

Regulacijska djelovanja

Bruketa, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:054016>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

DARIO BRUKETA

REGULACIJSKA DJELOVANJA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**REGULACIJSKA DJELOVANJA
REGULATORY ACTIONS**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Brodsko automatsko upravljanje

Mentor: prof. dr. sc. Vinko Tomas

Student: Dario Bruketa

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112052399

Rijeka, ožujak 2023.

Student: Dario Bruketa

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112052399

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom "Regulacijska djelovanja" izradio samostalno pod mentorstvom *prof. dr. sc.* Vinka Tomasa.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezoao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Dario Bruketa

Student: Dario Bruketa

Studijski program: Brodostrojarstvo

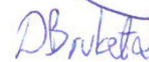
JMBAG:

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Dario Bruketa



(potpis)

SAŽETAK

U ovom završnom radu prikazano je djelovanje automatskih sustava i njegovih članova. Dan je prikaz osnovnih pojmova iz automatike neophodnih za praćenje problematike automatskog upravljanja. Prikazane su značajke regulacijskih elemenata. Detaljno su obrađena regulacijska djelovanja i podešavanje regulatora, dane su značajke, uloga i mjesto različitih regulatora u regulacijskom krugu, te načini podešavanja regulatora.

Ključne riječi: regulacijski krug, regulacijska djelovanja, mjerni pretvornici

SUMMARY

In this final paper, the operation of automatic systems and its members is demonstrated. The presentation of the basic terms from automation necessary for monitoring the problems of automatic control is given. Features of regulatory elements are shown. The regulatory actions and adjustment of the regulator are covered in detail, the features, role and place of different regulators in the regulation circuit are given, as well as ways of adjusting the regulator.

Keywords: control circuit, control actions, measuring transducers

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
2. OSNOVNI POJMOVI IZ AUTOMATIKE	2
2.1. SUSTAVI AUTOMATSKOG REGULIRANJA - SAR I SUSTAVI AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA – SAU	4
2.1.1. Sustav upravljanja otvorenom petljom	5
2.1.2. Sustav regulacije zatvorenom petljom	5
2.2. RAZLIKA IZMEĐU OTVORENE I ZATVORENE PETLJE	8
2.3. ODZIVI REGULACIJSKIH ELEMENATA	10
3. ZNAČAJKE REGULACIJSKIH ELEMENATA	13
3.1. OPĆENITO O REGULACIJSKIM ELEMENTIMA.....	13
3.2. SVOJSTVA REGULACIJSKIH ELEMENATA.....	15
3.2.1. Proporcionalni član nultog reda – P_0 član.....	16
3.2.2. Integralni član – I član.....	16
3.2.3. Proporcionalni član prvog reda – P_1 član.....	17
3.2.4. Proporcionalni član drugog reda - P_2 član.....	19
3.2.5. Član s mrtvim vremenom - τ_m član	22
3.2.6. Derivacijski član - D član.....	23
3.3. REGULACIJSKI ELEMENTI U POVRATNOJ VEZI	25
4.1. OPĆENITO O REGULATORU I REGULACIJSKOM SUSTAVU	27
4.2. VRSTE REGULATORA.....	31
4.2.1. Proporcionalni regulator nultog reda – P_0 regulator.....	31
4.2.2. Integralni regulator - I regulator	33
4.2.3. Usporedba P i I regulatora.....	35
4.2.4. Derivacijski regulator - D regulator	38
4.2.5. Proporcionalno-integralni regulator - PI regulator.....	38
4.2.6. Proporcionalno - derivacijski regulator - PD regulator	40
4.2.7. Proporcionalno-integralno-derivacijski regulator - PID regulator.....	42
4.3. PODEŠAVANJE REGULATORA	43
5. ZAKLJUČAK	47
LITERATURA	48

1. UVOD

Danas automatski uređaji i sustavi nalaze veliku primjenu u modernoj industriji za automatizaciju strojeva, projektiranje i ispitivanje proizvoda za automatski prijenos i obradu podataka, za kompleksnu automatizaciju proizvodnih, prometnih, kemijskih, bankarskih, i drugih procesa. U tim sustavima uloga je čovjeka organiziranje rada automatskih sustava, njihovo projektiranje, povezivanje i korištenje. Posebno mjesto u tom radu ima teorija automatskog upravljanja. To je znanost o procesima i zakonitostima upravljanja, principima funkcioniranja i metodama proračuna automatskih sustava.

Svaka ljudska djelatnost uključuje određena mjerenja. Elektrotehnika, strojogradnja, građevinarstvo i svaka druga djelatnost u području tehnike i općenito prirodnih znanosti u svojoj osnovi ima mjerenja. Opća definicija mjerenja glasi: mjerenje je uspoređivanje stanovite kakvoće, pojave ili tvorevine s odabranom isto takvom usporednom kakvoćom, pojavom ili tvorevinom.

Tehnika mjerenja i mjerni instrumenti razvijali su se paralelno s općim razvojem fizike, tako da dugo vremena postoje temelji mjernih principa. Uvođenjem strojeva u rad u prvoj industrijskoj revoluciji, uloga čovjeka u proizvodnji se u većem broju slučajeva svela na upravljanje radom strojeva i nadzor pojedinih faza proizvodnje. Kod ovog načina proizvodnje, služeći se direktnim opažanjem ili mjernim instrumentima, čovjek saznaje trenutne uvjete rada i intervenira prema određenom planu i iskustvu, koordinirajući sve elemente proizvodnje u jedinstven, točno određen tehnološki proces.

Daljnji razvoj tehnike dovodi nas do pojma automatike, odnosno sustava koji sam nadzire rad stroja ili stanje procesa i djeluje na njega kako bi ga doveo u željeni režim rada. Bez obzira da li čovjek ili automatika upravlja, mora se dobiti informacija o stanju procesa odnosno vrijednost neke fizikalne veličine važne za rad tj. treba se mjeriti. Kako bi se mjerena veličina (tlak, temperatura..), mogla točno odrediti i usporediti sa nekom referentnom vrijednošću postoje uređaji koji pretvaraju vrijednost takve veličine u oblik razumljiv čovjeku ili signal koji je pogodan za daljnju obradu u uređajima automatike. Takvi uređaji se zovu mjerni pretvornici.

U drugom poglavlju opisani su osnovni pojmovi iz automatike, neophodni za praćenje problematike automatskog upravljanja. U trećem poglavlju dane su značajke regulacijskih elemenata. U poglavlju regulatori opisana su regulacijska djelovanja i podešavanje regulatora.

2. OSNOVNI POJMOVI IZ AUTOMATIKE

Automatika je nauka o općim principima projektiranja, realizacije i primjene automatskih uređaja i sustava koji mogu izvršavati svoje osnovne funkcije bez neposrednog sudjelovanja čovjeka.

Automatski sustavi su pojedina postrojenja, strojevi i uređaji koji sudjeluju u proizvodnom procesu i koji su međusobno tako povezani i tehnički opremljeni da sami izvršavaju postavljeni zadatak bez neposrednog sudjelovanja čovjeka.

Automatizacija označava primjenu metoda i sredstava automatike za pretvaranje ne automatskih strojeva, uređaja i proizvodnih procesa u automatske.

Algoritam

Definiranje sustava automatskog upravljanja i reguliranja vrši se pomoću termina algoritam. Algoritam predstavlja skup osnovnih operacija i pravila kojima se određuje karakter i slijed operacija pomoću kojih se dobiveni podaci provode u odgovarajući rezultat. Za algoritam je karakteristična njegova određenost u smislu jasnoće i točnosti, njegova primjenljivost za razne varijante datih podataka i mogućnost dobivanja traženih rezultata na osnovu obrade raznih varijanti podataka.

Ulazna veličina, izlazna veličina i poremećaj

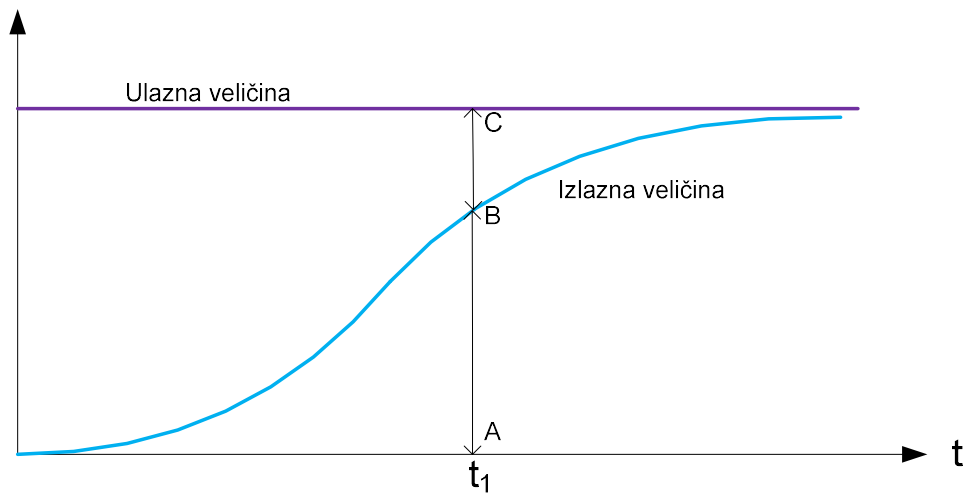
Ulazna veličina, koja se još naziva i ulazni signal ili jednostavno ulaz, je veličina koju sustav odnosno element prima kao ulazni signal ili ulaznu informaciju. Uređaj pomoću kojeg se ulazna veličina može mijenjati naziva se upravljajući organ. Na sustave automatskog upravljanja u općem sustavu djeluju ulazne veličine različitih oblika i intenziteta.

Da bi mogli proučavati i međusobno uspoređivati sustave ili pojedine njihove elemente, potrebno ih je ispitivati pod istim uvjetima. U tom cilju, u teoriji automatskog upravljanja uveden je postupak ispitivanja izlaznih veličina sustava koje nastaju pod djelovanjem standardnih ulaznih veličina. Postoje četiri standardne vrste ulaznih veličina: odskočna ili jedinična (step) funkcija, impulsna, nagibna i sinusna funkcija.

Izlazna veličina, koja se još naziva odziv ili samo izlaz, je veličina koja opisuje ponašanje sustava ili elementa kada na njega djeluje ulazna veličina. Izlazna veličina nastaje kao posljedica djelovanja ulazne veličine na dati sustav i koju sustav, odnosno element

predaje. Promjena izlazne veličine s vremenom naziva se prijelazno stanje ili prijelazni proces, a vrijeme u kojem se prijelazni proces odvija je prijelazni preiod.

