prikazano na slici 5.1.1b. Blok $W_{d12}(s)$ predstavlja blok za kompenzaciju koji ima funkciju da obezbijedi da regulisana veličina y_2 ne reaguje na x_{r1} . U skladu sa rečenim, postavlja se sistem jednačina:





$$Y_1 = W_{11}(s) \cdot X_{r1}(s) \quad (5.1.3)$$

$$Y_2(s) = W_{12}(s)X_{r1}(s) + W_{22}(s)X_{r2}(s) \quad (5.1.4)$$

$$X_{r2}(s) = X'_{r2}(s) - W_{d12}(s) \cdot X_{r1}(s) \quad (5.1.5)$$

Eliminacijom X_{r2} dobija se

$$Y(s) = W_{11}(s) \cdot X_{r1}(s) \quad (5.1.6)$$

$$Y_2(s) = [W_{12}(s) - W_{22}(s) \cdot W_{d12}(s)]X_{r1}(s) + W_{22}(s) \cdot X'_{r2}(s) \quad (5.1.7)$$

Da bi veličina y_2 bila invarijantna sa obzirom na x_{r1} , potrebno je da bude ispunjen uslov

$$W_{12}(s) - W_{22}(s)W_{d12}(s) = 0 \quad (5.1.8)$$

tj. potrebno je odabrati $W_{d12}(s)$ prema uslovu

$$W_{d12}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{22}(s)} \quad (5.1.9)$$

U tom slučaju sistem se može opisati sa:

$$Y_1(s) = W_{11}(s)X_{r1}(s) \quad (5.1.10)$$

$$Y_2(s) = W_{22}(s)X'_{r2}(s) \quad (5.1.11)$$

tj. objekat se može posmatrati kao da se sastoji iz dva sasvim nezavisna dijela sa regulisanim veličinama X_{r1} i X'_{r2} .

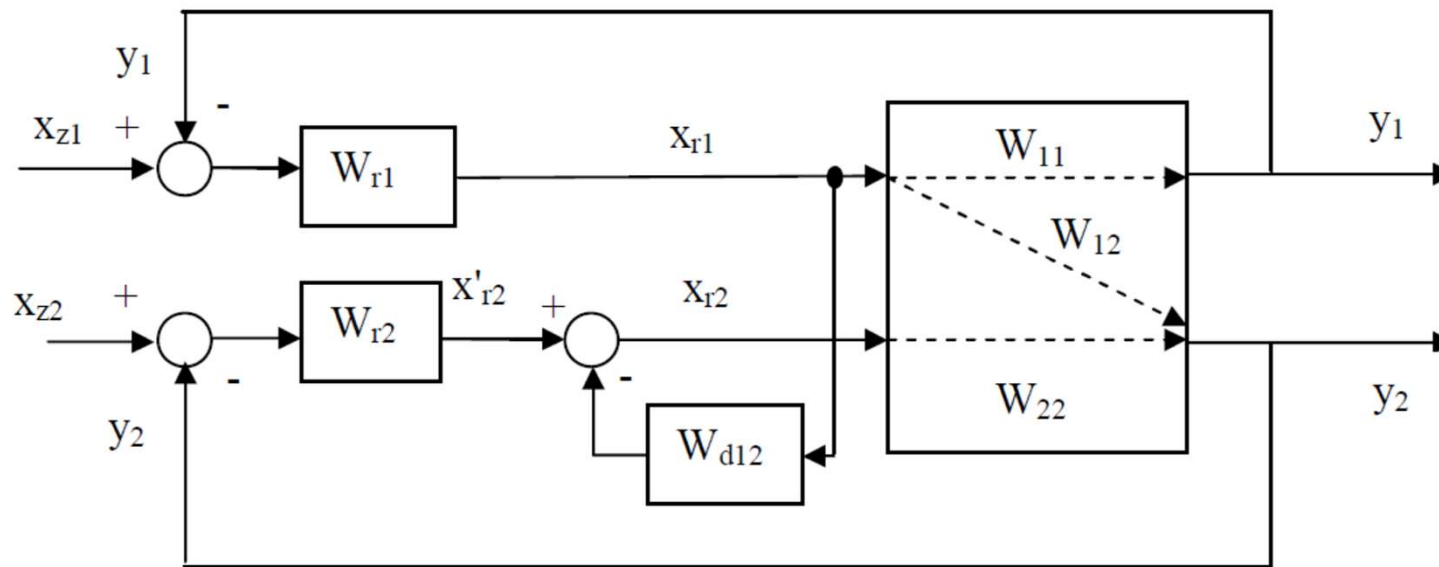
Uslov (5.1.8) je za razmatrani objekat uslov apsolutne invarijantnosti regulisane veličine y_2 sa obzirom na x_{r1} . Ako strogo ispunjenje uslova nije moguće ($W_{d12}(s)$ je komplikovan ili težak blok za realizaciju) onda umjesto uslova apsolutne invarijantnosti treba ispuniti približni uslov

