

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
ZAVOD ZA KEMIJSKO INŽENJERSTVO

Ratimir Žanetić

AUTOMATSKO REGULIRANJE PROCESA

(Skripta za internu uporabu)

Split, 2010.

Predgovor

Skripta "Automatsko reguliranje procesa" predstavlja pisane materijale za studente diplomskog studija Kemijske tehnologije, smjer Materijali.

U skriptama se studenti upoznaju s temeljnim postavkama automatskog vođenja procesa, koje obuhvaća načine vođenja koji se dijele na otvorene i zatvorene procese. Osnovna misao koja se uočava u skripti je ta da je vođenje temelj svim zbivanjima u prirodi, društvu i tehnici i da je ono temelj na kojem se može graditi interdisciplinarne značajke vođenja. Posebno se u skripti govori o slijednom, selektivnom i prilagodljivom vođenju, kao i vođenju pomoću računala. Na kraju se govori o analizi i sintezi regulacijskih krugova pri čemu se ističe da je u vođenju bitno povećati učinkovitost i proizvodnost procesa, a ne održavati stalnom neku veličinu karakterističnu za stanje tvari i/ili energije.

Zahvaljujem recenzentima prof.dr.sc Maji Kliškić i prof.dr.sc. Nenadu Kuzmanić, koji su pregledali rukopis i tijekom pisanja preporučili kako korisno iznijeti gradivo iz kolegija "Automatsko reguliranje procesa"

Ratimir Žanetić

SADRŽAJ

1. Interdisciplinarnost vođenja	3
2. Postavke teorije vođenja	4
3. Automatsko reguliranje procesa	6
4. Istraživanje i opisivanje vladanja procesa	8
5. Načini vođenja procesa	10
5.1. Upravljanje	10
5.2. Reguliranje omjera	11
5.3. Automatska stabilizacija	13
5.4. Programno reguliranje	14
5.5. Slijedno reguliranje	15
5.6. Prilagodljivo i nelinearno reguliranje	16
5.7. Vođenje procesa iz središta	18
5.8. Primjena računala u automatskom reguliranju procesa	21
6. Djelovanje zatvorenih krugova vođenja	22
7. Građa regulacijskih krugova	23
8. Statičke i dinamičke značajke zatvorenih regulacijskih krugova	25
9. Grafička analiza vladanja regulacijskih krugova s pomoću statičkih karakteristika	26
10. Sinteza regulacijskog kruga	29
11. Složeni tehnološki procesi	31
11.1. Osnovni dijelovi projekta vođenja procesa i instrumentacije	32
11.2. Automatizacija reaktora s mješanjem	37

1. Interdisciplinarnost vođenja

Zakoni vođenja su prisutni u živim organizmima, u zajednici u kojoj živimo, te u uređajima i sustavima koje gradimo. Pri tome svaki sustav koji ima smisao i suvislost djelovanja predstavlja cjelinu od dva različita podsustava. Jedan je proizvodni podsustav, kojem su svojstveni prijenos i pretvorba tvari i energije, a drugi je podsustav za vođenje, koji prijenos i pretvorbu prati i usmjerava tako da im daje smisao i suvislost.

Tako je kod živih organizama svojstvo vođenja ugrađeno i oni svoju životnu sposobnost održavaju neprestanim suprostavljanjem neživoj i živoj prirodi. Oni izvana dobavljaju energiju i unutar svoje strukture usmjeravaju i upravljaju njezinim trošenjem.

Za primjer vođenja u biologiji može poslužiti djelovanje sustava za stabilizaciju krvnog tlaka u čovjekovom tijelu. U tijelu, radi jednoličnosti snabdjevanja tkiva krvlju, mora postojati određena stabilnost krvnog tlaka u arterijama, arteriolama i kapilarama. Tipična njegova vrijednost je između 10 i 16 kPa. Promjene tlaka osjećaju baroreceptori tj. živčani završeci, koji se nalaze u stijenkama velikih arterija. Kad se unutar arterija povisi tlak, njihove se stijenke istežu i pri tome stimuliraju baro receptore, a signal o nastaloj promjeni prenosi se u moždinu. Oni u moždini djeluju na simpatički i parasimpatički dio. Ukoliko u sustavu dođe do porasta tlaka, signali će obustaviti rad simpatičkog dijela, a potaknuti rad parasimpatičkog dijela. Posljedica tog prvog djelovanja je smanjenje kontrakcije srca, dok će kao posljedica drugog djelovanja biti proširenje arteriola i smanjenje perifernog otpora što ga protjecanju krvi pružaju arteriole. Suvislost djelovanja ovog sustava je posljedica vođenja unutar organizma, pri čemu se u sredini produžene moždine vodi i usmjerava proces prijenosa krvi iz srca u tkivo.

Drugi primjer kod kojeg zakoni vođenja pronalaze svoju potvrdu je umjetničko stvaranje. Tako H. W. Franke 1969. piše: "Umjetnik nudi svoje djelo javnosti da bi ga ona perceptivno prihvatila. Koliko je to uspjelo on opaža prema odjeku, npr. kritike, i poboljšava vještinu svoje proizvodnje. I prema njegovu mišljenju ta povratana veza može biti različito izražena, a može i izostati. Izostane li, umjetnik se sam uključuje kao nadzorni stupanj i zastupajući javnost ocjenjuje vlastite učinke i uči iz svojih iskustava".

Poduzeće predstavlja poslovni sustav u kojem postoje mnogoznačna obilježja i izuzetna složenost odnosa unutar sustava te veza sustava i okoline. U takvom jednom poslovnom sustavu su kriteriji njegova funkcioniranja ekonomske kategorije. U ostvarivanju svog cilja on neprekidno usklađuje svoje unutrašnje uvjete s uvjetima okoline i u njemu su jasno istaknuta međudjelovanja slijedećih temeljnih funkcija poduzeća: procesa, vođenja, mjerenja i upravljanja. Poslovni sustav je formiran s osnovnim ciljem da ostvari određene učinke (proizvode ili usluge) određenih svojstava za zadovoljenje ljudskih potreba. Taj svoj cilj sustav ostvaruje tako što ulazne elemente transformira u željene učinke, temeljeći svoje učinke na osnovnom ekonomskom načelu da ih ostvaruje sa što manje uložених sredstava za proizvodnju energije i rada.

Kao tehnički sustav može nam poslužiti stroj za pranje rublja, koji služi za pranje i dobivanje čistog rublja. Kao mjerljiva veličina je čistoća rublja, koja se određuje vidom, mirisom i opipom. Ta čistoća tj. željena vrijednost se ostvaruje na temelju unaprijed zadanog programa, koji se sastoji od količine vode, otvorenosti ventila, količine sredstva za pranje, struje koja se propušta kroz grijače te vremena trajanja centrifugiranja. Različite radne operacije (prihvat vode i sredstva za pranje, iskuhavanje, ispiranje i centrifugiranje) se ostvaruju na temelju postavljenog programa pritiskom na dugme programatora.

2. Postavke teorije vođenja

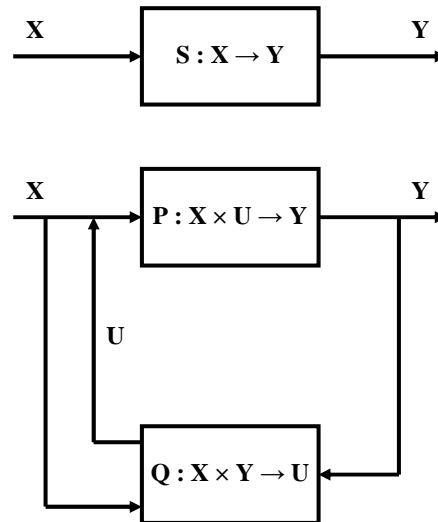
Istraživanje sustava prema postavkama teorije vođenja temelji se na ispitivanju ovisnosti veličina karakterističnih za njegovo vladanje u cjelini (izlazne veličine) i veličina karakterističnih za stanje tvari, energije ili informacija (ulazne veličine). Pri tome su izlazne veličine varijable, a ulazne nezavisne veličine. Njihova veza se može prikazati relacijom:

$$S : X \rightarrow Y$$

koja nam kazuje da sustav opisan skupom S pridružuje skupu izlaznih promjena Y , skup ulaznih promjena X .

Način pridruživanja ulaznih promjena izlaznim predstavlja osnovnu značajku sustava, koja se iskazuje matematičkim opisom, tj. opisom veza izlaznih i ulaznih veličina. To pridruživanje u

suvislim sustavima podvrgnuto je određenim zakonitostima, pri čemu takav sustav predstavlja zajednicu dvaju sustava: prirodnog (P) i sustava za vođenje (Q). Taj odnos možemo prikazati slikom1.



Slika 1. Prikaz unutarnjeg poretka sustava

Njihovo međusobno djelovanje matematički možemo prikazati:

$$\begin{aligned}
 S &= \{Q, P\} \\
 P &: X \times U \rightarrow Y \\
 Q &: X \times Y \rightarrow U
 \end{aligned}$$

pri čemu prvi odnos znači da je promatrani sustav S sastavljen od dva podsustava Q i P, dok drugi kazuje da proizvodni proces (P) prevodi ulaznu promjenu X uobičajenu upravljačkim djelovanjem U u izlaznu promjenu Y, a treći odnos pokazuje da jedinica za vođenje (Q) prevodi ulazne promjene X i izlazne Y u upravljačko djelovanje.

Kada su proizvodni proces i sustav za vođenje jednom povezani, oni tvore nedjeljivu cjelinu koja ima sposobnost vođenja. Kod tehničkih sustava zadatak teorije vođenja je da pri sintezi omogući što uspješnije djelovanje cjelina: proces - sustav za vođenje. Kod živih organizama, kojima je sposobnost vođenja prirođena, zadatak teorije vođenja je analiza i identifikacija zakonitosti vođenja i vladanja cjeline: proces - sustav za vođenje. Prema tome teorijom vođenja su obuhvaćena tri zadatka: zadatak vođenja, analiziranja i identificiranja.

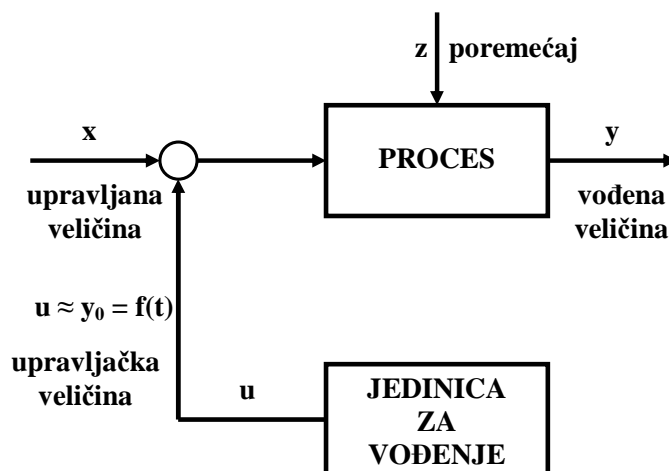
3. Automatsko reguliranje procesa

Automatsko reguliranje je najčešći način vođenja u praksi. Tako se na primjer u industriji putem automatskog reguliranja održavaju stalnim ili mijenjaju prema određenom zakonu fizičke veličine: tlak, protok, razina, temperatura itd., te svojstva: koncentracija, gustoća itd., odnosno kemijski sastav: kisik, sumporov(IV)oksid, ugljikov(II)oksid itd. Uz to treba istaknuti da je primjena automatskog reguliranja prisutna i u drugim područjima ljudske djelatnosti: kućanski uređaji, laboratorijska oprema itd.

Vođene procese se svrstava u nekoliko grupa, što je ovisno o načinu građe, uvjetima ostvarivanja svrhe procesa te o obliku i načinu prijenosa informacija kao i njihovom vladanju.