Prijelazno stanje predstavlja promjenu izlazne veličine s vremenom od trenutka izlaska iz jednog stanja, pa dok ne zauzme novo stanje (vrijednost). Odstupanje izlazne veličine u datom trenutku od neke fiksne vrijednosti koja je uzeta za početak očitavanja tog odstupanja naziva se otklonom. Razlika između zadane i stvarne vrijednosti izlazne veličine u datom momentu predstavlja pogrešku.



Slika 1. Prikaz ulazne i izlazne veličine

Na slici 1 veličina AB predstavlja otklon izlazne veličine u trenutku t_1 , a veličina $BC = AC - AB$ pogrešku.

Poremećajem se naziva svako djelovanje na objekt ili sustav upravljanja koje izaziva neželjenu promjenu izlazne veličine ili njezino odstupanje od zadane vrijednosti.

2.1. SUSTAVI AUTOMATSKOG REGULIRANJA - SAR I SUSTAVI AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA – SAU

Automatsko reguliranje vezano je za početnu fazu automatizacije kada su se pojavili prvi regulatori i automatski uređaji koji su bili relativno jednostavni i služili su za djelomičnu automatizaciju.

Automatsko reguliranje znači automatsko održavanje konstantne vrijednosti neke fizikalne veličine ili njezino mijenjanje po unaprijed određenom programu. Regulacijski sustavi razvrstavaju se u dvije grupe:

- a) sustavi automatske stabilizacije kojima je referentna veličina konstantna. Vrijednost izlazne veličine treba održavati stalno sa zadanom točnošću, bez obzira na djelovanje poremećajnih veličina.
- b) slijedni regulacijski sustavi kojima je referentna veličina vremenski promjenljiva. Slijedna regulacija kojoj se referentna veličina mijenja prema unaprijed poznatom zakonu naziva se programskom regulacijom.

Često se slijedni regulacijski sustavi dijele na sustave programske regulacije i servo sustave kao posebne grupe regulacijskih sustava. Servo sustav je uređaj ili sustav čija se izlazna veličina automatski podešava prema referentnoj veličini koja je promjenljiva i unaprijed nepoznata.

Fizikalna veličina koju reguliramo zove se regulirana veličina, a uređaj pomoću kojeg vršimo automatsku regulaciju – regulator. Objekt regulacije, mjerni član, usporednik (komparator), regulator i izvršni član zajedno sačinjavaju sustav automatskog reguliranja.

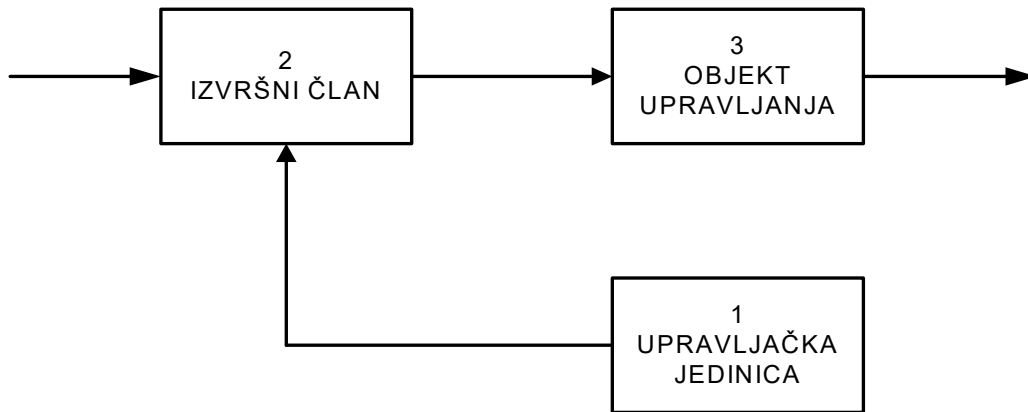
Pojavom složene automatizacije, kojom se upravlja složenim proizvodnim procesima i postrojenjima, dolazi do upotrebe termina sustav automatskog upravljanja (vođenje procesa). Automatsko upravljanje danas se najčešće ostvaruje pomoću elektroničkih računala.

Postoje dva tipa automatskih sustava:

- sustav upravljanja otvorenom petljom
- sustav regulacije zatvorenom petljom

2.1.1. Sustav upravljanja otvorenom petljom

Kod sustava sa otvorenom petljom izlazna veličina mijenja se prema unaprijed određenom zakonu bez uspoređivanja sa referentnom veličinom. To znači da se signal djelovanja kreće u jednom smeru tj. od ulaza prema izlazu i ne postoji povratna veza koja bi davala informaciju na ulaz o promjeni izlazne veličine. Princip otvorene petlje primjenjuje se kada zahtjevi za točnost i trajanje prijelaznih pojava nisu strogi, te kad se ne javljaju veliki i česti poremećaji, te pri rješavanju jednostavnih zadataka kao što su: automatska signalizacija, blokada, zaštita, upravljanje elektrohidrauličnim i elektropneumatskim ventilima i drugo.



Slika 2. Sustav upravljanja otvorenom petljom

2.1.2. Sustav regulacije zatvorenom petljom

Kod sustava s otvorenom petljom vanjsko djelovanje na objekt (poremećajno djelovanje) može bitno utjecati na stabilnost sistema. Ako su te smetnje varijabilne i ne mogu se predvidjeti, tada dolazi do narušavanja kvalitete regulacije. U tom slučaju greške i odstupanja u sistemu su prevelike, te sam sistem postaje neupotrebljiv. Zbog toga sustav upravljanja s otvorenom petljom nije uvijek najpogodniji.

Kad sustav s otvorenom petljom ne zadovoljava potrebe, potrebno je izmjeriti izlaznu veličinu, te usporediti pretvorenu vrijednost sa referentnom (željenom) veličinom. Rezultat

ove "usporedbe" je regulacijsko odstupanje naznačeno sa " ϵ ". To je signal koji je razlika između željene i trenutne izmjerene veličine. Regulacijsko odstupanje koristi se da bi se izlazna vrijednost vratila na željeni nivo i u određenim granicama tolerancije. Taj signal mora promijeniti vrijednost regulacijskog signala na odgovarajući način. Vrijednost kontrolnog napona U_{st} mora se automatski promijeniti na željenu vrijednost, a to se može ostvariti zatvorenom regulacijskom petljom.

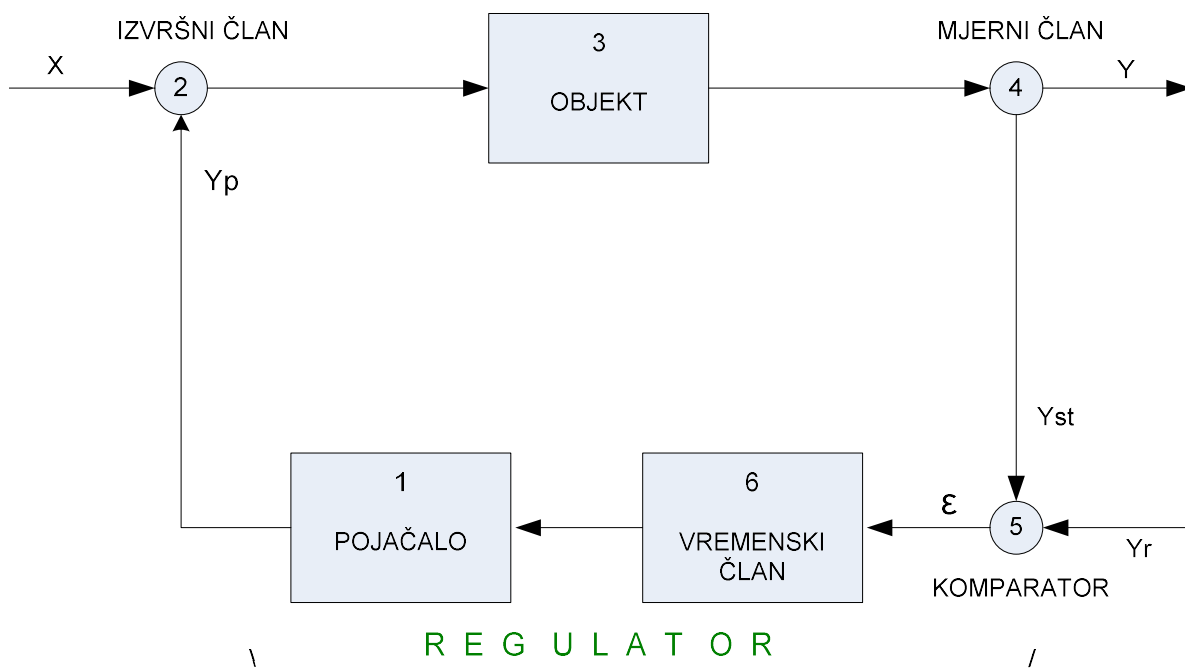
Potrebni zahvati da se otvoreni sustav (bez povratne veze) proširi u zatvoreni sustav (sa povratnom vezom) su sljedeći:

1. Potrebno je izmjeriti kontroliranu veličinu, te ako je potrebno obraditi dobiveni signal. Mjerenje željene veličine vrši se mjernim članom (4), slika 3. Mjerni član se sastoji od mjernog osjetila, mjernog pretvornika i mjernog pojačala. Mjerenje je potrebno izvršiti što bliže mjestu željene izlazne veličine kako bi odstupanje bilo što manje.
2. Sljedeći korak je usporedba signala željene vrijednosti kojeg je oblikovao birač željene (referentne) vrijednosti Y_r sa izlaznim signalom Y_{st} iz mjernog člana. Usporedbu vrši usporednik ili komparator (5) koji kao izlaznu veličinu oblikuje regulacijsko odstupanje ϵ .
3. Signal odstupanja obrađuje se u "vremenskom korekcijskom članu" regulatora tako da se može djelovati na regulacijsku petlju, te obnoviti željenu veličinu. Obrada signala mora biti: što brža, što preciznija, te sa što manje oscilacija.

Signal koji djeluje u upravljačkoj petlji nazivamo upravljačkim signalom. Vremenski korekcijski član i pojačalo pretvaraju signal greške u pojačani upravljački signal.

Regulator u užem smislu je uređaj koji sadrži komparator, pojačalo i vremenski član. Komparator ima dva ulazna kanala, jednog za željenu veličinu ili referentni signal, a drugog za trenutnu vrijednost ili povratni signal.