$$W_{12}(s) - W_{22}(s) \cdot W_{d12}(s) = \min \quad (5.1.12)$$

Ili ako je objekat dat sa svojim amplitudno-faznim karakteristikama, onda

$$W_{12}(j\omega) - W_{22}(j\omega) \cdot W_{d12}(j\omega) = \min \quad (5.1.13)$$

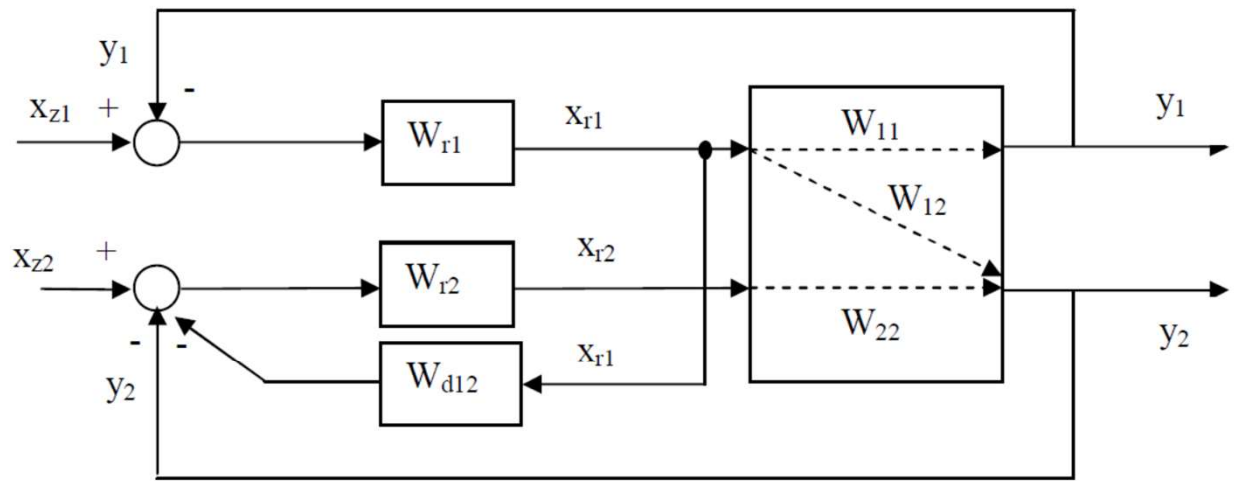
Uslovi (5.1.8) i (5.1.12) pokazuju da amplitudno-fazne karakteristike $W_{12}(j\omega)$ i $W_{22}(j\omega) \cdot W_{d12}(j\omega)$ treba da se poklapaju ili što manje odstupaju jedna od druge u opsegu frekvencija koji je interesantan za taj sistem. Strukturna šema regulacionog sistema objekta sa primjenom kompenzacije uticaja x_{r1} na y_2 je prikazana na slici 5.1.2a