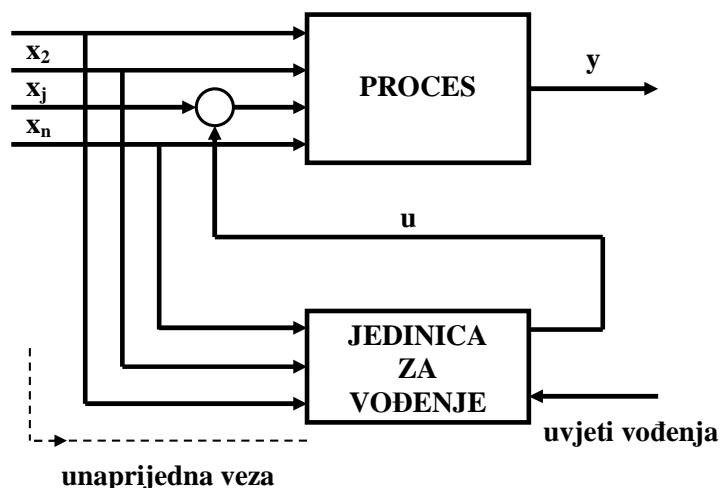
Tako kod definicije zadatka vođenja potrebno je odrediti koje su to karakteristične veličine u procesu pomoću kojih se mogu donositi upravljačke odluke. Postoje dva načina kojima se ostvaruje informacija o stanju vođenog procesa: prema poremećajnoj veličini, koja je ulazna i prema izlaznoj veličini.

Pri vođenju prema poremećajnoj veličini (ulaznoj) nije zatvoren tok signala sa izlaza procesa na ulaz, preko sustava za vođenje, kao što je to u drugom slučaju vođenja prema izlaznoj veličini. Stoga se sustav građen na prvi način označuje kao otvoreni sustav, a sustav građen na drugi način kao zatvoreni sustav. Prikaz otvorenog sustava prikazan je na slici 2.



Slika 2. Otvoreni sustav

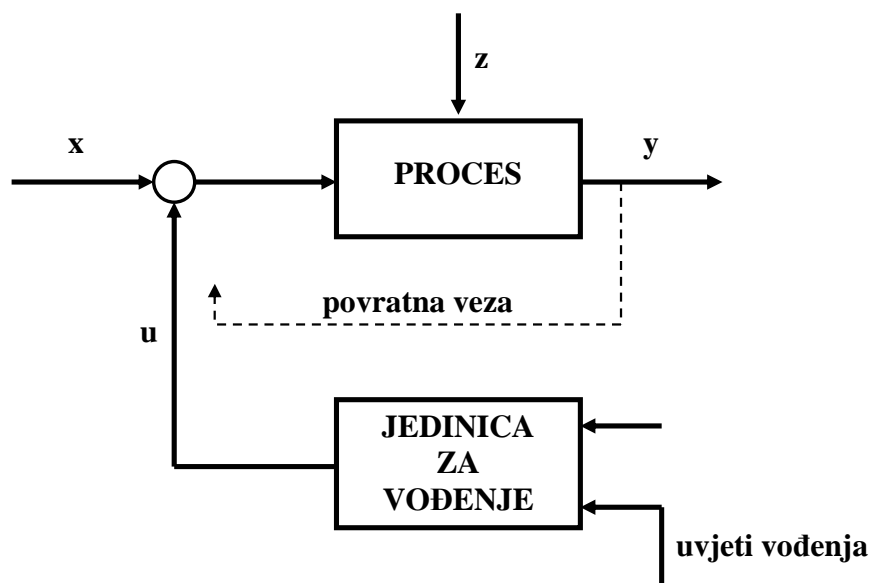
Za takav način vođenja koristi se naziv upravljanje, po uzoru na njemačku literaturu. U slučaju nepredvidivih poremećaja, jedinica za vođenje prati vrijednosti poremećajne veličine, djelovanje otkriva i sprječava unaprijed pomoću unaprijedne veze. Takav način vođenja se naziva unaprijedno vođenje i prikazano je na slici 3.



Slika 3. Unaprijedno vođenje

Kod zatvorenih sustava (slika 4) stvara se upravljačko djelovanje prema izlaznoj veličini pri čemu se utjecaj poremećaja otkriva na izlazu i djelovanjem jedinice za vođenje sprječava na ulaz procesa uz pomoć povratne veze. U takovim sustavima kao najvažnija značajka vođenja je zatvoreni krug djelovanja, koje osigurava da se izlazna veličina procesa vodi po željenom zakonu nezavisno o obliku i jakosti poremećaja. To nam načelo vođenja omogućuje vođenje procesa s različitim vladanjima, kao i procesa u kojima su radni uvjeti promjenljivi. Tako su mogući slijedeći slučajevi vođenja:

1. Održavanje unaprijed određenih zakona promjene vođene veličine. Takovi sustavi vođenja nazivaju se regulacijski, postupak vođenja reguliranje, a osnovna jedinica za vođenje regulator.



Slika 4. Regulacijski sustav

2. Održavanje takvih zakona promjene vođene veličine da proces djeluje u skladu s postavljenim kriterijima i pri promjenama unutrašnjih odnosa. Ovim tipom vođenja se žele postići i održati najpovoljniji proizvodni uvjeti pri promjenljivim odnosima u procesu. Takove sustave za vođenje nazivamo prilagodljivi ili adaptivni sustavi.

Njihov poseban slučaj je optimizacijski sustav u kojem se svrha postiže u danim okolnostima na najbolji mogući način.

3. Održavanje zakona promjene vođene veličine tako da proces djeluje u skladu s postavljenim kriterijima i pri promjenama odnosa u procesu uz istodobno uočavanje i svladavanje novih, povoljnijih i savršenijih zahvata vođenja. Takovi sustavi za vođenje u tijeku svog djelovanja poboljšavaju i usavršavaju svoje djelovanje tj. "uče" iz svojih upravljačkih djelovanja. To su najsavršeniji sustavi za vođenje i nazivaju se samouki sustavi.

4. Istraživanje i opisivanje vladanja procesa

Raznovrsna djelovanja kemijsko-tehnoloških proizvodnih procesa predmet su istraživanja brojnih zasebnih struka kao npr. termodinamike, hidrodinamike, fizikalne kemije, kemijskog

inženjerstva i dr. Svim tim strukama pristup koji je prisutan u teoriji vođenja bio je nepoznat, tako da se dinamičkom istraživanju nije posvećivala dovoljna pozornost. Jedini matematički opis u tim strukama bili su statičke bilance tvari i energije. Međutim, primjenom suvremene tehnike automatskog vođenja počinje primjena dinamičkih odnosa u procesu, pri čemu se vladanje sustava iskazuje zavisnošću njegovih izlaznih i ulaznih veličina. Zavisnost tako opisana naziva se **matematičkim opisom** ili **matematičkim modelom**, u kojem je zavisnost izlaznih i ulaznih veličina dana kao funkcija vremena.

Ovisno o obliku matematičkog modela procesi se promatraju kao dvije skupine: 1. jednostavni procesi i 2. složeni procesi. Jednostavni procesi su opisani običnim linearnim diferencijalnim jednadžbama s konstantnim koeficijentima, a složeni procesi su opisani običnim linearnim diferencijalnim jednadžbama višeg reda, te nelinearnim diferencijalnim jednadžbama, diferencijalnim jednadžbama s vremenski promjenljivim koeficijentima, parcijalnim diferencijalnim jednadžbama itd.

Najpotpunije su razrađeni teorija i primjena jednostavnih linearnih sustava, a u posljednje vrijeme su se razvili i postupci istraživanja složenih sustava, pri čemu su računala omogućila nadvladavanje određenih poteškoća u analizi i sintezi sustava.

Stoga je potrebno istaknuti da su za proučavanje vladanja sustava važna tri različita zadatka: 1. zadatak vođenja, 2. zadatak analiziranja i 3. zadatak identificiranja. Uz ove zadatke treba spomenuti i **dinamiku procesa**, koja se bavi istraživanjem i proučavanjem vremenskih promjena stanja sustava. Za to područje još se upotrebljavaju pojmovi **modeliranje** i **simuliranje procesa**.

Sve ovo je zapravo osnova za složenije postupke vođenja uz primjenu računala, što omogućuje vrlo brzo donošenje upravljačkih odluka prilagođenih tehnološkim uvjetima proizvodnje i poslovanja. Počeci primjene računala u vođenju procesa datiraju od sredine 1950-tih godina, pri čemu se oni koriste za **optimalizaciju procesa**. U kasnim 1950-tim godinama supstituiraju se analogne jedinice za vođenje sa digitalnim računalom, odnosno DDC (direct digital control), da bi se u 1960-tim godinama koncept optimalizacije ujedinio sa DDC u novi oblik "hijerarhijskog vođenja procesa", koji podrazumjeva upotrebu više računala. I konačno 1970-tih godina dolazi do distribuiranog sustava vođenja DCS (distributed control system) kao jedne od prihvatljivih alternativa prethodnim načinima

vođenja procesa. Taj DCS je najčešći oblik za vođenje procesa u industriji. Uređaje koji čine DCS po funkciji se mogu podijeliti u dva radna područja. To su uređaji koje koristi operater za praćenje i upravljanje procesom smještenim u upravljačkoj prostoriji, te dio uređaja koji služe za vođenje procesa.

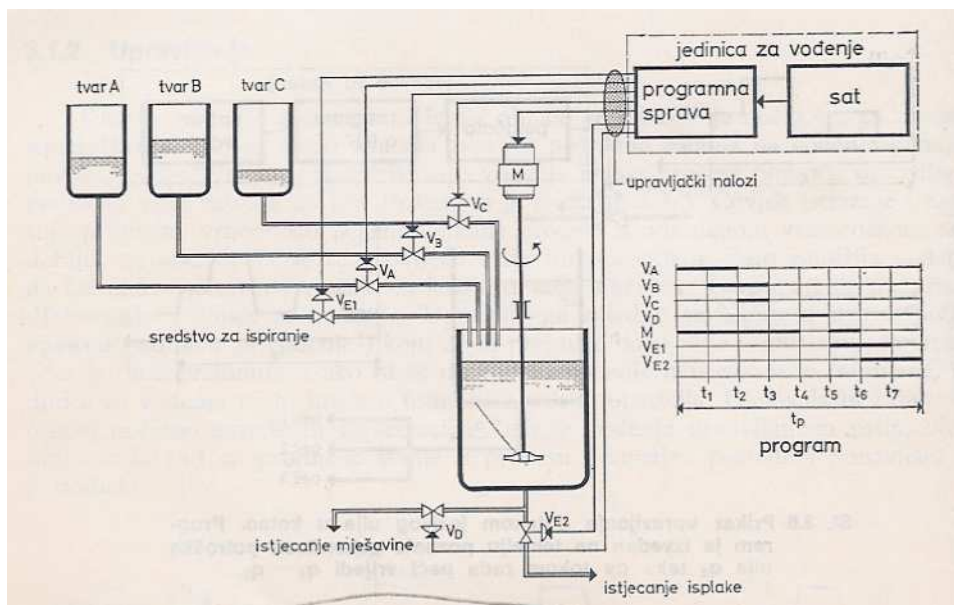
5. Načini vođenja procesa

Kao temelj za svrstavanje načina vođenja uzima se informacija koju jedinica za vođenje prima o procesu. Tako postoje dva temeljna načela vođenja: 1. načelo povratne veze i 2. načelo unaprijedne veze. Prvo je načelo izvedeno na temelju motrenja izlazne veličine, tj. na temelju informacija o stanju procesa. Drugo načelo je izvedeno na temelju motrenja ulazne veličine, tj. na temelju informacija o djelovanju okoline na proces. Zavisnost ovih vođenja prikazana je na slici 3. i 4. i to svaki zasebno.

Obje ove vrste vođenja razlikuju se prema djelovanju i izvedbi jedinice za vođenje. Kod unaprijednog vođenja potrebno je dobro poznavati proces, moguće posljedice djelovanja ulazne veličine na temelju koje se proces vodi. Zato ova jedinica uvijek sadrži i računsku jedinicu, te se unaprijedno vođenje ne proučava u okviru osnova automatike, nego se ubraja u složenije postupke vođenja.

5.1. Upravljanje

Upravljanje je način vođenja, koji se zapravo posredno oslanja na vođenje pomoću povratne veze, s time da povratnu vezu zatvara čovjek. Ako se npr. izlazna veličina zakonito mijenja i u određenim razmacima ponavlja, tada čovjek te zakonitosti zapisuje i pamti i taj "program" zajedno sa satnim mehanizmom ugrađuje u jedinicu za vođenje (upravljačku spravu), koju onda prepušta da djeluje samostalno. Povratna veza je time prekinuta i ako bi se u procesu pojavile nepredviđene promjene, jedinica za vođenje ne bi imala o tome nikakvih informacija. Ona bi djelovala i dalje na temelju početno ugrađenih informacija. Zato se vođenje upravljanjem primjenjuje samo onda kad su promjene stanja u procesu unaprijed poznate i ponavljaju se periodički. Primjer za upravljanje prikazat ćemo kod vođenja šaržnog procesa s miješanjem.