Izlaz iz komparatora je signal greške. On se prenosi do vremenskog člana koji oblikuje ulazni signal za pojačalo. Znači povratni krug u petlji određuje osobine upravljačkog signala koji djeluje u regulacijskoj petlji da bi regulirana veličina bila uvijek vraćena na željeni (referentni) nivo.

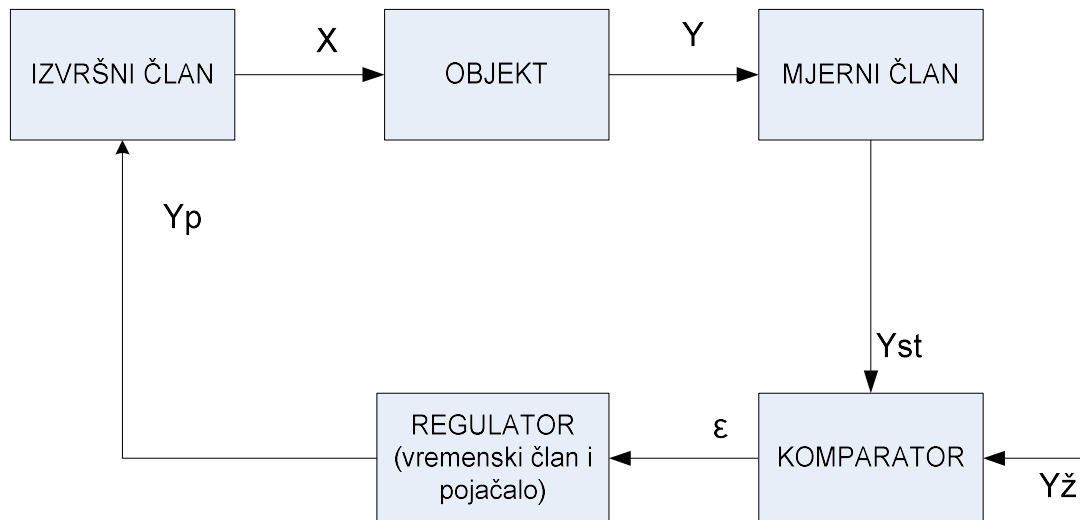


Slika 3. Sustav regulacije zatvorenom petljom

Povratnom vezom postizemo zatvoreni regulacijski krug (slika 4). Regulirana veličina (Y) je izlazna veličina iz reguliranog objekta, a mjerni je član pretvara u veličinu koju usporednik može prihvatiti i obraditi (Y_{st}). U usporedniku se izmjerena i obrađena veličina uspoređuje sa referentnom veličinom (Y_r), te se na izlazu dobiva vrijednost ε koja ulazi u regulator gdje se formira upravljački signal Y_p koji svojim djelovanjem na regulirani objekt nastoji svesti odstupanje regulirane veličine Y od željene Y_r na što manju vrijednost ili ga potpuno otkloniti.

Mnogi faktori utječu na stabilnost rada regulacijskog objekta kao npr. nestabilnost mreže ili preopterećenja. Svi ti faktori (poremećaji) mijenjaju izlaznu - reguliranu veličinu Y , tako da su korekcije uvijek potrebne. Isto tako signal Y_r koji ima funkciju referentne (željene) vrijednosti na cijelu regulacijsku petlju djeluje kao vanjska smetnja, samo s tom razlikom da je signal Y_r uvijek pod našom prismotrom, te u svakom trenutku postoji kontrola njegove stvarne vrijednosti.

U regulatoru se signal regulacijskog odstupanja ε ($\varepsilon = Y_r - Y_{st}$) pretvara velikom brzinom u odgovarajući upravljački signal, koji prolazeći kroz regulacijske elemente upravljačkog kruga osigurava na izlazu iz regulacijskog objekta željenu vrijednost regulirane veličine.



Slika 4. Regulacijska petlja

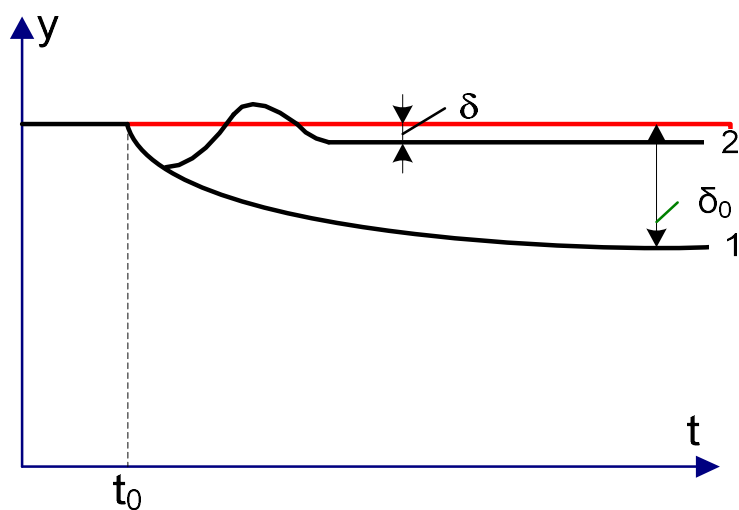
2.2. RAZLIKA IZMEĐU OTVORENE I ZATVORENE PETLJE

U otvorenom sustavu energija koja pokreće regulacijski objekt određena je programskom jedinicom. Ta energija pogoni regulacijski objekt prema našim očekivanjima, koja su prethodno utvrđena. U tom slučaju izlazna veličina iz regulatora, koja djeluje na uređaj, nije u mogućnosti utjecati na ulaznu veličinu upravljačkog sustava. Posljedica toga je da svaki nepredviđeni poremećaj izaziva promjenu regulirane veličine s većim ili manjim odstupanjem od željene vrijednosti.

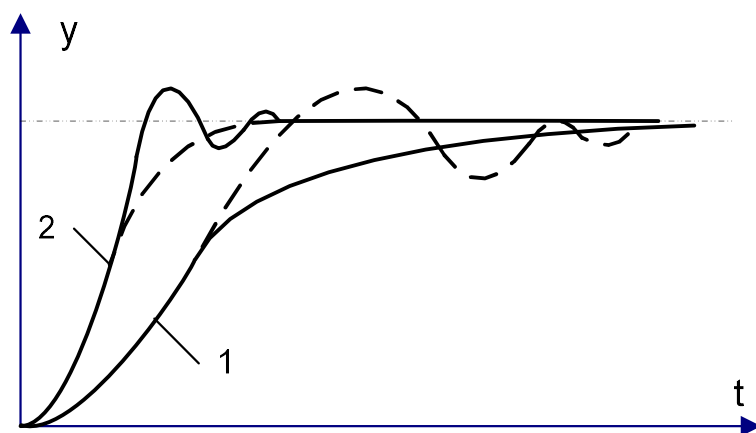
Kod zatvorenog sustava vrijednost parametra energije koja pokreće regulacijski objekt može biti promjenjena (korigirana) zahvaljujući povratnoj vezi - "feed-back", tako da sustav može stalno obavljati funkciju analize željene veličine, obrade, te djelovanje na regulator. Time se postiže konstantna prilagodba pogonskog sustava za određene potrebe, te se konstantno rade korekcije kako bi se kompenzirala odstupanja nastala vanjskim djelovanjima na sustav.

Usljed zatvorene kružne strukture regulacijskog kruga, povratna grana od mjernog člana do ulaza u regulator omogućuje da regulirana veličina bude iskorištena za njeno kontinuirano samopodešavanje.

Zahtjev da se te korekcije izvrše u najkraćem mogućem vremenu, što preciznije, te sa što manje oscilacija, jasne su jer svako kašnjenje ili prevelika oscilacija mogu dovesti do katastrofalnih posljedica kako za sustav tako i za okolinu. Drugim riječima, odziv regulirane veličine mora biti što brži, precizniji i bez oscilacija.



Slika 5. Kvalitativna usporedba vladanja otvorene (1) i zatvorene petlje (2)



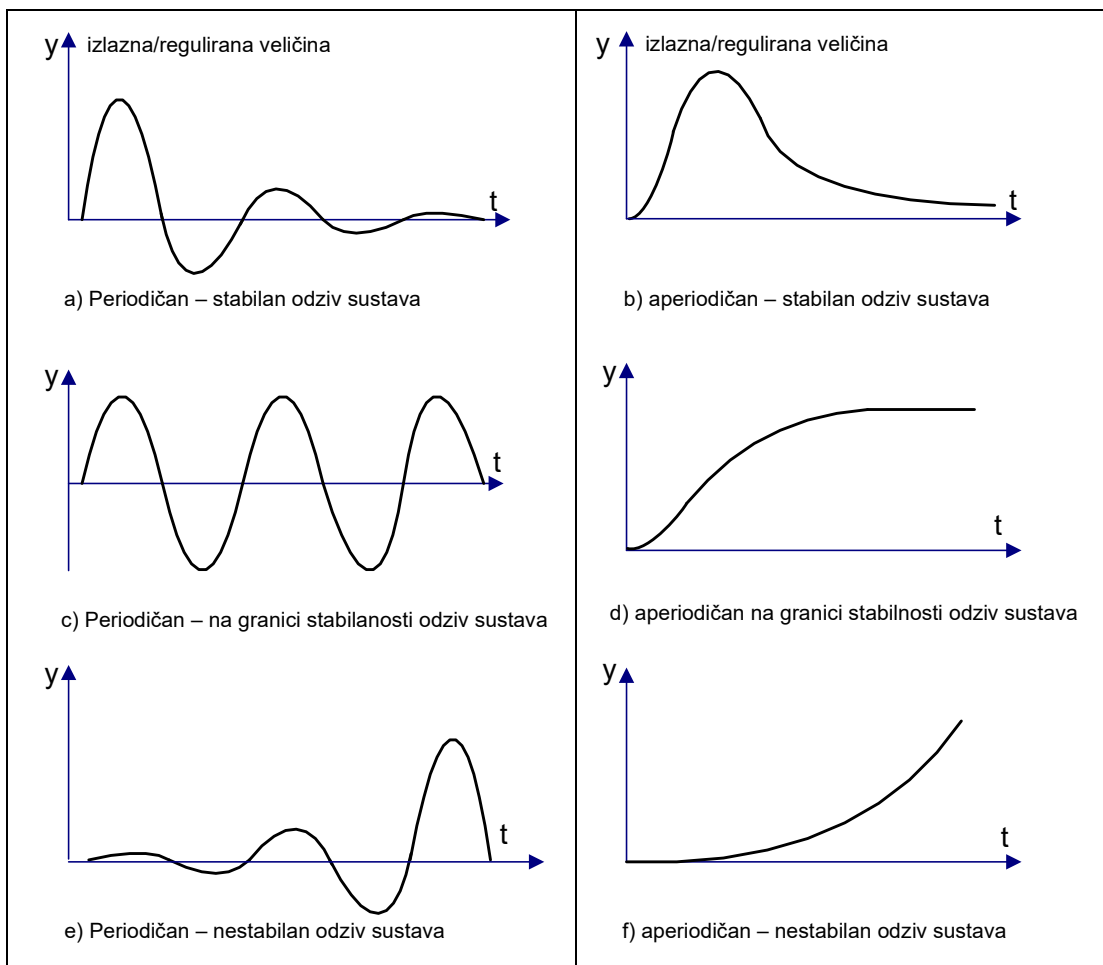
Slika 6. Promjene izlazne/regulirane veličine pri skokovitom povećanju poremećaja kod otvorenog (1) i zatvorenog sustava (2)

Statički pokazatelji kvalitete regulacije odnose se na točnost sustava u stacionarnom stanju, a dinamički pokazatelji kvalitete regulacije opisuju kvalitetu prijelazne pojave.