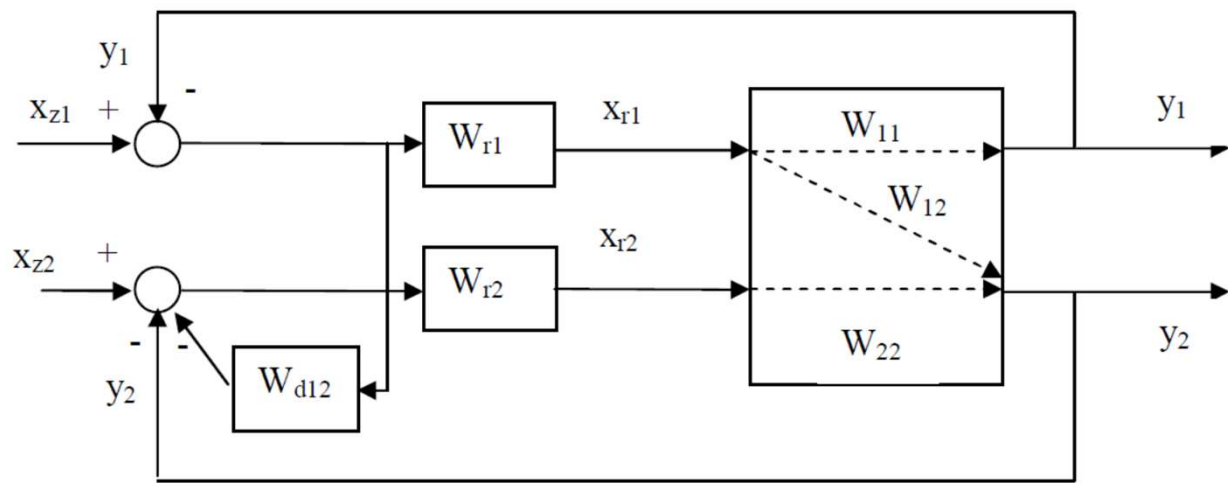
Slika 5.1.2 a

Ako su uslovi invarijantnosti putem odgovarajuće podešenosti ispunjeni dovoljno dobro, tada rad jednog regulatora praktički neće uticati na rad drugoga i podešavanje regulatora se može provesti nezavisno po dinamičkim karakteristikama odgovarajućih djelova objekta W_{11} i W_{22} .

Šema sa slike 5.1.2a nije i jedina moguća. Na slici 5.1.2b i 5.1.2c su pokazane još dvije mogućnosti. Šema 5.1.2a je pogodna za realizaciju jer je ulaz u $W_{d12}(s)$ direktno na izlazu regulatora, što je sa gledišta standardnog signala pogodno, ali izlaz iz $W_{d12}(s)$ mora da se sabere sa izlazom regulatora $W_{r2}(s)$, pa je neophodan još jedan sabirač.



Slika 5.1.2 b



Slika 5.1.2 c

Šema pod *c* nije pogodna za realizaciju jer ulaz u $W_{d12}(s)$ je razlika x_{z1} i y_1 što je nepogodno sa obzirom na nivo i standardnost signala, jer signal $(x_{z1} - y_1)$ nije standardan prilikom upotrebe standardnih regulatora. Izraz bloka $W_{d12}(s)$ je u ovom slučaju vrlo lagano sabrati sa ostalim signalima na ulaznom bloku regulatora.

Šema *b* sadrži u sebi sve pogodnosti od obje druge šeme, i ulazni i izlazni signal bloka kompenzacije $W_{d12}(s)$ su na standardnom nivou, a sabiranje sa ostalim signalima se provodi na ulaznom bloku regulatora.