Slika 5. Upravljanje miješanjem triju tvari

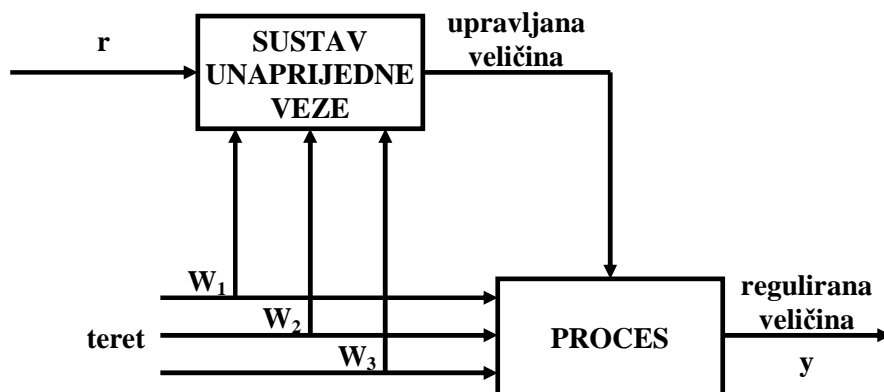
U reaktor se dovode tvari A, B i C, miješaju dok se ne ostvari željeno stanje mješavine. Nakon toga posuda se prazni i onda ispire. Postupak se može ponavljati po volji već prema potrebnoj količini mješavine. Sama zamisao upravljanja s ovim procesom prikazana je na slici 5., gdje je nacrtan program, koji je sastavljen u skladu s opisom. Tako se u početku otvara ventil V_A, nakon t₁ vremena otvara se ventil V_B i počinje raditi mješalica M. U vremenu t₂ se zatvara ventil V_A i prestaje dotjecati tvar A, a otvara se ventil V_C pri čemu dotječe tvar C. U vremenu t₄ se zatvaraju ventili V_B i V_C, a miješanje se nastavlja sve do vremena t₅ kad je postignuto željeno stanje mješavine. Mješavina se ispušta otvaranjem ventila V_D koji se zatvara kad je posuda ispražnjena. Tada se otvara ventil V_{E1} pri čemu počinje ispiranje uz miješanje, da bi se konačno otvorio ventil V_{E2}, ispustila isplaka i posuda bila ponovno spremna za pripremu nove smjese. I to bi bio tipičan primjer regulacije u "otvorenom krugu".

5.2. Reguliranje omjera

Reguliranje omjera predstavlja sustav koji održava odnos između dvije veličine kako bi osigurao regulaciju treće veličine. Takav sustav se koristi za miješanje sastavnih dijelova u novi proizvod ili pak kao napajanje kemijskog reaktora s dvijema komponentama.

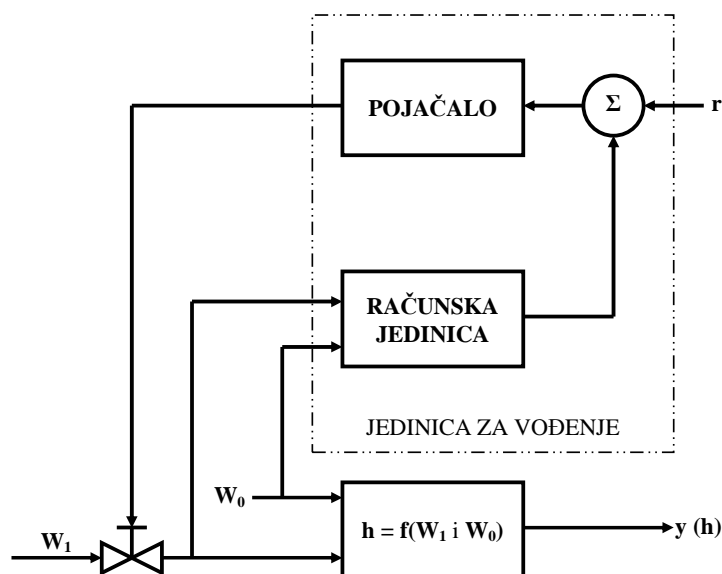
To reguliranje omjera je zapravo vođenje procesa s unaprijednom vezom. Unaprijedna veza je jedan od načina vođenja procesa, koji se temelji na promatranju ulazne veličine kako bi se procesna veličina (regulirana veličina) održala stabilnom. Pri tome vođenje unaprijednom vezom daje izravnija i brža rješenja od onih koja se postižu vođenjem s povratnom vezom. Naime, kod povratne veze najprije se mora pojaviti odstupanje od željene vrijednosti da bi sustav počeo reagirati, što je za brze procese presporo.

Kod unaprijedne veze većina ulaznih veličina (opterećenja) mjeri se i upotrebljava za računanje upravljane veličine kako bi cijeli regulacijski krug ostao na željenoj vrijednosti regulirane veličine. Informacije o ulaznoj veličini idu na unaprijedno računanje upravljane veličine (slika 6.)



Slika 6. Unaprijedna veza

I upravo zbog toga sustav unaprijedne veze u sebi mora sadržavati **računsku jedinicu**, koja rješava jednadžbe materijalne ili energetske bilance. Kad se pojavi promjena ulazne veličine, sustav unaprijedne veze tj. jedinica za vođenje podešava upravljanu veličinu na odgovarajuću vrijednost brzinom koja proces održava stalno u ravnoteži. Primjer vođenja s unaprijednom vezom može se prikazati na jednom hipotetskom procesu (slika 7.)



Slika 7. Unaprijedna veza na procesu

Čim dođe do nagle promjene opterećenja (ulazne veličine) W_0 , sustav unaprijedne veze odmah izračuna kakva treba biti upravljačka veličina na regulacijskom ventilu i protok W_1 kroz ventil, kako ne bi došlo do promjene razine h . Ta se operacija mora obaviti unaprijed i dovoljno prije nego što se promjena opterećenja može odraziti na proces (npr. na promjenu razine). U tu svrhu potrebno je točno mjeriti protok i definirati matematički model procesa. Jednadžbe matematičkog modela se riješe za upravljanu veličinu, koja je izlaz iz sustava unaprijedne veze. Tada se supstituira željena vrijednost (zadana vrijednost) za upravljanu veličinu.

5.3. Automatska stabilizacija

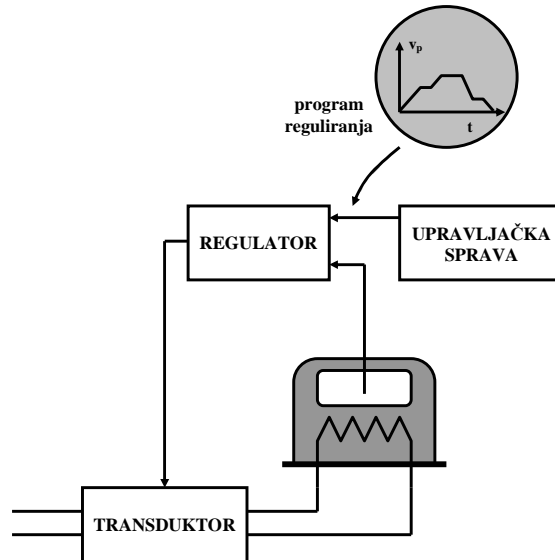
Vođeni proces može imati više ulaznih i izlaznih veličina, pa se put kojim se upravljački signal prenosi od izvršne sprave na ulazu u proces do mjernog osjetila na izlazu iz procesa zove **regulacijska staza**. Taj je pojam kod nas uvriježen prema njemačkom izrazu Regelstrecke, koji se u drugim svjetskim jezicima prevodi kao regulacijski vođeni proces.

Kod **automatske stabilizacije** vodeća veličina se drži nepromjenjivom i njena vrijednost mora odgovarati željenoj stalnoj vrijednosti vođene veličine.

Nejednoliki i nepredvidivi poremećaji (npr. potrošak vode) izazvat će promjene razine u spremniku i promjene hidrostatskog tlaka. Stabilizacijom razine, tj. održavanje razine na određenoj vrijednosti osigurava se stalan tlak bez obzira na promjenljiv potrošak. Pri tome je razina vođena veličina, dok je upravljana veličina dotok vode. Kao mjerno osjetilo služi plovak, a kao izvršna sprava ventil ili zasun. Može se pokazati primjer upravljanja ručnog i automatskog reguliranja. Kod automatskog reguliranja vođitelj - čovjek je zamjenjen regulatorom. Slično se može postaviti zadatak vođenja i kod održavanja stalne vrijednosti bilo koje druge fizičke ili kemijske veličine (temperatura, tlak, protok, razina, koncentracija itd.) Temeljno načelo povratne veze i odnosi unutar povratne veze ostaju nepromijenjeni bez obzira na raznovrsnost reguliranih veličina i različitost izvedbe regulacijskog sustava. Zato kada se radi o općem rješenju zadatka vođenja, nije potrebno posebno proučavati izvedbe regulatora, koje izvode različite tvrtke, a koje se mijenjaju i usavršavaju.

5.4. Programno reguliranje

U slučaju automatske stabilizacije za djelovanje regulacijskog kruga mjerodavan je poremećaj vođene veličine, dok je vodeća veličina stalna namještena vrijednost. Za djelovanje programskih, a i slijednih regulacijskih sustava bit će mjerodavna vodeća veličina. Tako je u programnom reguliranju vodeća veličina unaprijed određena zakonitost izmjene namještene vrijednosti koju slijedi vođena veličina. I to je zapravo regulacijski krug nadopunjen upravljačkom spravom, koja djeluje na postavnik i mijenja vrijednost namještene veličine prema nekom programu. Taj program može biti funkcija vremena ili parametarska funkcija bilo kakvih fizičkih veličina, koje su karakteristične za promjenu stanja vođenog sustava. Kao primjer programnog reguliranja prikazat ćemo održavanje (vođenje) temperature u peći za toplinsku obradu materijala (slika 8.).

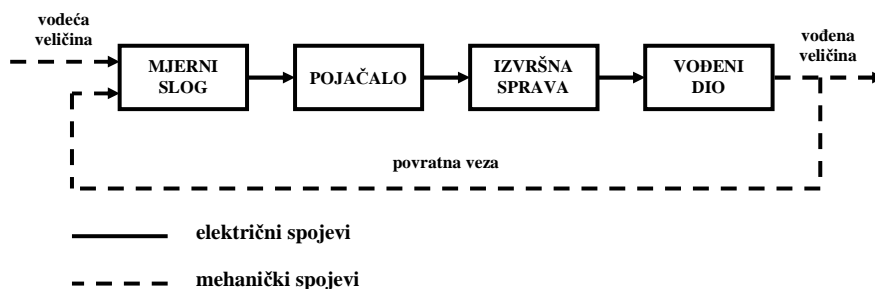


Slika 8. Održavanje temperature u peći za toplinsku obradu materijala

Programna jedinica u ovakvom krugu može se zamijeniti s **funkcijskom jedinicom**, koja daje vrijednosti vodeće veličine zavisno od vrijednosti nekog promjenljivog parametra po unaprijed zadanoj funkcionalnoj zavisnosti. Taj način vođenja naziva se **parametarskim programnim reguliranjem**, koje se primjenjuje kod programnog vođenja u gibanju, tzv. **navođenja**, koje je vezano uz slijedno reguliranje ili **slijeđenje**.

5.5. Slijedno reguliranje

Kod ovog sustava izlazna veličina slijedi uz pomoć povratne veze određenu vodeću veličinu promjenljivu na unaprijed nepoznat način. Kod takvih slijednih regulacijskih sustava, vođena veličina je gotovo uvijek pomak, brzina ili ubrzanje nekog tijela. Zato se i ovdje umjesto o vođenoj veličini govori o **vođenom dijelu**, jer se zapravo i vodi neki dio koji mijenja položaj, brzinu ili ubrzanje unutar vođenog sustava. Kad se pomoću tog vođenog dijela djeluje na položaj cjelokupnog sustava, onda se govori o **vođenom objektu**. Osnovni prikaz slijednog reguliranja prikazan je na slici 9.