2.3. ODZIVI REGULACIJSKIH ELEMENATA

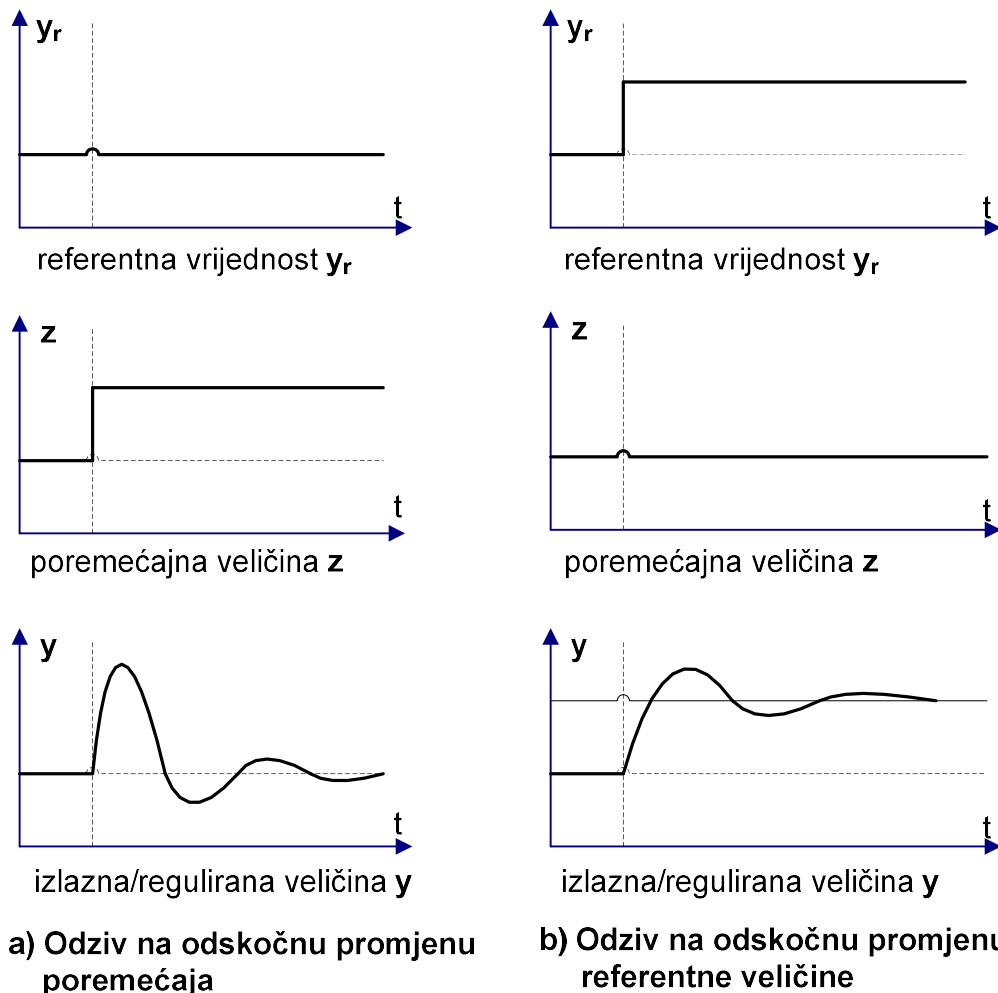
Regulacijski sustav sastavljen je od više regulacijskih elemenata. Svakom od tih elemenata potrebno je određeno vrijeme da "odgovori" na ulaznu veličinu, da obradi ulazni signal, te da ga proslijedi sljedećem elementu u regulacijskom krugu. Povratna veza može djelovati na regulacijski objekt u negativnom ili pozitivnom smislu. U slučaju pozitivne povratne veze upravljački signal i referentni, odnosno željeni se zbrajaju, što može prouzročiti osciliranje sustava, sa stalnim pojačanjem amplitude do njegove krajnje neupotrebljivosti. Ipak, osciliranja kod pozitivne povratne veze su od koristi kod generiranja točno određenih oscilacija.

Tablica 1. Ponašanje regulacijske petlje (y - regulirana veličina)



Efekt pozitivne povratne veze kod regulacijskog sustava ne može se u potpunosti potisnuti, ali se teži da ga se svede na najmanju moguću mjeru. Stabilni aperiodski odziv (tablica 1) je uvijek u prednosti budući da teži da sa što manjim oscilacijama regulira željenu vrijednost. Stoga, zatvoreni sustav regulacije se uvijek koristi kada postoji mogućnost da smetnje budu toliko velike da mogu reguliranu veličinu permanentno izbaciti iz dozvoljenog odstupanja.

Kod podešavanja regulacijskog kruga na određena vanjska djelovanja, te na reakcije povratne veze kako bi oscilacije i prekoračenja bila što manja treba voditi računa da u stvarnim uvjetima rada sustav neće raditi optimalno, već treba očekivati određena odstupanja. Važno je naglasiti da je kvaliteta odziva regulirane veličine praktički ista, bez obzira na kojoj se točki u zatvorenoj petlji javlja vanjski poremećaj ili promjena željene referentne veličine (slika 7).



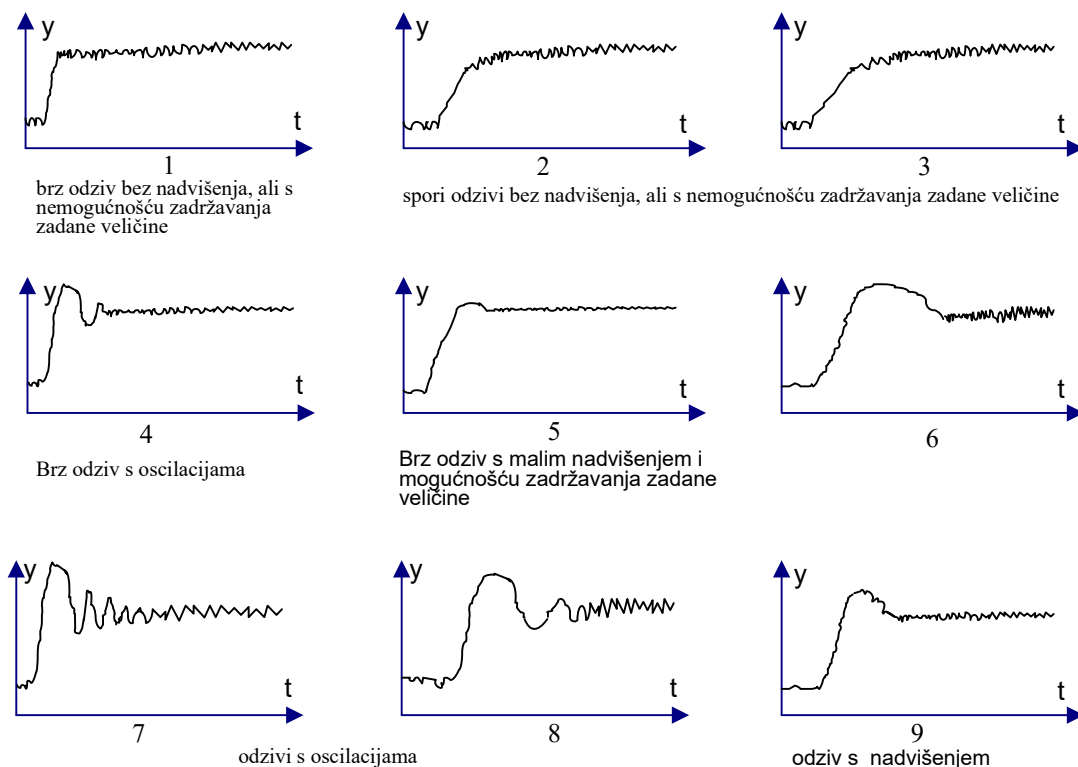
Slika 7. Kvaliteta odziva izlazne/regulirane veličine praktički je ista, bez obzira na kojoj se točki u petlji javlja poremećaj

Od podešavanja regulacijskog sustava ovisiti će izgled prijelaznog odziva regulirane veličine, kako je prikazano na slici 8. Proizlazi da je optimalni prijelazni odziv onaj prikazan na grafu br. 5.

Na grafu broj 1. prikazan je brz odziv bez nadvišenja, ali s nemogućnošću zadržavanja zadane veličine. Grafovi 2. i 3. prikazuju spore odzive regulirane veličine. Na grafovima 4, 7. i 8. imamo odzive s oscilacijama, a na 6. i 9. nadvišenja zadane veličine. Graf broj 5. prikazuje brz odziv s neznatnim nadvišenjem i mogućnošću zadržavanja zadane veličine.

Naime, u većini slučajeva primjene, zahtjeva se da odziv ispunjava sljedeće uvjete :

- što brže (naglijе) povećanje ili smanjenje kod promjene vrijednosti sa jednog stanja na drugo (odskočni izgled),
- čim manje nadvišenje kod promjene stanja,
- postići novo stanje sa što manje oscilacija,
- nakon što postigne određeno stanje potrebno je da takvo i ostane, bez rasta.