Uslov za izbor bloka $W_{d12}(s)$ u ovom slučaju je

$$\frac{W_{12}(s)}{W_{22}(s)W_{r2}(s)} = W_{d12}(s) = \min$$

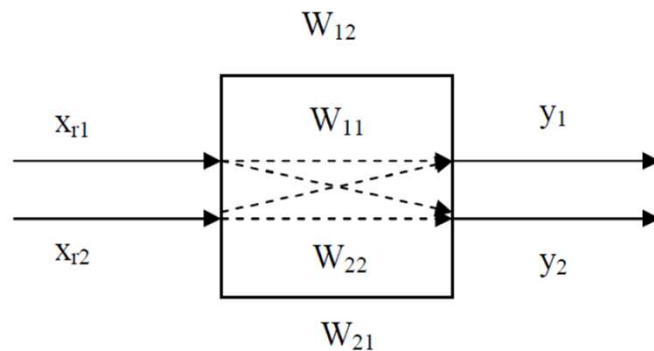
U razmotrenom najprostijem slučaju objekta sa samo jednom međuvezom podešavanje jednog regulatora nezavisno o drugom se može provesti bez obzira da li je u šemi prisutan ili ne blok za kompenzaciju međudjelovanja, jer u ovim šemama postoje samo dvije zatvorene konture od kojih svaka ima svoj regulator. Uvodjenje bloka $W_{d12}(s)$ ne povećava broj zatvorenih i nije ništa drugo nego kompenzacija smetnje. Radi toga podešavanje regulatora se može provesti standardnim postupkom koji je prikazan kod jednokonturnih sistema.

Proračun šeme sa slike 5.1.2b se može sprovesti po sledećem postupku:

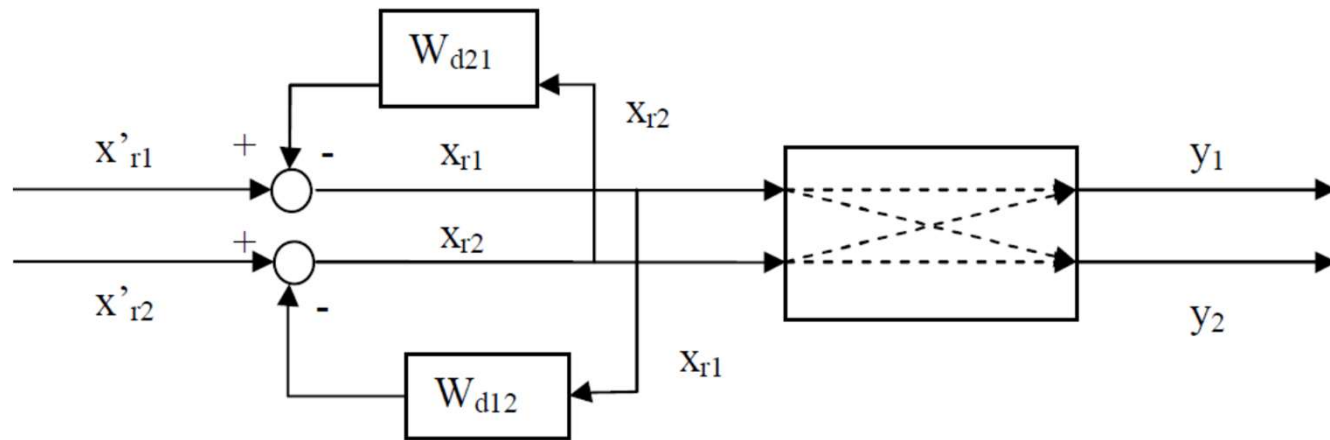
1. Iz amplitudno-fazne karakteristike $W_{11}(j\omega)$ i $W_{22}(j\omega)$ odredi se optimalna podešenost regulatora $W_{r1}(s)$ i $W_{r2}(s)$ i odredi se rezonantna frekvencija sistema ω_{r2} konture $W_{22}(j\omega) W_{r2}(s)$
2. Crta se vektor amplitudno-fazne karakteristike $\frac{W_{12}(j\omega_{r2})}{W_{22}(j\omega_{r2})W_{r2}(j\omega_{r2})}$ za frekvenciju ω_{r2}
3. U zavisnosti od tipa regulatora $W_{r2}(s)$ bira se struktura bloka kompenzacije $W_{d12}(s)$ i odredi se grafoanalitičkim putem njegova optimalna podešenost.