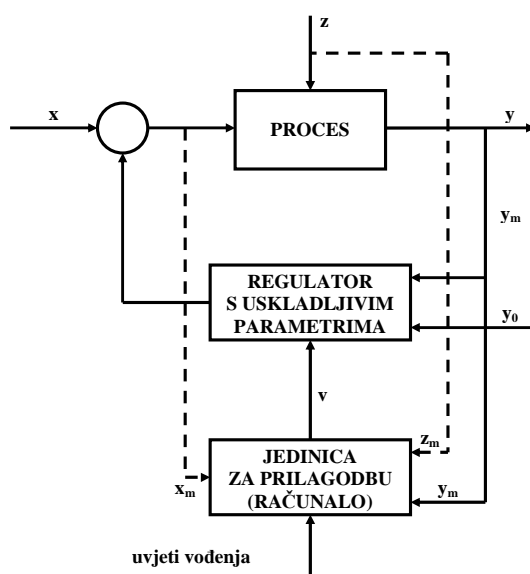


Slika 9. Slijedno reguliranje

Područje u kojem se primjenjuju slijedni regulacijski sustavi je zrakoplovstvo, brodarstvo i strojogradnja. Uređaji koji se koriste u slijednom reguliranju nazivaju se **servomehanizmi** (engl. servomechanism).

5.6. Prilagodljivo i nelinearno reguliranje

Sustav prilagodljivog (adaptivnog) vođenja omogućuje automatsko reguliranje njegovih parametara, ako dođe do promjene uvjeta vođenja u procesu. To znači da se u pravilu parametri s kojima radi jedinica za vođenje - regulator odražavaju na karakteristike procesa koji se regulira. Osnovni prikaz prilagodljivog (adaptivnog) sustava, koji je razvijen iz običnog (osnovnog) regulacijskog kruga prikazan je na slici 10.



Slika 10. Osnovni prikaz prilagodljivog sustava

Sustav je izveden tako, da je osnovnom regulacijskom krugu pridodan krug za prilagodbu, koji ocjenjuje nove uvjete i prilagođuje način rada osnovnog kruga novonastalim uvjetima kako bi se optimizirao njegov odziv. Oba kruga imaju zadan vlastiti cilj vođenja i **kazalo provedbe**. Pri tome kazalo provedbe kazuje način na koji treba provesti vođenje da bi se uz postavljene uvjete ostvario cilj. Svrha osnovnog kruga je automatska stabilizacija vođene veličine y na željenoj vrijednosti y_0 , a što znači da pri stacionarnom stanju mora razlika željene i stvarne vrijednosti vođene veličine biti manja ili jednaka nekoj po volji odabranoj maloj vrijednosti K . Pri tome kazalo provedbe ima oblik:

$$I_1 = |y_0 - y| \leq K$$

Uz pretpostavku da se tako postavljena svrha ne može ostvariti zbog promjenljivih uvjeta u procesu, postavljaju se još dodatni uvjeti, koje mora ispuniti drugi krug. Cilj drugog kruga je usklađivanje određenih parametara prvog (osnovnog) kruga i to tako da u odabranom intervalu vremena bude npr. integral razlike manji ili jednak od po volji odabrane male vrijednosti K . Pri tome je kazalo provedbe drugog kruga (krug za prilagodbu) slijedećeg oblika:

$$I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_i (y_0 - y_i) dt \leq K$$

Dakle, drugi krug sadrži funkciju u obliku niza, koja nastaje kao rezultat mjerenja vođene veličine: $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots$. Praćenjem tih veličina drugi krug (krug za prilagodbu) dobiva informacije o vođenom procesu i prati ih, obrađuje i donosi odluku o eventualnoj promjeni djelovanja prvog (osnovnog) kruga. Zato i drugi krug djeluje polaganije od prvog kruga. Prema tome prilagodljivi sustav karakterizira svojstvo automatskog mijenjanja uskladjivog parametra dok se ne ostvari **zadovoljavajuće djelovanje** s obzirom na postavljenu svrhu.

Ukoliko prilagodljivi (adaptivni) sustav ispunjava postavljenu svrhu ne samo na zadovoljavajući način, već i na **najbolji mogući** tj. **optimalan** način, on se naziva **optimizacijski sustav**, u kojem je kazalo provedbe dano izrazom:

$$I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_i |y_0 - y_i| dt = \text{minimum}$$

umjesto da se teži nekoj po volji odabranoj maloj vrijednosti.

Tako je, dakle, optimizacijski sustav, posebni slučaj prilagodljivog (adaptivnog) sustava u kojem se automatski mijenja neki njegov uskladjivi parametar i to tako da se postigne optimalno djelovanje obzirom na postavljenu svrhu i uz pretpostavljenu vrstu poremećaja. I upravo, zbog ovakve funkcionalno male, ali bitne razlike između adaptivnog i optimizacijskog sustava, često je teško određeno reći je li sustav adaptivan (prilagodljiv) ili optimizacijski.

Ukoliko se procesne nelinearnosti kompenziraju funkcijama samog regulatora tj. pojačanjem, promjenom zadane vrijednosti, derivacijskim djelovanjem i slično, tada se ne radi o tipično prilagodljivom reguliranju, već o nelinearnoj regulaciji, koja se može smatrati kao podgrupa prilagodljivog (adaptivnog) reguliranja.

Kada su nepoznati ili nemjerljivi odzivi koji uzrokuju promjene u regulacijskom krugu te se ne može primjeniti programirana prilagodba, prilagođavanje se temelji na odzivu samoga kruga tj. ono je **samoprilagodljivo**. Takovo reguliranje je teže od programirane prilagodbe, budući da je potreban točan proračun odziva kruga.

5.7. Vođenje procesa iz središta

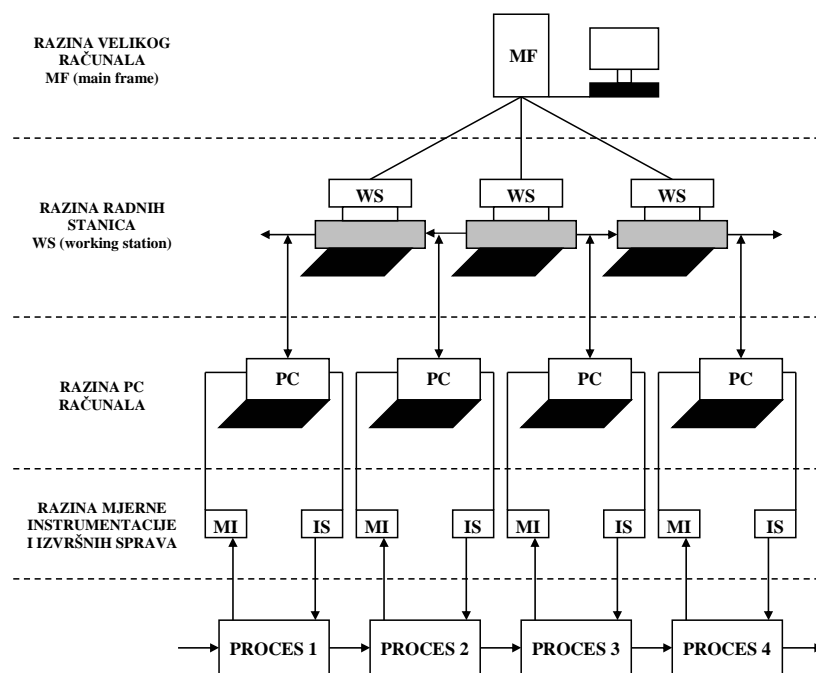
Kod ovog vođenja procesa iz središta karakteristično je da su svi signali dostupni operateru na jednom mjestu.



Slika 11. Izgled upravljačke sobe

Pri tome se takvo središte sastoji od jednog panela s jedinicama za vođenje, osjetilima, pokazivalima itd. Sve indikacije i uređaji za vođenje procesa nalaze se na panelu i dovedeni su na dohvat operatera. U ovom slučaju jedno računalo vodi sveukupni proizvodni sustav kao cjelinu, koji je podijeljen u podsustave koji su suvisle cjeline. Zatim su ti podsustavi podijeljeni u pod-podsustave i tako redom dok nije ostvarena jedna razumna i svrsishodna razloženost u kojoj svaki podsustav ima svoj cilj djelovanja podređen cilju cijelog proizvodnog procesa.

U industrijskim pogonima razvijena je višerazinska struktura računalne mreže, što je shematski prikazano na slici 12.



Slika 12. Shematski prikaz višerazinske strukture računarske mreže

Na slici su prikazane slijedeće razine u CIM strukturi:

1. procesna razina
2. razina mjernih i izvršnih sustava
3. razina PC računala za neposredno upravljanje pojedinim procesnim jedinicama
4. razina računala u klasi radnih stanica ("working stations", WS)
5. razina glavnog računala ("main frame", MF)

Procesne jedinice i računala su povezana u cjelinu koja ima organiziranu strukturu u više razina. Za upravljanje se koristi veći broj računala raspodjeljenih u proizvodnom pogonu. Upravljanje proizvodnjom gdje su računala raspodjeljena i namjenjena upravljanju zasebnim procesnim jedinicama naziva se raspodijelnim računalnim upravljanjem ("distributed computer control", DCC).

Osnovnu razinu čine zasebne procesne jedinice koje su neposredno ("on line") upravljane. U početku primjene računala, ona su se primjenjivala tako da se koristilo jedno veliko središnje računalo. Razvojem tehnologije poluvodičkih elemenata (čipova) cijena računala postaje sve

manje značajna i primjenjuje se sve veći broj malih računala (PC) za upravljanje proizvodnjom u pogonu.

Mjernim sustavima se mjere procesne veličine stanja, kao npr. tlak, protok, temperatura, pH itd. dok izvršni sustav čine regulacijski ventili, sklopke, pumpe itd.

Na prvoj računalnoj razini se nalaze PC računala, koja služe za neposredno upravljanje pojedinim procesima, a koja su povezana horizontalno tako da je omogućena sinhronizacija rada procesnih jedinica.

Informacije s razine neposredne proizvodnje se prenose na višu razinu, gdje su WS računala, koja obavljaju složene zadatke upravljanja, kao npr. projektiranje procesne opreme, optimiranje proizvodnih planova za pojedine proizvode.

I konačno na najvišoj razini imamo glavno računalo, MF koje ima najveću procesnu moć obrade informacija, pri čemu najčešće optimiraju proizvodnju za cjelokupno poduzeće ili obavljaju financijsko poslovanje.

5.8. Primjena računala u automatskom reguliranju procesa

Pri optimiranju rada složenih tehnoloških procesa neophodno je potrebno obrađivanje mnoštva podataka o mjernim i reguliranim veličinama, kao i o svojstvima i vrijednostima mnogih drugih karakterističnih veličina i svojstava sirovina, energije i gotovih proizvoda. To se najčešće izvodi s pomoću analognih, digitalnih i kombiniranih elektroničkih računala. Stoga se kod suvremenih izvedbi sustava za reguliranje koriste poboljšani regulacijski uređaji i oprema, koji se povezuju s elektroničkim procesnim računalima.

Suvremeni oblici reguliranja procesa uz pomoć računala ostvaruju se na nekoliko načina:

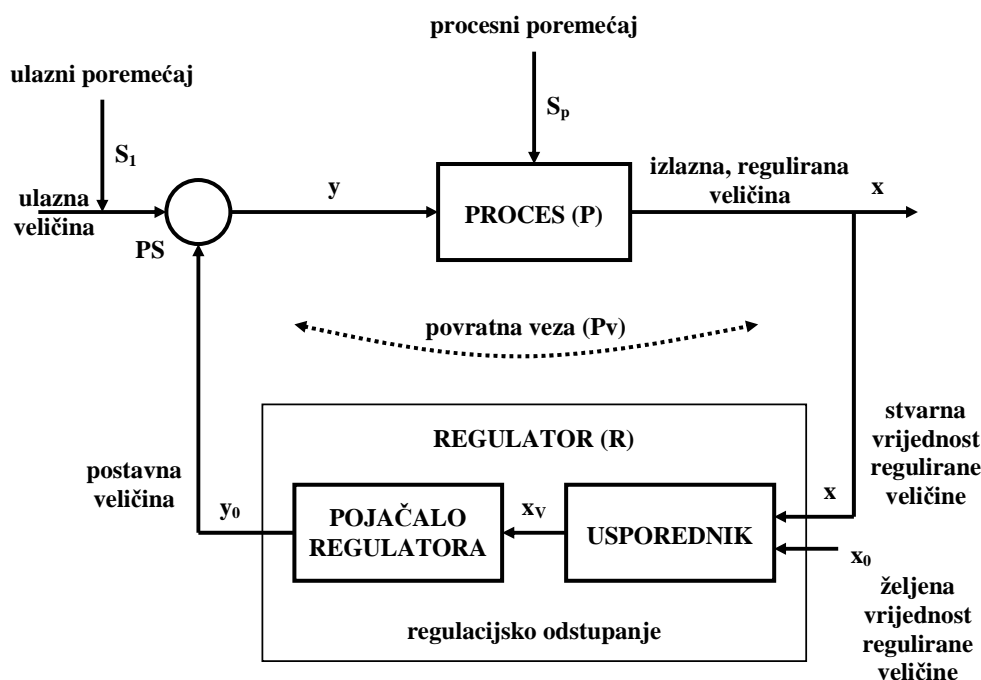
1. prikupljanjem, arhiviranjem i statističkom obradom podataka o stanjima, trenutnim vrijednostima i promjenama najvažnijih procesnih veličina. To je tzv. **protokoliranje procesnih veličina**
2. mjerenjem, određivanjem točnih vrijednosti i korekcijom višestruko ovisnih vrijednosti mjerenih veličina

3. izračunavanjem točnih i željenih vrijednosti višestruko ovisnih reguliranih veličina
4. izračunavanjem i optimizacijom željenih vrijednosti reguliranih veličina s pomoću modela procesa
5. automatskim vođenjem i optimiranjem tokova više procesa s pomoću centralnih računala

Izbor načina vođenja procesa s pomoću računala ovisi o tehničko-tehnološkim svojstvima procesa, njegovoj tehničkoj izvedbi i gospodarskoj isplativosti. Uglavnom računala služe za kontinuiranu pogonsku obradu podataka o stanju procesa, za obradu znanstveno-tehničkih problema i stručnu (ekspertnu) analizu smetnji, zastoja i kvarova, koji nastaju u procesima.