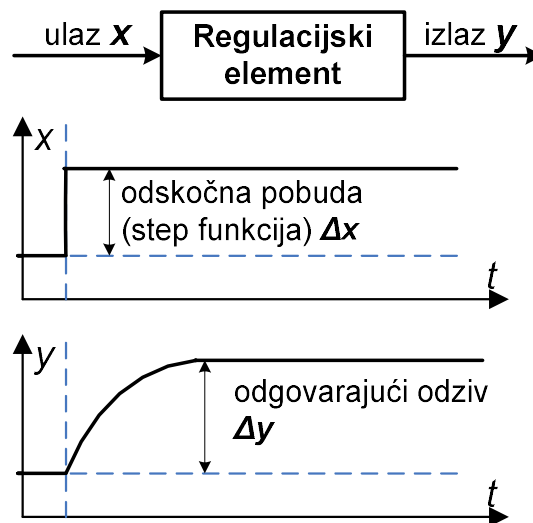


Slika 8. Prijelazne oscilacije regulirane veličine kod različitih podešavanja regulatora

3. ZNAČAJKE REGULACIJSKIH ELEMENATA

3.1. OPĆENITO O REGULACIJSKIM ELEMENTIMA

Svi elementi koji djeluju unutar nekog regulacijskog kruga mogu biti tretirani kao regulacijski elementi. Svaki od tih elemenata promatra se kao zaseban član (slika 9), sa svojim ulaznim uzбудnim signalom te sa izlaznom veličinom koja po fizičkoj srodnosti i veličini može biti ista ili različita.



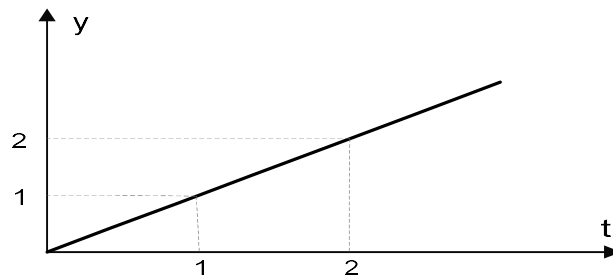
Slika 9. Odziv regulacijskog elementa na odskočnu (step) pobudu

Tako na primjer pretvornik taho-generator pretvara ulaznu veličinu, koja se sastoji od brzine vrtnje [okr/min] u fizički različitu vrijednost, električki napon [V]. Odziv pretvornika je vremenski zavisian, pojačavajući ili oboje.

Za analizu zavisne karakteristike prijenosnog elementa na njegov ulaz primjenimo skokovitu promjenu napona x , te pratimo promjenu izlazne veličine y (slika 9). Na izlazu, nakon nekog prijelaznog vremena, stabilizirati će se određena pojačana veličina, proporcionalna onoj ulaznoj. Kvocijent promjene izlazne veličine u odnosu na promjenu ulazne veličine naziva se proporcionalni faktor - K_p .

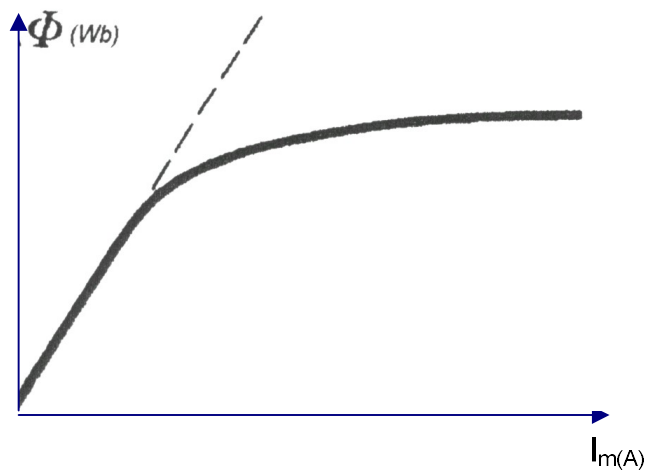
$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Faktor K_p može biti veći ili manji od 1, što znači da će djelovanje regulacijskog elementa na izlaznu veličinu biti pojačavajuće ili smanjivajuće. U slučaju da ulaznu veličinu povećamo za dva puta tada će i izlaz porasti za dva puta u ovisnosti sa proporcionalnim faktorom. To vrijedi samo u slučaju da je prijenosni element linearan. Kod takvog prijenosnog elementa grafička funkcija je općenito predstavljena dijagramom na slici 10.



Slika 10. Karakteristika linearnog regulacijskog elementa

U slučaju da se u regulacijskom elementu odvija proces magnetiziranja elektromagneta moramo računati na nelinearni odziv toka u svom rasponu porasta struje I_m , pošto nakon linearnog djela magnetiziranja, dolazi do zasićenja u željeznoj jezgri, te se odziv takvog elementa može prikazati dijagramom na slici 11.

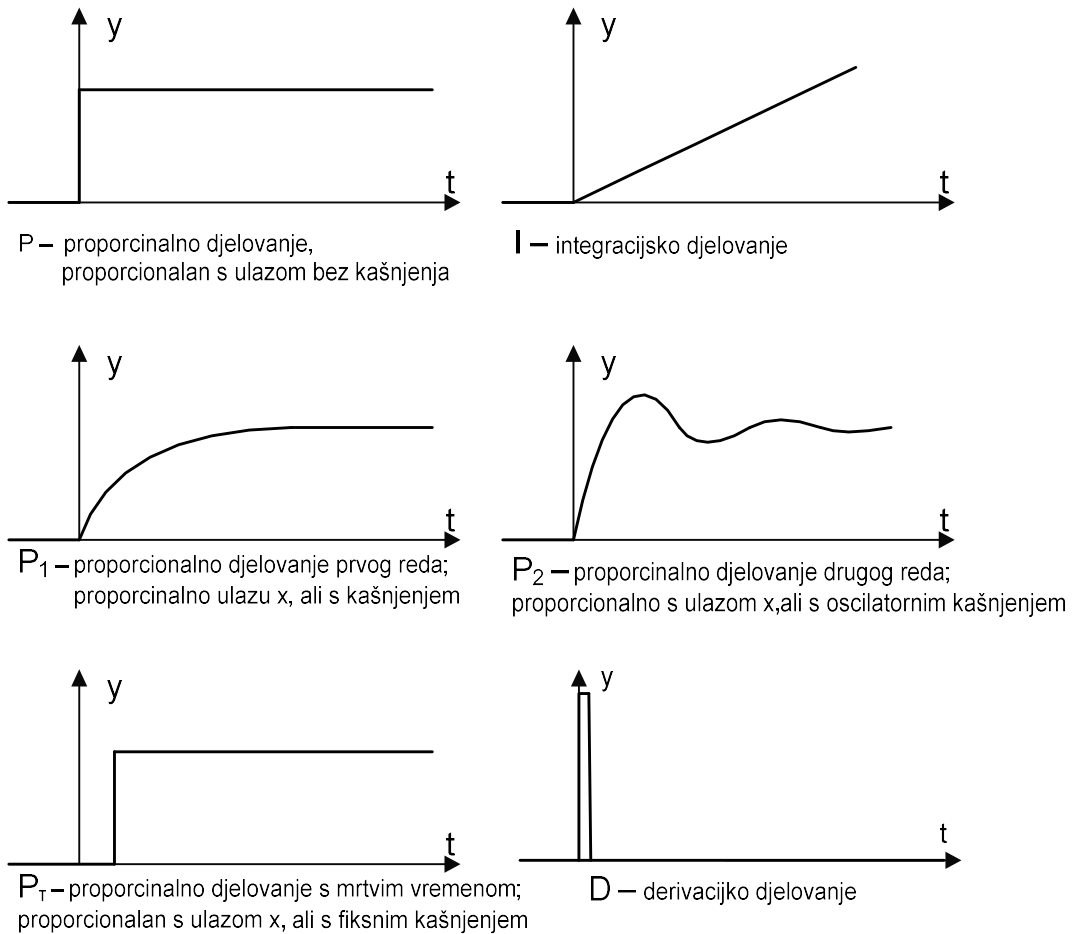


Slika 11. Karakteristika nelinearnog prijenosnog elementa

3.2. SVOJSTVA REGULACIJSKIH ELEMENATA

Imamo šest osnovnih prijenosnih elemenata: proporcionalni, integralni, proporcionalni prvog reda, proporcionalni drugog reda, s mrtvim vremenom i derivacijski.

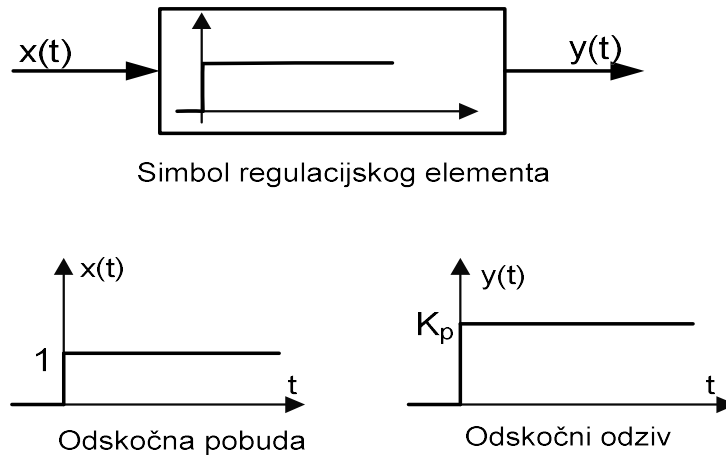
Tablica 2. Dijagrami važnijih regulacijskih elemenata



U tablici 2. predstavljeni su dijagrami najvažnijih prijenosnih elemenata. Osnovni način za dobivanje tih grafova je da se na ulaz jedinice dovede odskočni signal, te da se na izlazu promatra ili snima stanje.

3.2.1. Proporcionalni član nultog reda – P₀ član

Proporcionalni članovi nultog reda jedni su od osnovnih članova u regulacijskoj tehnici. Najbolji primjer takve jedinice je poluga, dok je kod elektroničkih sustava djelitelj napona. Osnovna karakteristika takvih članova je proporcionalan odziv (y) na odskočni uzбудni signal (x) (slika 12).



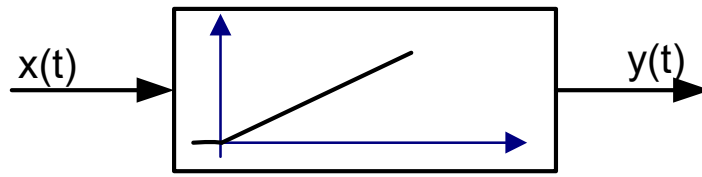
Slika 12. Karakteristika proporcionalnog člana nultog reda – P₀ člana

Diferencijalna jednađzba (nultog reda) ovog člana glasi :

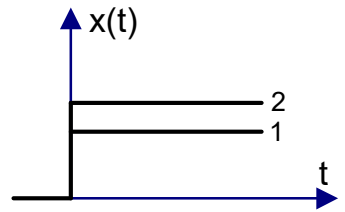
$$y = K_p x, \quad \text{gdje je } K_p \text{ prijenosni omjer ili pojačanje.}$$

3.2.2. Integralni član – I član

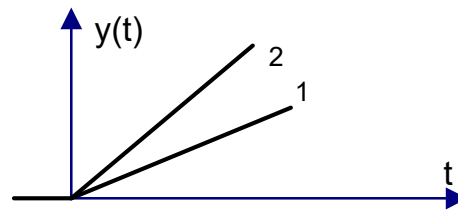
Karakteristika ovih članova najbolje je predočena njihovim prijelaznim karakteristikama. Kod ovih članova, nakon početka djelovanja ulaznog odskočnog signala, na izlazu signal stalno raste i taj rast traje sve dok se na ulazu nalazi signal (slika13).