Dvije međuveze u objektu dostizanje autonomnosti

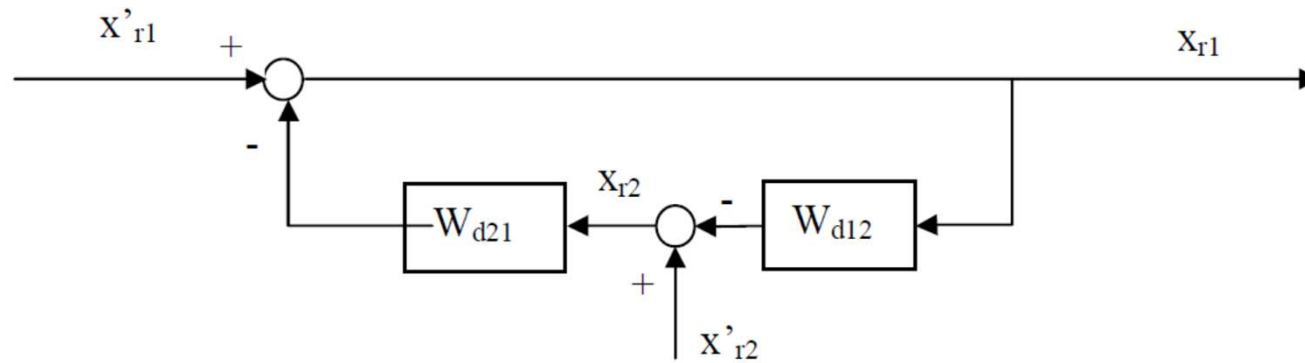
Složeniji u poređenju sa prethodnim je slučaj kada objekat ima u sebi dvije međuveze, tj. x_{r1} djeluje na y_2 , a x_{r2} na y_1 , kako je pokazano na slici 5.2.1 a.



Slika 5.2.1 a



Slika 5.2.1 b



Slika 5.2.1 c

Na taj način indentičan onome za jednu međuvezu za ovaj slučaj sa sl.5.2.1b se dobijaju uslovi apsolutne invarijantnosti kao

$$W_{21}(s) - W_{11}(s)W_{d12}(s) = 0 \quad (5.2.1)$$

$$W_{12}(s) - W_{22}(s)W_{d12}(s) = 0 \quad (5.2.2)$$

tj. izbor blokova kompenzacije se vrši prema

$$W_{d21}(s) = \frac{W_{21}(s)}{W_{11}(s)} \quad (5.2.3)$$

$$W_{d12}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{22}(s)} \quad (5.2.4)$$

U slučajevima kada ostvarenje prenosnih funkcija dobijenih gornjim izrazima nije moguće ili je teško izvodljivo, uslovi približne invarijantnosti se mogu izraziti sa uslovima

$$W_{21}(j\omega) - W_{11}(j\omega) \cdot W_{d21}(j\omega) = \min \quad (5.2.5)$$

$$W_{12}(j\omega) - W_{22}(j\omega) \cdot W_{d12}(j\omega) = \min \quad (5.2.6)$$

Treba primjetiti da za razliku od šema autonomnosti objekata sa jednom međuvezom, u ovoj šemi postojanje vanjskih veza među regulisanim veličinama dovodi do dopunske zatvorene konture, sl.5.2.1c. Kao što je poznato, postojanje zatvorene konture dovodi do situacije u kojoj može doći do samopobude i gubitaka stabilnosti ukoliko se povratna sprega pokaže pozitivnom.

Zato poslije određivanja optimalnih veličina parametara kompezacionih blokova, neophodno je provjeriti da li dobijeni sistem ima željenu rezervnu stabilnost.