6. Djelovanje zatvorenih krugova vođenja

Opći i načelni oblik strukturnog prikaza (blok-sheme) jednog regulacijskog kruga može se prikazati na slici 13.



Slika 13. Opći oblik blok-sheme regulacijskog kruga

Na slici 13. su simbolično, uz pomoć pravokutnika, naznačeni **proces** (P) i **regulator** (R). Pri tome se regulator obično sastoji od **usporednika** (Usp), koji uspoređuje stvarnu i željenu vrijednost regulirane veličine. Sam regulator je zapravo pojačalo, kojim se pojačavaju i oblikuju izlazni signali regulatora tj. njegova izlazna veličina, koja djeluje na **postavnu spravu** (PS) i preko nje određuje potrebnu i točnu vrijednost ulazne veličine procesa. Još su na slici označeni i poremećaji (S_p i S_1), a koji utječu na tok procesa i na njegovu ulaznu veličinu. Npr. kod grijanja prostorije to mogu biti: utjecaj temperature okoline, odnosno kvaliteta i količina energije ogrijevnog medija, otvaranje prozora, vrata itd.

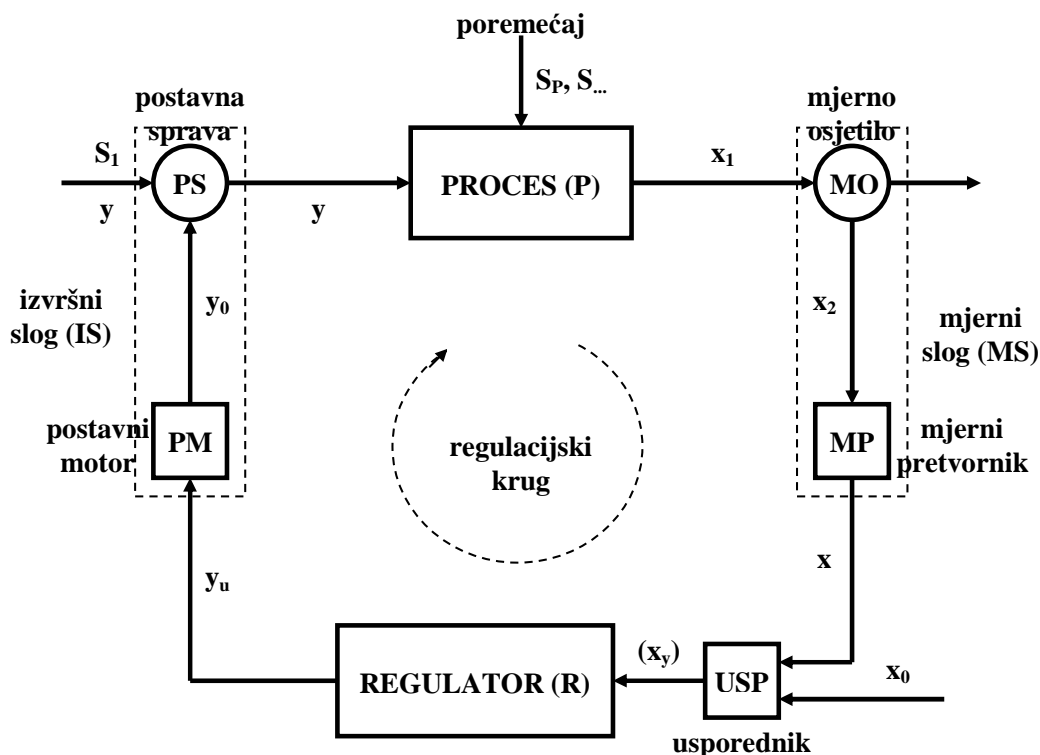
Kao najvažnije značajke kod zatvorenih krugova vođenja su **pozitivna i negativna povratna veza**. U proizvodnim sustavima najčešće se primjenjuje negativna povratna veza, koja održava normalan tok procesa. Ona pomoću izlaznih veličina preko regulatora djeluje na ulazne veličine procesa te stabilizira izlaznu veličinu pri čemu je održava na željenoj vrijednosti. Na svaki porast vrijednosti izlazne veličine procesa iznad njezine željene vrijednosti sustav smanjuje vrijednost ulazne veličine procesa. U suprotnom slučaju tj. pri smanjenju vrijednosti izlazne veličine procesa ispod željene vrijednosti, sustav povećava vrijednost ulazne veličine procesa.

Što se tiče pozitivne povratne veze, ona je u automatskom reguliranju procesa uglavnom štetna i nepoželjna i destabilizira regulacijski krug. Primjer pozitivne povratne veze je izgaranje plamena u ložištima peći ili lančani proces razbijanja atoma koji se sam od sebe ubrzava, pri čemu nastaje atomska eksplozija.

7. Građa regulacijskih krugova

U znanosti o sustavima, pa tako i u automatskom reguliranju uobičajeno je da se sustavi i njihovi dijelovi prikazuju i analiziraju uz pomoć strukturnih ili blok-shema, pri čemu su složeni sustavi jednostavniji i razumljiviji, te nije potrebno učenje detalja o vrstama opreme i izvedbama brojnih i raznovrsnih jedinica u regulacijskom krugu. Stoga se ti dijelovi prikazuju kao "crne kutije" s jednim blokom ili shemom blokova, s naznačenim njihovim važnim i bitnim veličinama (mjernim ili reguliranim, ulaznim i izlaznim).

Npr. kod procesa grijanja prostorije, njegova ulazna veličina je dotok topline ogrjevnom mediju (vodena para ili vruća voda). Izlazna (regulirana) veličina procesa je temperatura grijane prostorije. Poremećaji koji djeluju na proces su vanjski poremećaji, koji djeluju na proces grijanja prostorije, a to su promjena vanjske temperature ili promjena temperature zbog bilo kakvog nenormalnog odvođenja topline iz prostorije (otvaranje prozora, vrata itd.) Primjer kruga automatskog reguliranja procesa može se prikazati kao na slici 14.



Slika 14. Blok-shema regulacijskog kruga

Kod ovog kruga neke od jedinica regulacijskog kruga su izostavljene, neke objedinjene jednom jedinicom ili su podijeljene na manje ili više dijelova, pri čemu se mijenjaju stvarna svojstva i vladanje mjernih slogova ili regulacijskih krugova.

Među najvažnije dijelove regulacijskih krugova ubrajaju se **mjerni slogovi**, koji mogu biti jednostavni, ali i vrlo složeni, a dijele se na **mjerno osjetilo** i **mjerni pretvornik**. Oni uvijek prihvaćaju, primaju i prenose signale mjernih veličina, pretvaraju u signale drugih vrsta fizičkih veličina i u njihove analogne vrijednosti pogodne za nadzor i vođenje procesa.

Usporednici su slijedeći dijelovi regulacijskih krugova, koji se još nazivaju **komparatorima**, a njihov zadatak je uspoređivanje stvarne i željene vrijednosti regulirane veličine. Oni su najčešće ulazni i sastavni dijelovi regulatora, a izvode se kao električni mjerni most.

Regulator je najsloženiji dio kruga automatskog reguliranja, koji uvijek djeluje s negativnom povratnom vezom. Grade se u mnogo različitih izvedbi i sa njima se signali regulacijskih odstupanja pojačavaju na optimalne vrijednosti za brzo pokretanje izvršnih dijelova regulacijskih krugova.

Izvršni dijelovi sustava za automatsko reguliranje procesa su **postavni motori**, koji mogu biti pneumatički, hidraulični, elektromagneti, te **postavne sprave**, kao npr. električni izvršni dijelovi, ventili itd., pri čemu su njihove ulazne veličine električni, pneumatski ili hidraulički pogonski signali, a izlazne ili postavne veličine mehanički pomaci, snaga i rad, kojima izvršni organi pokreću postavne dijelove i sprave regulacijskih krugova. U primjeru grijanja prostorije postavna sprava je ventil kroz koji protječe struja ogrijevnog medija (vodene pare ili vruće vode).

8. Statičke i dinamičke značajke zatvorenih regulacijskih krugova

Iz matematičkih opisa zatvorenih regulacijskih krugova mogu se odrediti i prikazati grafički oblici njihovih statičkih i dinamičkih značajki.

Pri tome se statičke značajke (karakteristike) crtaju za stacionarna stanja, kada su vrijednosti signala ustaljene i to su u načelu pravci. Matematički izraz za statičku karakteristiku u općem obliku glasi:

$$y = f(x) \quad \text{ili} \quad y = Kf(x)$$

koji kaže da su izlazne veličine jedinica (y) funkcije njihovih ulaznih veličina (x) i pojačanja (K). One mogu biti linearne ili nelinearne, pravci ili krivulje različitih oblika i nagiba. Linearne karakteristike sa stajališta prijenosa i pretvorbe signala su najpoželjnije i najbolje, ali ih je pri praktičnim izvedbama teško ili nemoguće postići.

U praktičnim izvedbama jedinice za vođenje najčešće su jedinice s nelinearnim statičkim karakteristikama, koje stvaraju znatne poteškoće u automatskom reguliranju. Stoga se one nastoje promijeniti ili prikladno linearizirati i onda upotrijebiti u onim područjima u kojima njihovi nedostaci najmanje utječu na točnost reguliranja. Ovdje će se prikazati primjer primjene statičkih karakteristika pri vladanju regulacijskih krugova.

Dinamičke karakteristike pokazuju vrijednosti i promjene oblika izlaznih veličina u ovisnosti o vrijednostima i brzini promjena ulaznih veličina. Zato se u izrazima za dinamičke karakteristike, uz vrijednosti ulaznih signala (x), pojavljuju i vrijednosti vremena (t), te se one opisuju matematičkim izrazom:

$$y = f[x(t)] \quad \text{ili} \quad y = Kf[x(t)]$$

gdje su y izlazna veličina, a K karakteristični parametar odnosno pojačanje jedinice.