Simbol regulacijskog elementa



odskočne pobude 1 i 2



integracijski odzivi na odskočne pobude

Slika 13. Karakteristika integralnog člana – I člana

Što veća vrijednost odskočne ulazne veličine x odgovara većem kutu nagiba izlazne veličine y . Matematički izraz koji povezuje izlazne i ulazne veličine integracijskog člana s integracijskim djelovanjem je :

$$y = K_i \int x dt + X_{i-0}$$

gdje je K_i integracijski faktor ili integracijska konstanta, a X_{i-0} početno stanje izlazne veličine.

I član u krugu povratne veze djeluje sporo, ali u većini slučajeva trajno otklanja regulacijsko odstupanje. Zbog svojstvenog kašnjenja djeluje destabilizirajuće u regulacijskom krugu.

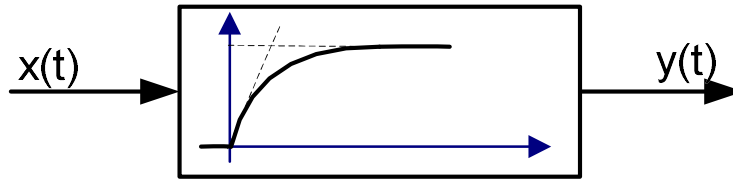
3.2.3. Proporcionalni član prvog reda – P₁ član

Članovi sa P₁ karakteristikom imaju sposobnost akumuliranja energije, pa kod pojave odskočnog ulaznog signala slijedi i odziv na izlazu, isto kao i kod P₀ članova (slika 14.), samo s tom razlikom da izlazni signal ne raste skokovito, već raste po eksponencijalnoj

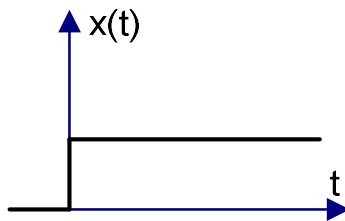
karakteristici koja je opisana homogenom diferencijalnom jednačbom prvoga reda čije rješenje glasi:

$$y = x \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

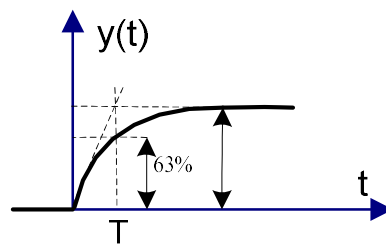
odnosno $y = x \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) K_p$ ako član ima pojačanje $K_p \neq 1$.



Simbol regulacijskog elementa



Odskočna pobuda



Odziv na odskočnu pobudu

Slika 14. Karakteristika proporcionalnog člana prvog reda – P₁ člana

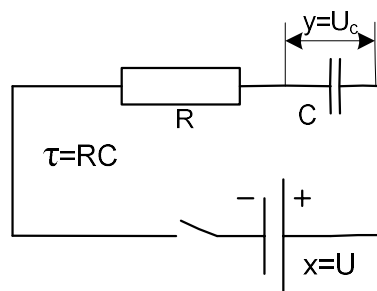
Ako sa K_1 označimo $K_1 = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) K_p$, onda je: $y(t) = K_1(t) \cdot x(t)$,

U slučaju da je P₁ član sastavljen od električnog otpora i kondenzatora kao prema slici 15 onda je :

$$K_1(t) = K_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \text{i} \quad y = x \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) K_p$$

Gdje je K_p pojačanje u ovom slučaju jednako 1, $T = RC$ je vremenska konstantna. Vremenska konstanta T je definirana vremenom potrebnim da se vrijednost izlaznog signala popne na 63% maksimalnog iznosa izlazne veličine.

Vrijeme prijelaznog perioda zavisi od vremenske konstante elementa i za jednu određenu vrijednost odskočnog ulaznog signala prijelazni proces će biti u toliko brži u koliko je vremenska konstanta manja i obratno.



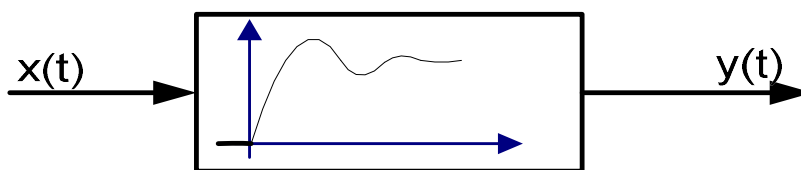
Slika 15. P_1 član sa RC elementima

3.2.4. Proporcionalni član drugog reda - P_2 član

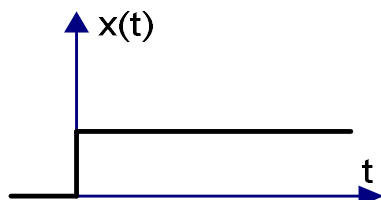
Članovi drugog reda imaju različiti odziv na step pobudu koji može biti periodički i aperiodički. Kod takvih članova nakon prijelazne pojave izlazna vrijednost se u pravilu stabilizira, ali postoji mogućnost da se izlazna veličina stalno pojačava pa regulator gubi svoju osnovnu funkciju. Ti su članovi matematički prikazani diferencijalnim jednadžbama drugog reda, dok je grafički P_2 član prikazan na sl. 16.

Budući da prijenosni član ima dva različita spremnika energije izlazni signal može imati oscilatorne osobine. Konkretni primjer je električni krug sa kondenzatorom i induktivitetom. Osobina takvog električnog kruga je da nakon početnog stanja akumulirane energije, po isključenju stalnog izvora napajanja, energija počne prelaziti sa jednog elementa na drugi, konstantnim vremenom, konstantnom frekvencijom. U stvarnosti svaki od tih elemenata ima svoj omski otpor, pa se s vremenom energija smanjuje, sve do kompletne pretvorbe u neki drugi oblik energije, ponajprije u toplinu.

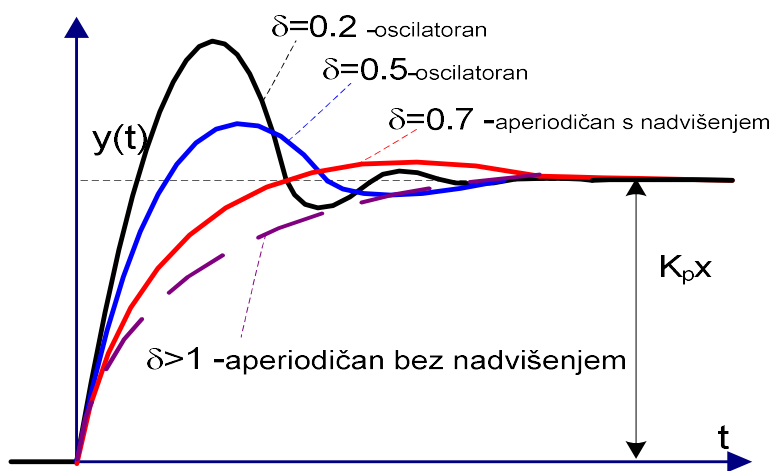
Faktor koji definira smanjenje količine energije u titrajnom krugu je δ (relativni koeficijent prigušenja). U slučaju da je taj faktor jednak nuli tada je rezultirajući izlazni signal jednak kontinuiranom sinusoidalnom obliku, a kako se on bliži 1, prigušenje je sve veće, a kod faktora 1 signal je na prijelaznoj fazi između periodske i aperiodske oscilacije. Kod $\delta > 1$ izlazna veličina ne oscilira i vrijednost odziva se mijenja aperiodski (sl. 16).



Simbol regulacijskog elementa

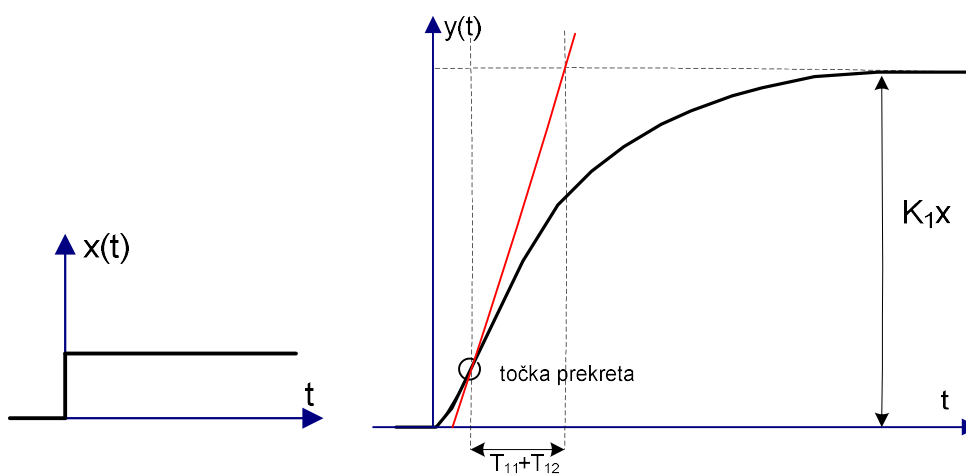


Odskočna pobuda



Odziv na odskočnu ulaznu pobudu

Slika 16. Karakteristika P2 člana

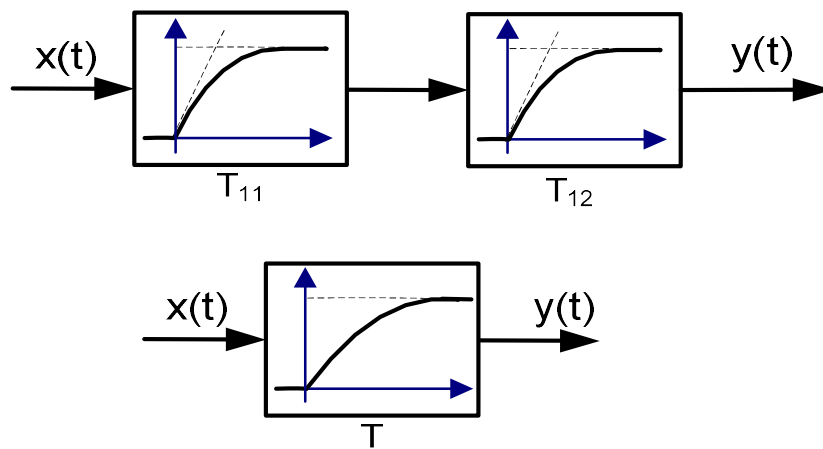


Slika 17. Kod $\delta > 1$ izlazna veličina ne oscilira i vrijednost odziva se mijenja aperiodski

Za razliku od periodske oscilacije u ovom slučaju izlazni signal nema nadvišenja izlaznog signala.