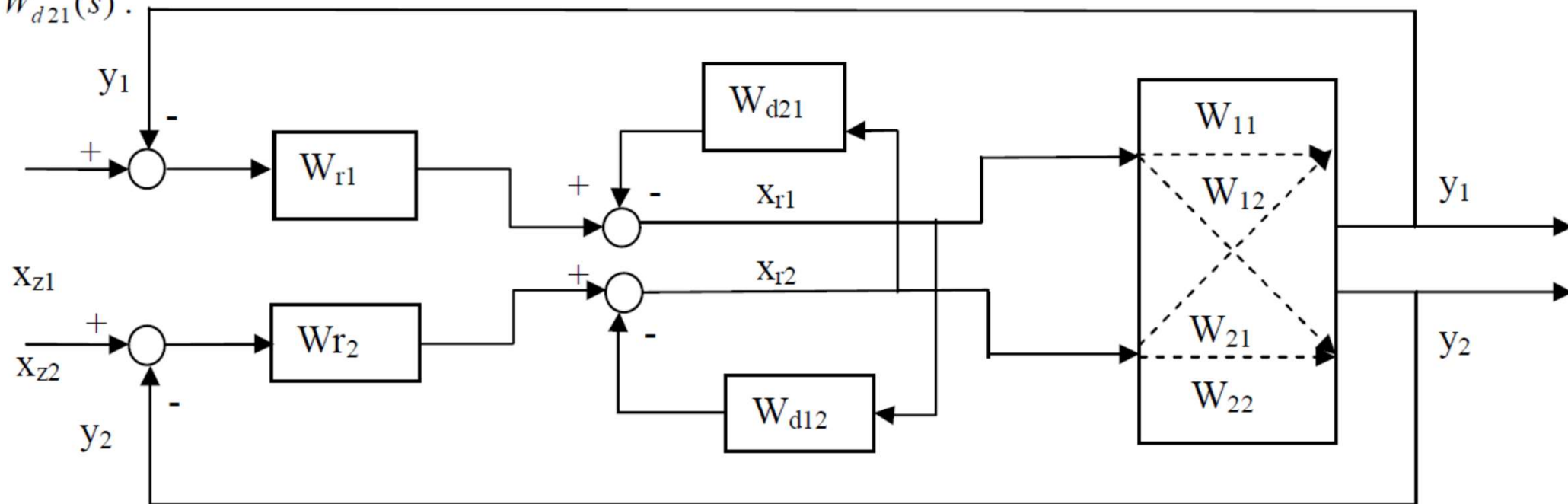
U slučaju da se uslovi optimalne invarijantnosti mogu ostvariti, onda će važiti sledeće jednačine

$$Y_1(s) = W_{11}(s) \cdot X'_{r1}(s) \quad (5.2.7)$$

$$Y_2(s) = W_{22}(s) \cdot X'_{r2}(s) \quad (5.2.8)$$

tj. objekat se razdvaja na dva nezavisna dijela.

Na slici 5.2.2a prikazan je jedan regulacioni sistem sa blokovima kompenzacije $W_{d12}(s)$ i $W_{d21}(s)$.