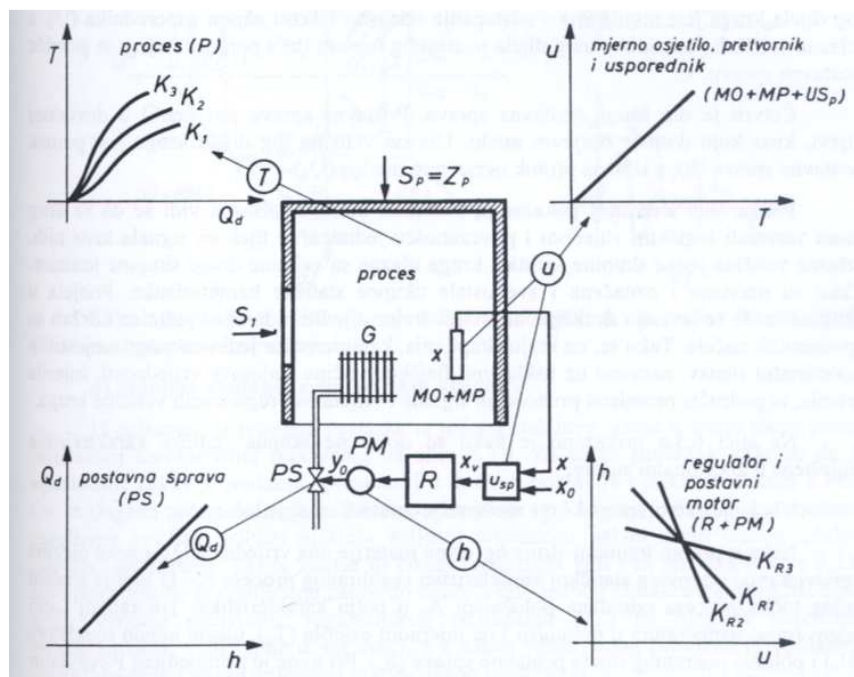
Najznačajnije dinamičke karakteristike su

1. prijelazne i
2. frekvencijske karakteristike

9. Grafička analiza vladanja regulacijskih krugova s pomoću statičkih karakteristika

Grafička analiza je jednostavna i prikladna za proučavanje manje složenih regulacijskih krugova kad su poznate samo statičke karakteristike njegovih jedinica. Za tumačenje postupka poslužit će primjena reguliranja temperature prostorije. Kao osnova za analizu ovdje služe statičke karakteristike jedinica regulacijskog kruga.

Te jedinice regulacijskog kruga dijele se u 4 skupine i za njih se mogu definirati 4 skupne statičke karakteristike (slika 15.)



Slika 15. Podjela i statičke karakteristike regulacijskog kruga

Prvi dio, s posebnom karakteristikom je **proces** grijanja prostorije. Ulazna veličina procesa je dotok ogrijevne tvari (Q_d), a izlazna veličina je temperatura prostorije (T). Pri tome se uzima da je glavna značajka ogrijevne tvari njezina ogrijevna moć i njezine promjene utječu na stabilnost i ispravnost grijanja. Utjecaj promjena ogrijevne moći može se prikazati s pomoću odgovarajućih statičkih karakteristika reguliranog procesa (K_1 , K_2 , K_3).

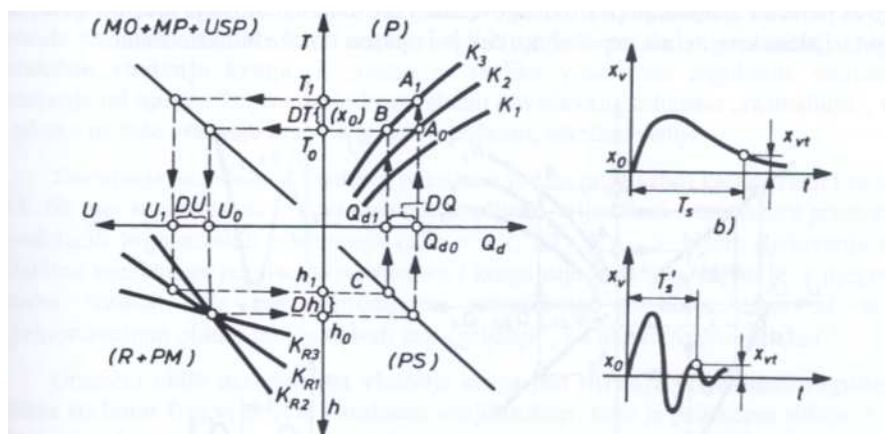
Drugi dio kruga predstavlja **mjerno osjetilo, pretvornik i usporednik** u kojem je ulazna veličina temperatura (T) koju osjeća mjerno osjetilo i prenosi pretvornik, dok je izlazna veličina napon (U) koji se dobiva na izlazu usporednika, koji je izveden kao elektirčni mjerni most.

Treći dio kruga je **regulator i postavni motor**, kod kojeg je ulazna veličina regulacijsko odstupanje odnosno izlazni napon usporednika (U), a izlazna veličina pomak izvršnog dijela postavnog motora (h) s pomoću kojeg on pomiče postavnu spravu.

I konačno četvrti dio kruga je **postavna sprava** tj. ventil u dovodnoj cijevi kroz koju dotječe ogrijevni medij. Pri tome je za taj dio kruga ulazna veličina pomak postavne sprave (h), a izlazna protok ogrijevnog medija (Q_d).

Primjer analiziranja

Na slici 16 prikazane su skupne statičke karakteristike smještene u koordinatni sustav, kao i primjer analiziranja regulacijskog kruga



Slika 16. Primjer analiziranja regulacijskog kruga

Pretpostavimo da struja ogrijevne tvari ima vrijednost Q_{d0} i njezina ogrjevnja moć odgovara statičkoj karakteristici reguliranog procesa K_2 . U tom slučaju radna točka procesa je određena položajem A_0 u polju (P) karakteristika. Toj radnoj točki odgovaraju: temperatura u prostoriji i na mjernom osjetilu (T_0), ulazni napon regulatora (U_0) te položaj pokretnog dijela postavne sprave (h_0). Pri tome je primjenjeni P - regulator ugođen na proporcionalno područje, odnosno pojačanje koje odgovara karakteristici djelovanja K_{R1} .

Ako u određenom trenutku nastupi poremećaj i to tako da počne dolaziti ogrijevni medij veće ogrijevne moći koja odgovara vrijednostima na karakteristici K_3 , pomaknut će se radna točka kruga u položaj A_1 , temperatura prostorije će porasti na vrijednost T_1 , a ulazni napon regulatora na vrijednost U_1 . Pri tome će regulator, uz pomoć postavnog motora, smanjiti podizaj pokretnog dijela ventila na vrijednost h_1 , a struja ogrijevne tvari će se smanjiti na vrijednost Q_{d1} . Ta smanjena struja tj. struja toplijeg ogrijevnog medija, nakon djelovanja regulacijskog kruga dat će istu željenu vrijednost regulirane veličine, tj. temperaturu prostorije T_0 . I to stanje odgovara novom mjestu radne točke procesa B i novom položaju postavne sprave C. Nakon toga regulator prestaje djelovati, jer više nema nedopustivog regulacijskog odstupanja.

U opisanom primjeru prelazak iz jednog stabilnog stanja u drugo je tekao prema prijelaznoj karakteristici prikazanoj na slici 16.b. I za takav prelazak se kaže da je **aperiodični**. On se događa polako, pri čemu se regulacijsko odstupanje (x_v) smanji, a stvarna vrijednost regulirane veličine se približi željenoj vrijednosti nakon reguliranja. Vrijeme smirivanja regulacijskog odstupanja (T_s') na njegovu dopuštenu vrijednost (x_{vt}) traje dosta dugo i nakon njega, uslijed primjene P - regulatora, ostaje određena stalna vrijednost regulacijskog odstupanja. To vrijeme smirivanja regulacijskog odstupanja nastoji se u praksi što više skratiti, što se postiže na razne načine. Tako se to može izvoditi pomoću pojačanja K_R uz primjereno njegovo ugađanje, pri čemu T_s' postaje kraće te se postiže x_{vt} brže i njegova je vrijednost blizu dopuštenog odstupanja regulirane veličine (slika 16.c.). Takav regulacijski krug djeluje stabilno, što mu omogućuje djelovanje negativne povratne veze.

10. Sinteza regulacijskog kruga

Regulacijski krug postavljen pri projektiranju prema prvoj zamisli ne mora odmah zadovoljiti postavljenim uvjetima obzirom na dinamičke karakteristike. On može biti nestabilan, a može biti i stabilan, ali s nepovoljnim vladanjem pri djelovanju prijelaznih pojava. Zato se svaki regulacijski krug nakon što je zamišljen, ispituje i prema potrebi se poboljšava njegovo vladanje. To je tzv. ugađanje regulacijskog kruga.

Postupci poboljšavanja i ugađanja vladanja regulacijskog kruga spadaju u područje sinteze, jer se pomoću njih određuje i dodaje krugu takvo dopunsko vladanje pomoću kojeg se postiže da i sveukupno vladanje kruga odgovara određenim uvjetima. To se ostvaruje odabiranjem prikladnog vladanja regulatora.

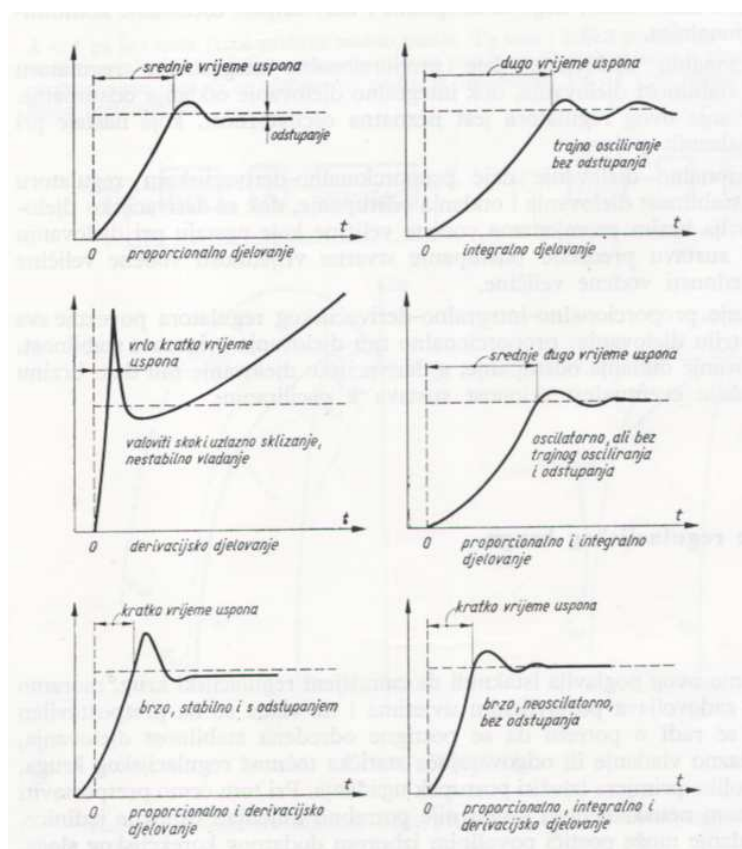
Tako pošto je proces proučen, odabiru se mjerni pretvornici i izvršne sprave i povezuju u regulacijski krug pomoću regulatora, koji ima u sebi ugodivi parametar pomoću kojeg se ugađa prijenosna funkcija i time vladanje kruga u cjelini. Prema karakteristikama regulatora, mogu se ugađati statička osjetljivost, konstanta derivacije i konstanta integracije ili se u krug uključuje dodatni **korekcijski slog**.

Kao prvi i osnovni korak pri istraživanju vladanja regulacijskog kruga je ispitivanje njegove **stabilnosti**. Pa je tako stabilan onaj krug u kojem se nakon djelovanja prijelazne pojave

postoji postojano stanje, dok je nestabilan onaj u kojem se prijelazna pojava ne smiruje i neželjeno raste do fizičkih ograničenja. Teorijski pojava nestabilnosti se objašnjava pomoću matematičkog modela regulacijskog kruga linearnog procesa, pri čemu odziv procesa zavisi od vrijednosti korijena (rješenja) karakteristične jednačbe. Tako je linearni sustav nestabilan, ako njegova karakteristična jednačba ima barem jedno pozitivno realno rješenje ili barem jedno konjugirano kompleksno rješenje s pozitivnim realnim dijelom. Pri istraživanju stabilnosti linearnog sustava razvili su se posebni **kriteriji stabilnosti**, koji pokazuju je li istraživani sustav stabilan ili nestabilan, ali ne i kako ga učiniti stabilnim. Ti su kriteriji važan sastavni dio postupka sinteze.

Izbor vladanja regulatora

Prikaz prijelaznih karakteristika za jedan sustav vođen regulatorima različitih djelovanja može se prikazati slikom 17.