Najčešći slučaj generiranja jedinice drugog reda je serijski spoj dvaju članova prvog reda (slika 18). U tom slučaju, relativni koeficijent prigušenja δ je sljedeći:

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{11}}{T_{12}} + 2 + \frac{T_{12}}{T_{11}}}$$



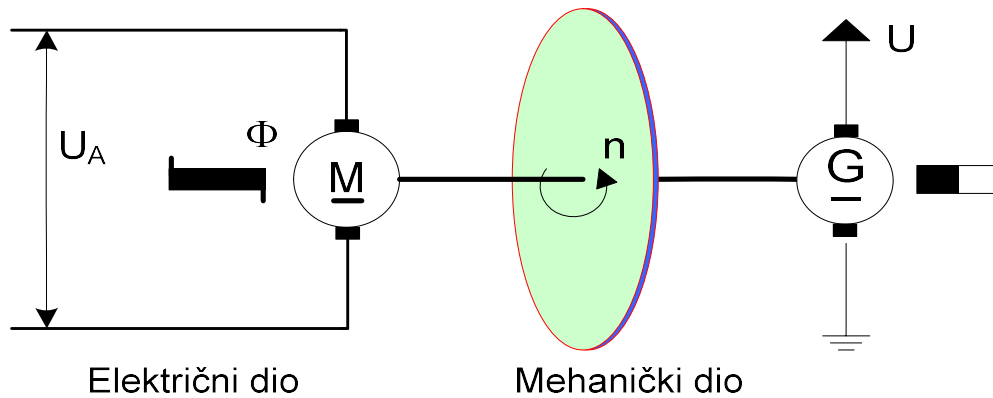
Slika 18. Dva serijski vezana P_1 člana ekvivalentna su jednom P_2 članu s aperiodskom karakteristikom

Često jedan od tih dvaju članova nema značajnu vrijednost, tako da se može i zanemariti. To se iskazuje malom početnom zakrivljenošću grafa. Tada je predominantna P_1 karakteristika. U slučaju da su te dvije jedinice (T_{11} i T_{12}) približno jednake točka infleksije je jako izražena jer se vrijednost tih dviju točaka sumira.

Ako se povuče pravac tangenta kroz ovu točku tada razmak od presjecišta tangente i pravca stabilnog odziva predstavlja zbroj dviju vremenskih konstanti članova (slika 17). Tako se jednostavno, poznavajući barem jednu vremensku konstantu, može odrediti i druga vremenska konstanta.

U nekim slučajevima, naročito kada je istosmjerni motor relativno mali, može ga se promatrati kao regulacijski član drugog reda. Ulaz x je napon armature, a izlaz y je brzina

vrtnje osovine n . Na osovinu motora spojen je tako-generator. Napon na izlazu tako-generatora proporcionalan je broju okretaja motora (slika 19).



Slika 19. Napon na izlazu tako-generatora proporcionalan je broju okretaja motora (motor se može promatrati kao P_2 član)

Ovo razmatranje je prihvatljivo pod uvjetom da mehanička vremenska konstanta motora T_M mora biti veća od vremenske konstante armaturnog kruga T_A . Odnos mora biti barem sljedeći:

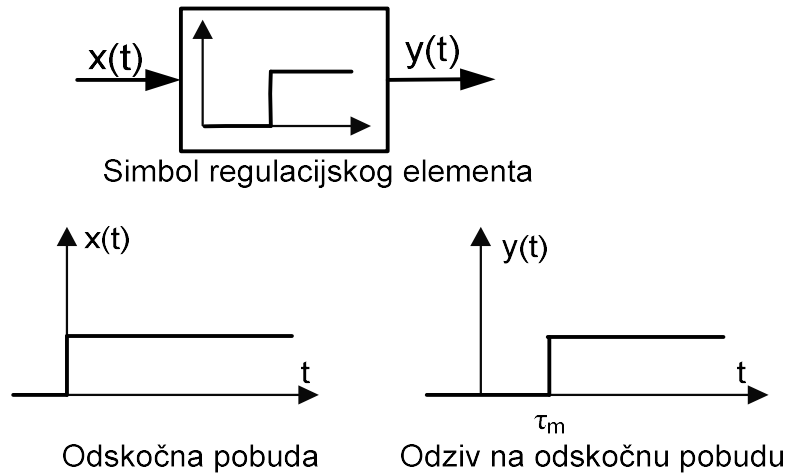
$$T_M > 4T_A$$

Pod takvim uvjetima relativni koeficijent prigušenja δ veći je od jedinice, pa P_2 član ima aperiodsku karakteristiku, te brzina n neće varirati (oscilirati) u prijelazu iz jedne vrijednosti u drugu.

3.2.5. Član s mrtvim vremenom - τ_m član

Ovaj član se razlikuje od proporcionalnog člana po mrtvom vremenu τ_m , tj. vrijeme koje treba proći da se na izlazu pojavi signal iste veličine kao ulazni nakon što se on pojavio na ulazu. Nakon mrtvog vremena τ_m član možemo razmatrati kao P_0 član (slika 20).

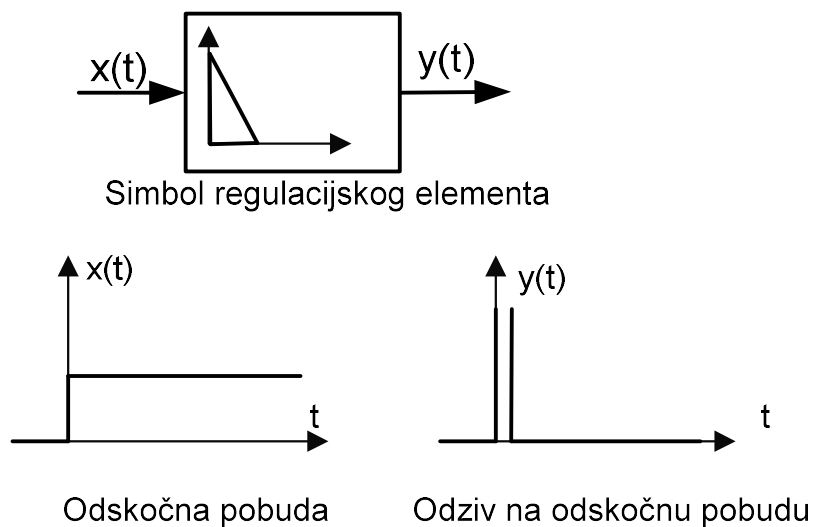
Konkretan primjer jedinice sa mrtvim vremenom je transportna traka. Kad se na ulazu (početku) trake postavi materijal, potrebno je da prođe određeno vrijeme τ_m , kako bi taj isti materijal došao na izlaz (odredište)



Slika 20. Karakteristika τ_m člana

3.2.6. Derivacijski član - D član

Član kod kojeg je izlazna veličina proporcionalna brzini promjene ulazne veličine naziva se idealnim derivacijskim članom.



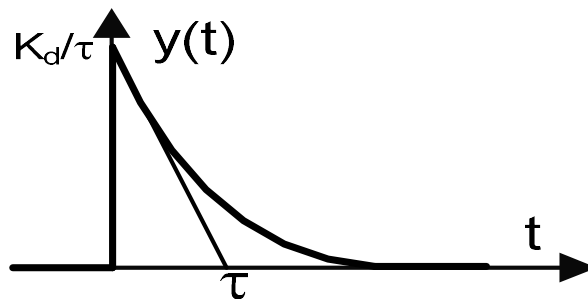
Slika 21. Karakteristika D člana

Diferencijalna jednačba glasi:

$$y = K_d \frac{dx}{dt}$$

gdje je K_d derivacijski faktor ili koeficijent.

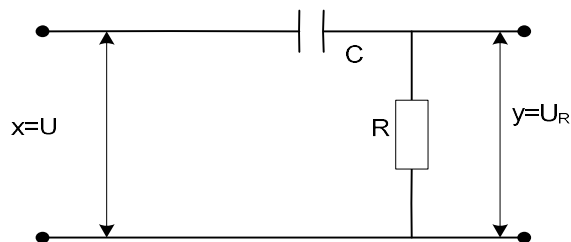
Zbog toga što svi fizički procesi u prirodi imaju inerciju, nemoguće je ostvariti idealan odziv. Prema tome, realni odziv derivacijskog člana na odskočnu pobudu prikazan je na slici 22.



Slika 22. Realan odziv D člana (D_1 član)

Derivacijski član se u praksi ne koristi samostalno zbog toga što on reagira jedino na brze promjene poremećajne veličine. Ako se te promjene odvijaju polako i vremenski dulje, djelovanje derivacijskog člana potpuno će izostati. Derivacijski član dodaje se drugim regulacijskim dijelovima jer djeluje stabilizirajuće.

Kao primjer realnog derivacijskog člana može se uzeti CR sklop.



Slika 23. D član sa CR elementima

3.3. REGULACIJSKI ELEMENTI U POVRATNOJ VEZI

Uobičajeno, regulacijski krug je sastavljen od više prijenosnih članova, te svaki sa svojim osobinama. Od izuzetne važnosti u regulacijskim krugovima jest provjera da li oni sadrže kakav integralni član. U slučaju da jedan regulacijski element sadrži i karakteristiku, tada ako je ulaz različit od nule, vrijednost izlaznog signala raste sve dok ne dosegne dozvoljenu maksimalnu vrijednost izlazne regulirane veličine.

Kada regulacijski krug ne sadrži nikakav integracijski element, te je ulaz različit od nule, izlazna veličina će nakon određenog prijelaznog vremena biti stabilna. Ona može narasti do izuzetno visoke granice samo ako podešena razina leži izvan nominalnog regulacijskog područja. I jedan i drugi član mogu pridonijeti "preregulaciji" regulatorskog sustava.