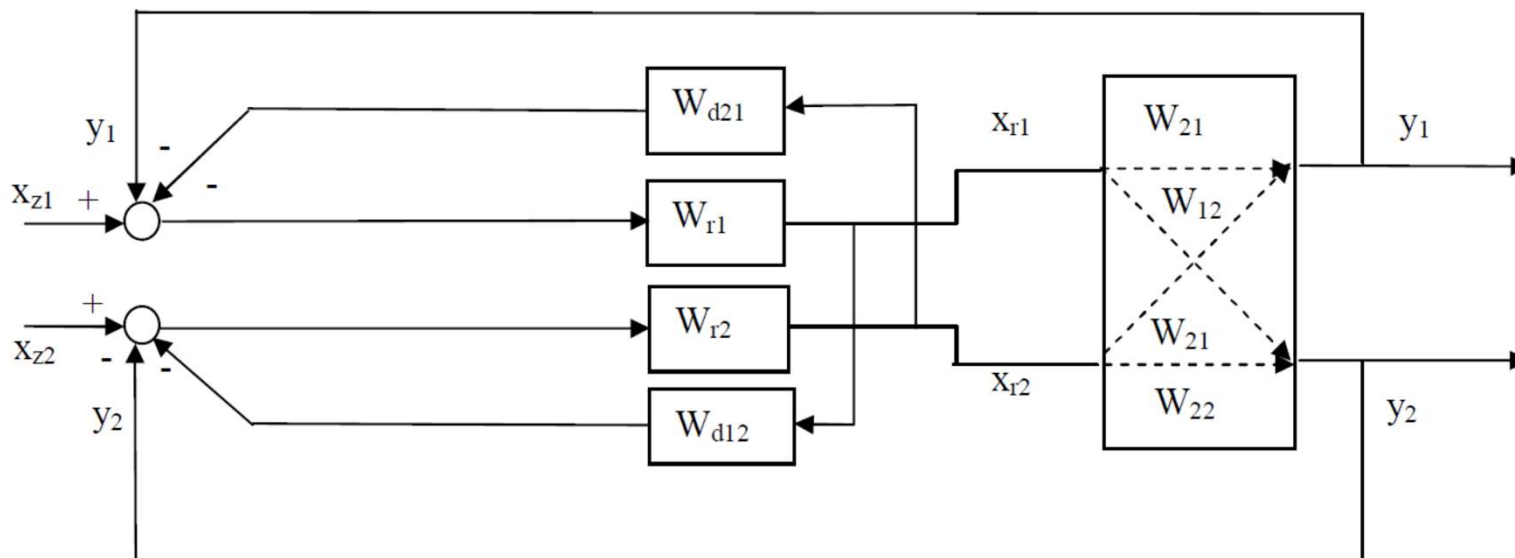


Slika 5.2.2 a

Ukoliko se uslovi invarijantnosti ispune, regulatori se podešavaju nezavisno - $W_{r1}(s)$ prema amplitudno-faznoj karakteristici $W_{11}(j\omega)$, a $W_{r2}(s)$ prema $W_{22}(j\omega)$.

I u slučaju postojanja dvije međuveze moguće su tri varijante šema.

Sve napomene o pogodnosti upotrebe pojedinih šema vrijede i ovdje, pa se šema sa slike 5.2.2b preporučuje kao najpogodnija.



Slika 5.2.2 b

Jednostavno je dobiti iz uslova invarijantnosti za taj preporučeni slučaj kriterijuma za sintezu blokova kompenzacije

$$W_{d21}(s) = \frac{W_{21}(s)}{W_{11}(s) \cdot W_{r1}(s)} \quad ; \quad W_{d12}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{22}(s) \cdot W_{r2}(s)}$$

Pošto u ove izraze ulaze i prenosne funkcije regulatora, pa je pri proračunu optimalne podešenosti parametara blokova kompenzacije prije svega potrebno naći optimalnu podešenost regulatora po karakteristikama $W_{11}(j\omega)$, odnosno $W_{22}(j\omega)$ uz prepostavku ostvarene autonomnosti.

U praksi se blokovi $W_{d12}(s)$ i $W_{d21}(j\omega)$ obično realizuju kao elementarni blokovi čime se postižu samo približni uslovi invarijantnost, što u najvećem broju slučajeva zadovoljava. Inače, tačna i potpuna invarijantnost obično zahtjeva vrlo složen vid kompezacionih blokova. Postupak podešavanja ovakvog sistema sa sl.5.2.2b je vrlo sličan onome sa jednom međuvezom i može se izvesti sledećim redom:

1. Iz amplitudno-fazne karakteristike $W_{11}(j\omega)$ i $W_{22}(j\omega)$ na standardan način odredi se optimalna podešenost regulatora $W_{r1}(s)$ i $W_{r2}(s)$. Istovremeno se odrede rezonantna frekvencija oba sistema ω_{r1} i ω_{r2} .

2. Crta se vektor $\frac{W_{21}(j\omega)}{W_{11}(j\omega_{r1}) \cdot W_{r1}(j\omega_{r1})}$

3. Odabere se blok kompenzacije u vidu realnog diferencijatora (kada regulacija ima integralnu komponentu) i na taj način pokazan u poglavlju o sintezi modela nađe se optimalna podešenost bloka $W_{d21}(s)$.

4. Analognim putem po vektoru $\frac{W_{12}(j\omega_{r2})}{W_{22}(j\omega_{r2}) \cdot W_{r2}(j\omega_{r2})}$ na frekvenciji $\omega = \omega_{r2}$ nađe se optimalna podešenost bloka $W_{d12}(s)$.

5. Nakon okončanja proračuna provjeri se relativna stabilnost sistema.

U slučaju međusobne veze više nego dvije veličine, razmatranja se sprovode analogno, ali pri tome je neophodna pomoć računara pošto su proračuni veoma složeni. Pri tome treba napomenuti da postoje i takve vrste međuveza koje je nemoguće eliminisati fizički ostvarivim sredstvima.