Slika 17. Prikaz prijelaznih karakteristika za jedan sustav vođen regulatorima različitih djelovanja

U tom prikazu se može uočiti značajnije značajke pojedinog slučaja:

1. Za P - regulator je karakteristična jednostavnost, stabilnost i neposrednost, pri čemu on daje određeno **odstupanje** stvarne vrijednosti vođene veličine od željene vrijednosti vođene veličine. Kod skok promjene, to se odstupanje očituje kao preostala stacionarna pogreška.
2. I - regulator ne uzrokuje u sustavu odstupanje, ali se prijelazna karakteristika sustava vođenog s I - regulatorom **ne smiruje**. Stvarna vrijednost vođene veličine oscilira oko željene vrijednosti, a
3. D - regulator se trenutačno suprostaavlja djelovanju poremećaja i to s brzim odzivom u obliku valovitog skoka koji prelazi u uzlazno klizanje vođene veličine. I tako vođeni sustav postaje nestabilan.

Ova djelovanja I i D regulatora su nepovoljna i oni se nikad ne upotrebljavaju samostalno, nego se integralno i derivacijsko djelovanje kombinira s proporcionalnim djelovanjem.

Tako kod PID - regulatora imamo povezivanje djelovanja svih triju djelovanja, tj. P mu daje stabilnost, I mu otklanja odstupanje, a D mu daje brzinu odziva i prigušuje eventualnu sklonost sustava k osciliranju.

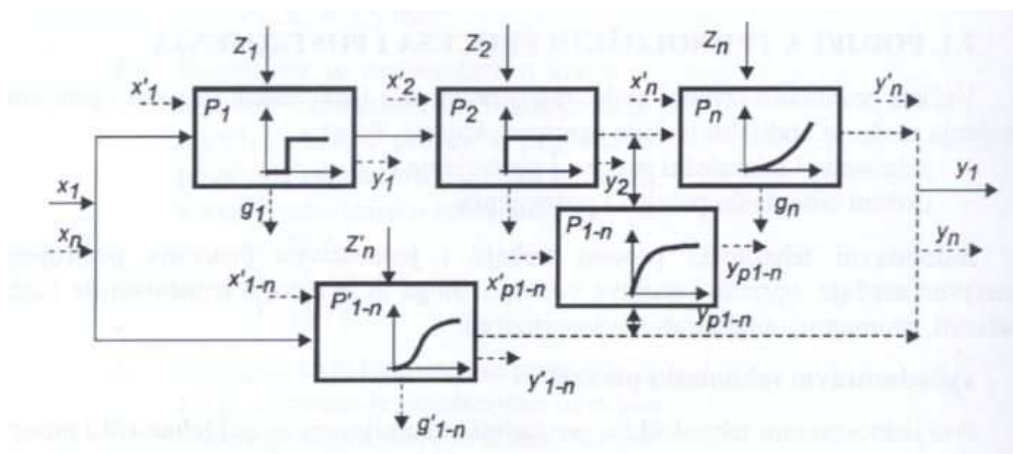
11. Složeni tehnološki procesi

U praksi postoji mnogo suvremenih tehnoloških procesa, koji su sve složeniji i za koje se koriste najsloženiji sustavi vođenja, s mnoštvom mjernih, signalnih i zaštitnih slogova, te određenih upravljačkih i regulacijskih krugova. Tako većinu suvremenih tehnoloških procesa možemo podijeliti u dvije osnovne skupine:

- jednostavni tehnološki procesi,
- složeni tehnološki procesi

Jednostavni tehnološki procesi su oni kod kojih se održava stabilnost vođenjem samo jedne veličine, kao npr. tlaka, protoka, temperature, pH - vrijednosti itd.

Složeni tehnološki procesi se sastoje od više jednostavnih operacija i za njih se koriste složeni sustavi vođenja, čiji se opći oblik tehnološke sheme može prikazati slikom 18.



Slika 18. Opći oblik tehnološke sheme složenih procesa

U ovoj shemi glavne značajke su:

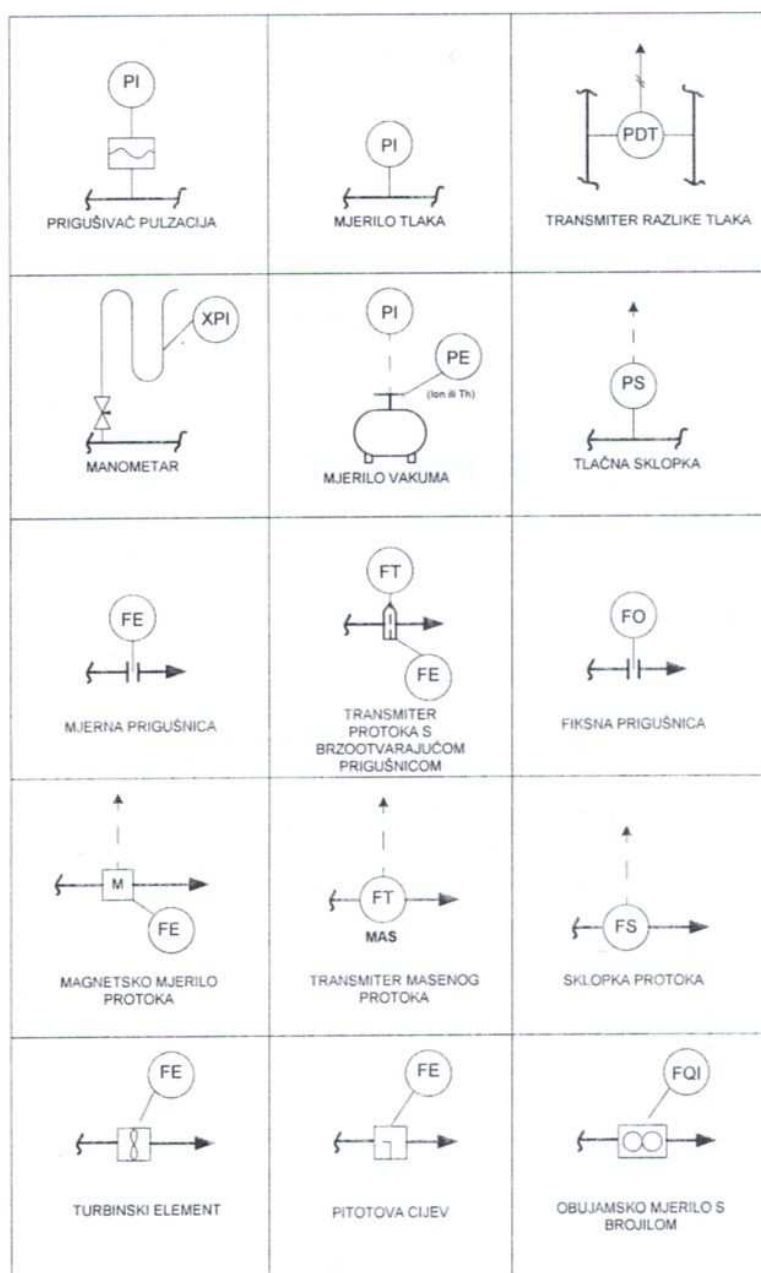
- ulazne veličine ($x_1 \dots x_n, x'_1 \dots x'_{1n}, \dots x'_{1-n}, \dots x_{p1-n}$),
- ulazne veličine ($y_1 \dots y_n, \dots y'_{1-n}, \dots y_{p1-n}$),
- poremećaji ($z_1 \dots z_n, \dots z' \dots z'_{p1-n}$)
- gubici ($g_1 \dots g_n, \dots g'_{1-n}, \dots g_{p1-n}$).


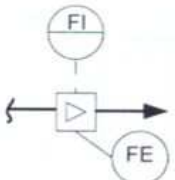


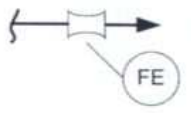

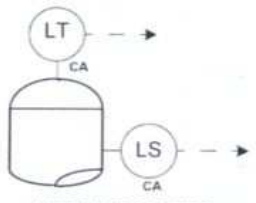
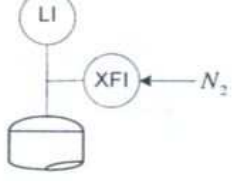
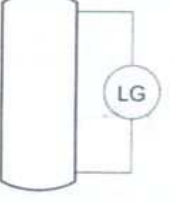
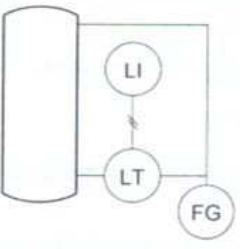
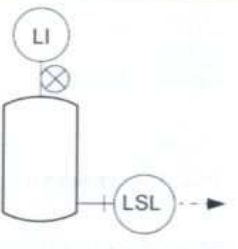
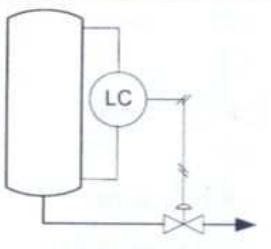

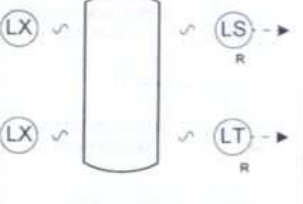
U nju su još nacrtane i pripadne prijelazne karakteristike. Ti dijelovi složenih procesa mogu biti međusobno vezani **serijski** (P_1, P_2, \dots, P_n), **paralelno** ($P_1, P_2, \dots, P_n, P'_{1-n}$) i **mješovito** (P_{p1-n}). Svi dijelovi tako složenih procesa mogu biti vođeni zasebno ili zajednički, s "ručnim" ili djelomično automatiziranim vođenjem i usklađivanjem ukupnog djelovanja. Vođenje se može izvesti i potpuno automatski, optimiranjem djelovanja pojedinih dijelova ili optimiranjem tokova cjelokupnih procesa.

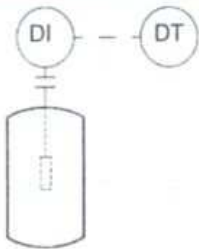
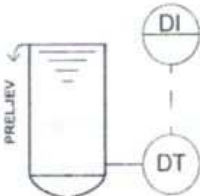
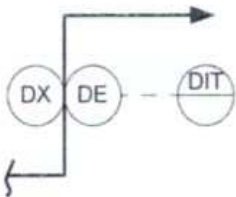

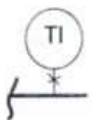
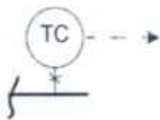
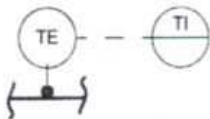
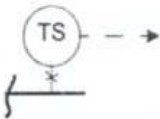
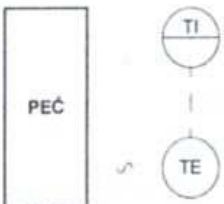











11.1. Osnovni dijelovi projekta vođenja procesa i instrumentacije







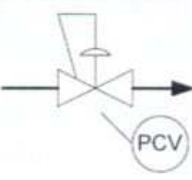
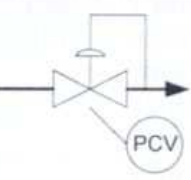
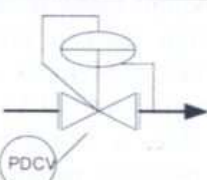
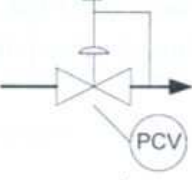
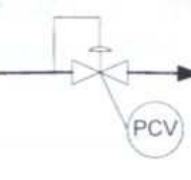
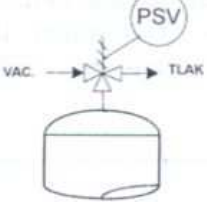
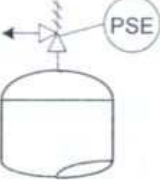

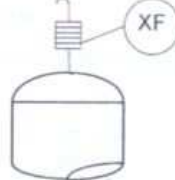
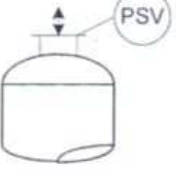
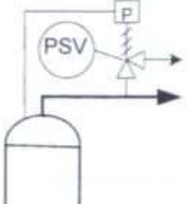
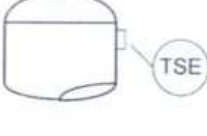
Najvažniji dio projekta čine PF i PI sheme ili dijagrami, u kojima je definirana tehnologija procesa te način regulacije. PF shema čini tehnologiju dijela ili cijelog postrojenja i to je

tehnološka shema, odnosno process and flow diagram. Toj shemi se obično još dodaje materijalna bilanca tj. sastav fluida, temperature i tlakovi na ulazu i izlazu te pojedinim sekcijama postrojenja dimenzije, materijal i radni uvjeti. PI shema daje potpunu sliku dijelova ili cijelog postrojenja. Na njima se prikazuju svi dijelovi postrojenja s njihovim dimenzijama, zatim prikaz cjelovite procesne instrumentacije te regulacijskih krugova, pa do pomoćnih medija i energetika. Tako je PI shema najvažniji dokument, na kojem mora biti prikazano sve što se odnosi na funkcioniranje tehnologije i vođenja procesa. Na slici 19. prikazat ćemo procesne oznake nekih instrumenata.



 <p>INDIKATOR PROTOKA (STAKLO)</p>	 <p>VRTLOŽNO MJERILO PROTOKA</p>	 <p>ULTRAZVUK ULTRAZVUČNO MJERILO PROTOKA</p>
 <p>ROTAMETAR</p>	 <p>VENTURIJEVA CIJEV</p>	 <p>PRIKLJUČAK NA PRIRUBNICI ILI KOLJENU (BEZ PRIGUŠNICE)</p>
 <p>MJERENJE RAZINE S KAPACITIVNOM SONDOM</p>	 <p>MJERENJE RAZINE S MJEHURIČIMA</p>	 <p>MJERILO RAZINE (STAKLO)</p>
 <p>RAZINA UZ POMOĆ RAZLIKE TLAKA</p>	 <p>UREĐAJ S PLOVKOM ZA RAZINU</p>	 <p>REGULACIJA RAZINE S RONCEM</p>
<p>LI DP INDIKATOR (MIJEH ILI TLAK)</p> <p>XLI MANOMETAR</p> <p>XFI UREĐAJ S MJEHURIČIMA</p> <p>LOKALNI INSTRUMENTI</p>	 <p>ULTRAZVUČNA OSJETILA RAZINE</p>	 <p>OSJETILA RAZINE - RADIJACIJA</p>

 <p>TRANSMITER GUSTOĆE S RONCEM</p>	 <p>TRANSMITER GUSTOĆE - HIDROSTATSKI TLAK</p>	 <p>TRANSMITER GUSTOĆE - RADIOAKTIVNI</p>
 <p>INDIKACIJA TEMPERATURE BIMETALNI ILI STAKLENI TERMOMETAR</p>	 <p>INDIKACIJA TEMPERATURE PUNJENI SUSTAV</p>	 <p>TERMOSTAT</p>
 <p>INDIKATOR TEMPERATURE- TERMOPAR, RTD ili TERMISTOR (TH)</p>	 <p>TEMPERATurna SKLOPKA</p>	 <p>PIROMETAR - RADIJACIJSKI</p>
 <p>RUČNI</p>  <p>OBIČNI</p>  <p>KUTNI</p> <p>REGULACIJSKI VENTILI</p>	 <p>KUGLASTI</p>  <p>LEPTIRASTI</p> <p>REGULACIJSKI VENTILI</p>	 <p>SLAVINA RAVNA</p>  <p>SLAVINA TROPUTNA</p> <p>REGULACIJSKI VENTILI</p>
 <p>S BOČNIM RUČNIM KOLOM</p>  <p>S GRANIČNOM SKLOPKOM</p> <p>REGULACIJSKI VENTILI</p>	 <p>REGULACIJSKI VENTIL S PNEUMATSKIM POZICIONEROM</p>	 <p>REGULACIJSKI VENTIL S ELEKTROPNEUMATSKIM POZICIONEROM</p>

 <p>MEMBRANSKI</p>  <p>MEMBRANSKI - BALANSIRAN TLAKOM</p> <p>AKTUATORI</p>	 <p>KLIPNI S OPRUGOM</p>  <p>DVORADNI KLIPNI</p> <p>AKTUATORI</p>	 <p>ELEKTRO- PNEUMATSKI</p>  <p>SOLENOIDNI S RUČNIM POVRATOM</p> <p>AKTUATORI</p>
 <p>PCV</p> <p>SAMODJELUJUĆI REGULATOR TLAKA U PROCESU S UNUTARNJIM PRIKLJUČKOM</p>	 <p>PCV</p> <p>REGULATOR TLAKA - REDUKTOR TLAKA</p>	 <p>PCV</p> <p>REDUCIRAJUĆI REGULATOR RAZLIKE TLAKA</p>
 <p>PCV</p> <p>SAMODJELUJUĆI REDUKTOR TLAKA S RUČNIM POSTAVLJANJEM ŽELJENE VRIJEDNOSTI</p>	 <p>PCV</p> <p>SAMODJELUJUĆI REGULATOR TLAKA U PROCESU S VANJSKIM PRIKLJUČKOM</p>	 <p>PSV</p> <p>VAC. → TLAK</p> <p>RASTERETNO - DIŠNI VENTIL</p>
 <p>PSE</p> <p>SIGURNOSNI ILI RASTERETNI VENTIL</p>	 <p>PSV</p> <p>RASPRSKAVAJUĆA PLOČA (GLAVA)</p>	 <p>XF</p> <p>ZADRŽAČ PLAMENA</p>
 <p>PSV</p> <p>TLAČNI ILI VAKUUMSKI POKLOPAC ZA RASTEREĆENJE</p>	 <p>PSV</p> <p>VOĐENI RASTERETNI VENTIL</p>	 <p>TSE</p> <p>TOPIVI ČEP ILI PLOČA</p>

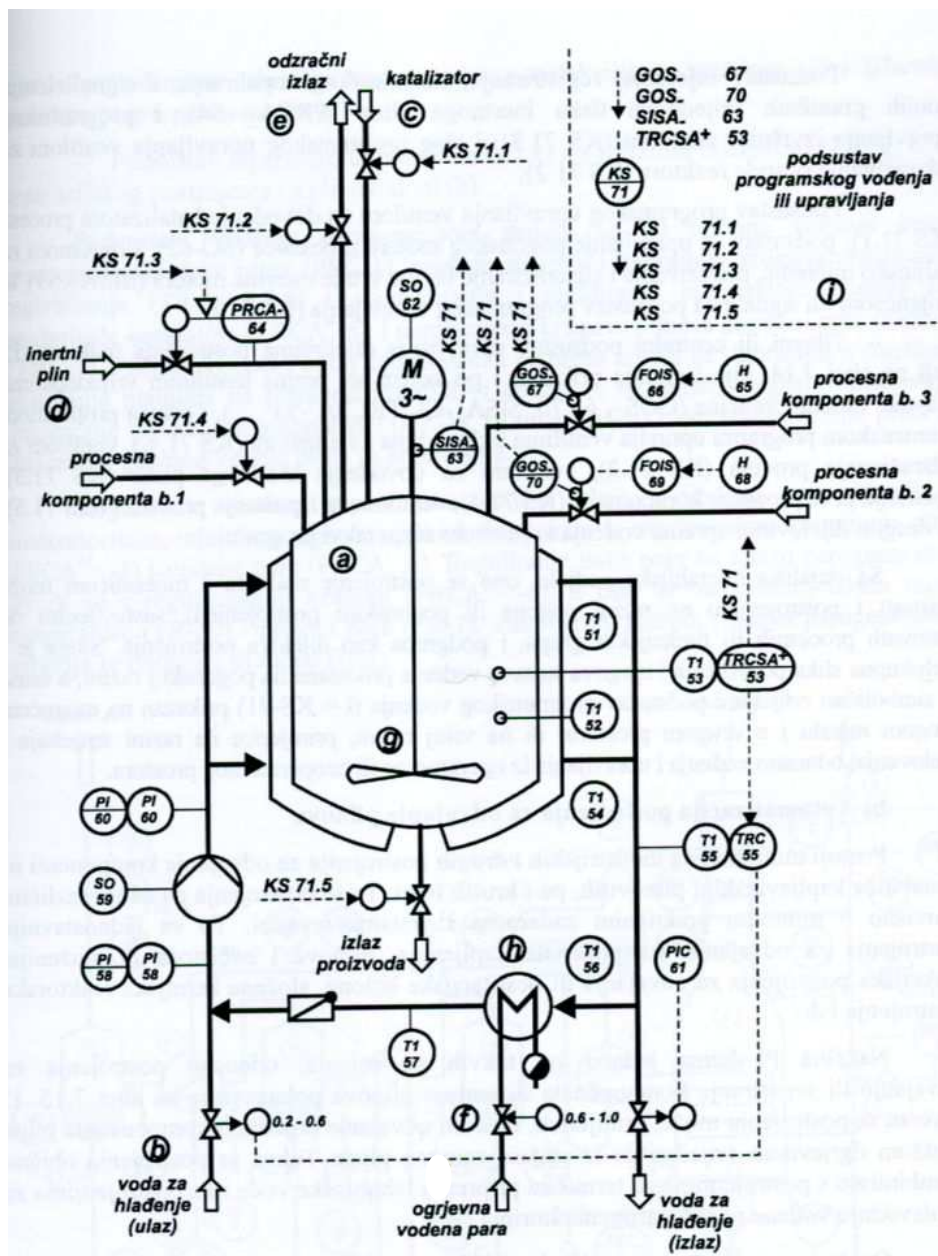
Slika 19. Procesne oznake nekih instrumenata

Automatizacija složenih tehnoloških operacija i procesa zahtjeva mnoštvo različitih uređaja za mjerenje i reguliranje vrijednosti brojnih procesnih neelektričnih, ali i električnih veličina. Tako, npr. procesi proizvodnje električne ili toplinske energije mogu imati više mjernih, signalnih i zaštitnih slogova, kao i slogova upravljanja i reguliranja procesnih veličina. Smisao i svrha mjerenja i automatskog reguliranja procesnih veličina je zapravo otklanjanje uzroka i posljedica postojanja i djelovanja poremećaja u vođenim procesima.

11.2. Automatizacija reaktora s mješanjem

Mnogi procesi proizvodnje prehrambenih i kemijskih tvari i proizvoda izvode se u posebnim industrijskim uređajima i postrojenjima. Takvo jedno postrojenje je reaktor s mješanjem, u kojem se miješanjem tvari proizvodnih komponenata, u njihovim određenim količinskim odnosima i određenim tehnološkim uvjetima dobivaju proizvodi u zadanim količinama te određenim sastavima i kakvoći. Takvi procesi i proizvodna postrojenja su npr.: uređaji za preradu mlijeka, voća i povrća, te proizvodnju kemijskih tvari, boja i lakova i dr.

Primjer načelne PI - sheme jednog ovakvog relativno složenog postrojenja može se prikazati slikom 20.



Slika 20. Načelna PI - shema sustava vođenja reaktora s mješanjem

Procesno postrojenje se sastoji od reaktorske posude (a), podsustava opskrbe vodom za hlađenje (b), opreme dobave procesnih komponenata (b.1, b.2, b.3), opreme dobave katalizatora procesa (c), opreme za dobavu neutralnog, inertnog, plina (d), opreme za ispuštanje ili odzračivanje reakcijskih plinova (e), opreme za dobavu i uporabu ogrijevne pare (f), opreme za pogon mješala reaktora (g) i opreme parnog toplinskog izmjenjivača za dogrijevanje vode za hlađenje (h). Proces i u ovakvim postrojenjima mogu se izvoditi

diskontinuirano u "šaržama" ili pak kontinuirano. U takvim slučajevima se razlikuju i njihova vođenja, pri čemu se sustav vođenja može podijeliti u nekoliko podsustava:

- podsustav vođenja hlađenja reaktora,
- podsustav mjerenja i reguliranja temperatura
- podsustav mjerenja i programskog upravljanja vrijednostima procesnih komponenata
- podsustav mjerenja, registriranja, automatskog reguliranja i signaliziranja donjih graničnih vrijednosti tlaka inertnog plina
- podsustav programskog upravljanja ventilom za dovodenje katalizatora
- glavni ili centralni podsustav upravljanja dijelovima postrojenja reaktora (i), koji upravlja ventilima ili drugim dijelovima opreme vođenja.

LITERATURA

1. J. Božičević, Temelji automatike I, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
2. J. Božičević, Automatsko vođenje procesa, Tehnička knjiga, Zagreb, 1971.
3. D.E. Seborg, T.F. Edgar, D.A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, J. Wiley, New York, 1989.
4. W.J. Palm, Control Systems Engineering, J. Wiley, New York, 1994.
5. F. Rajić, Automatizacija postrojenja, Školska knjiga, Zagreb, 2001.
6. R. Šaper, M. Mitrović, Automatska regulacija procesa, TMF, Beograd, 1982.
7. E. Pintar, Vođenje procesa u proizvodnji nafte i plina, INA-Naftaplin, Zagreb, 2009.
8. F.G. Shinskey, Process Control Systems, McGraw-Hill, New York, 1996.