Nelinearni regulacijski elementi

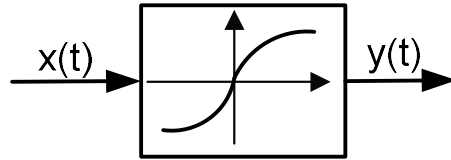
U svim prethodno spomenutim članovima pretpostavljena je i njihova linearna karakteristika, tj. dvostruko povećanje ulaza djelovalo je i na dvostruko povećanje izlaza.

Osim linearnih, postoje i nelinearni elementi. Takvim je elementima karakteristika krivulja ili kakva isprekidanost, ili oboje.

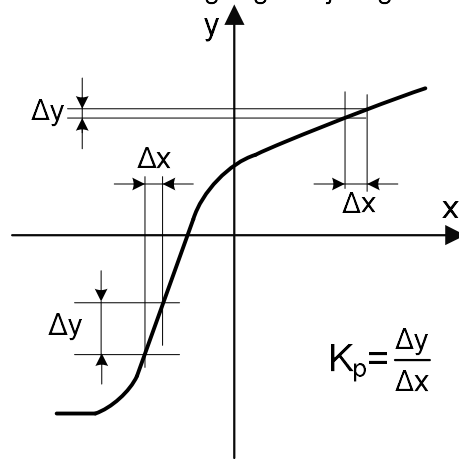
Kod nelinearnih elemenata mala će promjena ulazne veličine (Δx) utjecati na različite promjene izlazne veličine (y). Promjena izlazne veličine će prvenstveno ovisiti o mjestu promjene vrijednosti ulazne veličine (slika 24.).

U jednom slučaju će mala promjena ulazne vrijednosti utjecati na veliko povećanje izlazne vrijednosti, a drugi put će velika promjena ulazne veličine rezultirati sa malom rezultantom na izlazu iz nelinearnog regulatora. Vidljivo je da pojačanje prijenosnog elementa varira od točke do točke po krivulji.

U nekim slučajevima nelinearni regulacijski element se može tretirati i kao linearan, ali samo po određenim dijelovima karakteristike, tj. samo u određenim granicama. U tim dijelovima karakteristika ide po tangenti, tj. po pravcu, te jednake promjene na ulazu utječu na jednake promjene na izlazu.



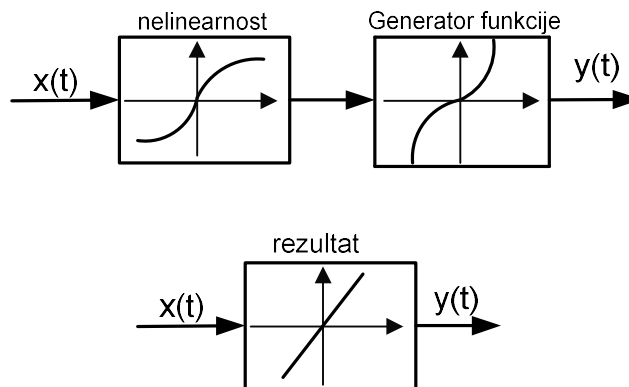
Simbol nelinearnog regulacijskog elementa



Funkcija nelinearnog elementa

Slika 24. Nelinearna karakteristika regulacijskih članova

Drugi način “lineariziranja” nelinearnih elemenata je dodavanje još jednog nelinearnog elementa u krug. Uvjet je da nelinearnost tog drugog elementa bude inverzna nelinearnosti prvog (slika 25).



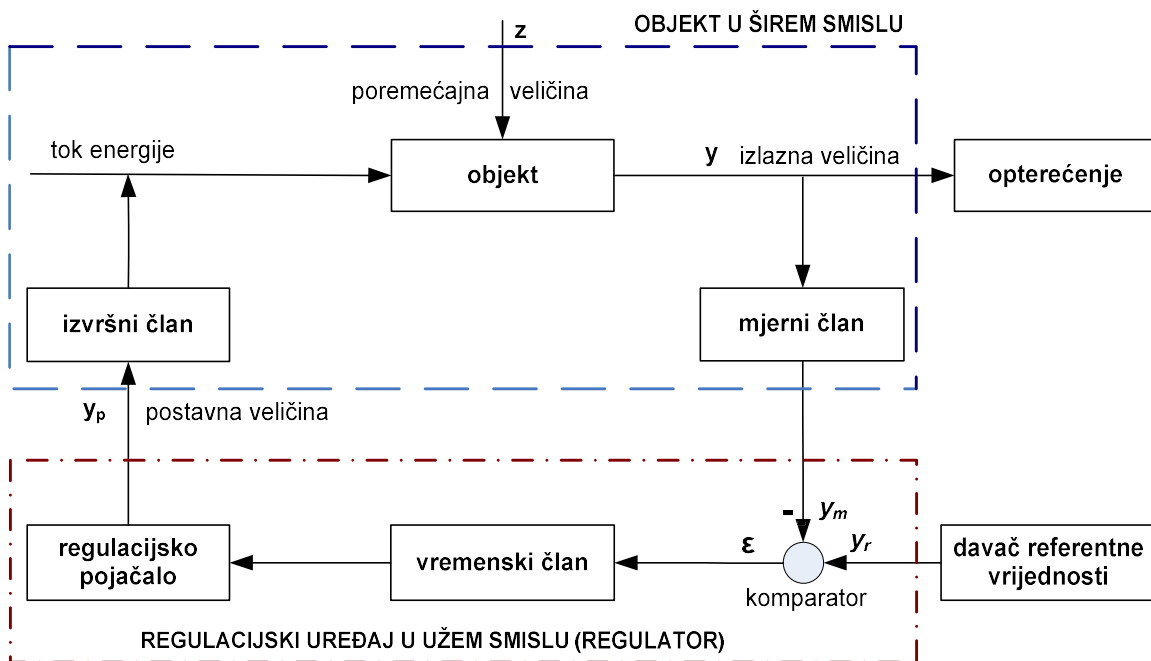
Slika 25. Linearizacija karakteristike člana putem uključivanja u petlju generatora funkcije

Taj prijenosni nelinearni član koji radi od točke do točke i djeluje na prvi nelinearni element naziva se generator funkcije.

4. REGULATORI

4.1. OPĆENITO O REGULATORU I REGULACIJSKOM SUSTAVU

Kada vanjska smetnja utječe na reguliranu veličinu tako da ona ide van dozvoljene granice, regulator mora djelovati tako da je vrati u dozvoljene tolerancije. Naravno da signal smetnje mora često prolaziti kroz nekoliko članova petlje da bi poremetio reguliranu veličinu koja sa svoje strane utječe na rad elemenata petlje uslijed pojave regulacijskog odstupanja na usporodniku u cilju korekcije regulirane veličine. Veća ili manja tromost obrade signala kroz pojedine članove utječe na usporavanje povratka na normalno stanje, stoga je i zadatak regulatora da djeluje na ta kašnjenja sa svojim vremensko-ovisnim djelovanjem.



Slika 26. Regulacijski sustav

Na slici 26. prikazana je blok shema regulacijskog sustava. Osnovni elementi regulacijskog sustava su: davač referentne-željene vrijednosti, mjerni član, regulator, izvršni član i objekt.

Davači referentnih vrijednosti koriste se i u otvorenim regulacijskim sustavima. Uobičajena izlazna referentna vrijednost kreće se u granicama od -10 V do +10 V. Taj se napon naziva i željena vrijednost ($y_r = y_{\check{z}}$).

Mjerni član koristi se pri mjerenju regulirane veličine. Mjerni član se sastoji od:

Mjernog osjetila (senzora) koji mjeri fizičku veličinu koju želimo regulirati. Mjerna osjetila možemo proizvoljno podijeliti na mjerna osjetila za mehaničke (položaj, sila, zaokret, kut), procesne (temperatura, tlak, protok, razina) i električne veličine (napon, struja, frekvencija).

Mjernog pojačala koji podiže vrijednost signala iz pretvornika na nivo kompatibilan sa ulazom u regulator. Mjerna pojačala mogu biti: elektronička, pneumatska i hidraulična.

Mjernog pretvornika u kojem se signal (veličina) iz mjernog osjetila pretvara u oblik pogodan za daljnju obradu.

Veličina na izlazu iz mjernog člana je trenutno, stvarno stanje ili povratni (feed-back) signal. Mjerni član predaje signale određenog opsega vrijednosti tj. normiranog područja i to za pneumatske signale od 20 do 100 kPa (0.2 do 1 bar), a za električne signale od 0 do 20 mA uz maksimalno 24 V istosmjernog napona. U području normiranih električnih signala postoje odstupanja, pa nailazimo i na izvedbe s područjem od 0 - 50 mA, te od 0 - 120 mA. Često je mjerni član složen kao jedinstven uređaj.

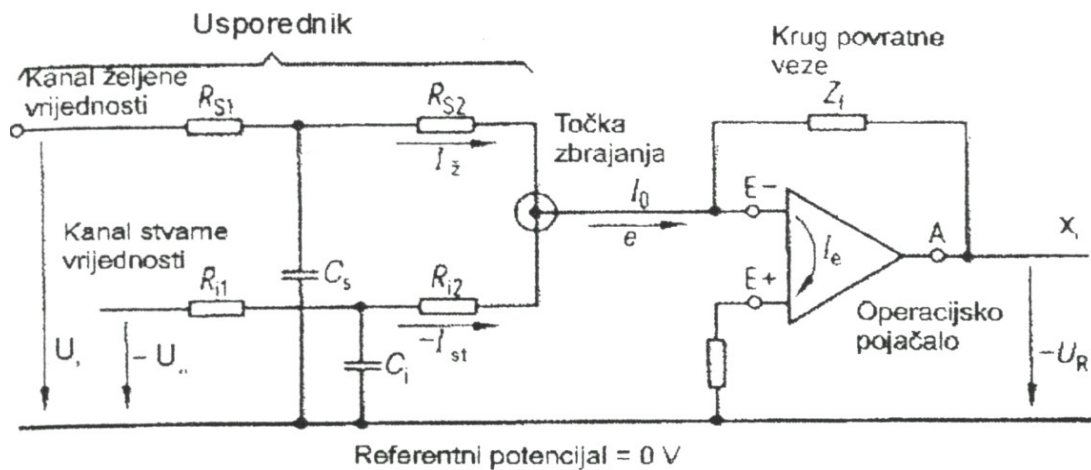
Regulator se sastoji od:

Komparatora (usporednik), koji oblikuje regulacijsko odstupanje (ϵ) između željene i stvarne vrijednosti,

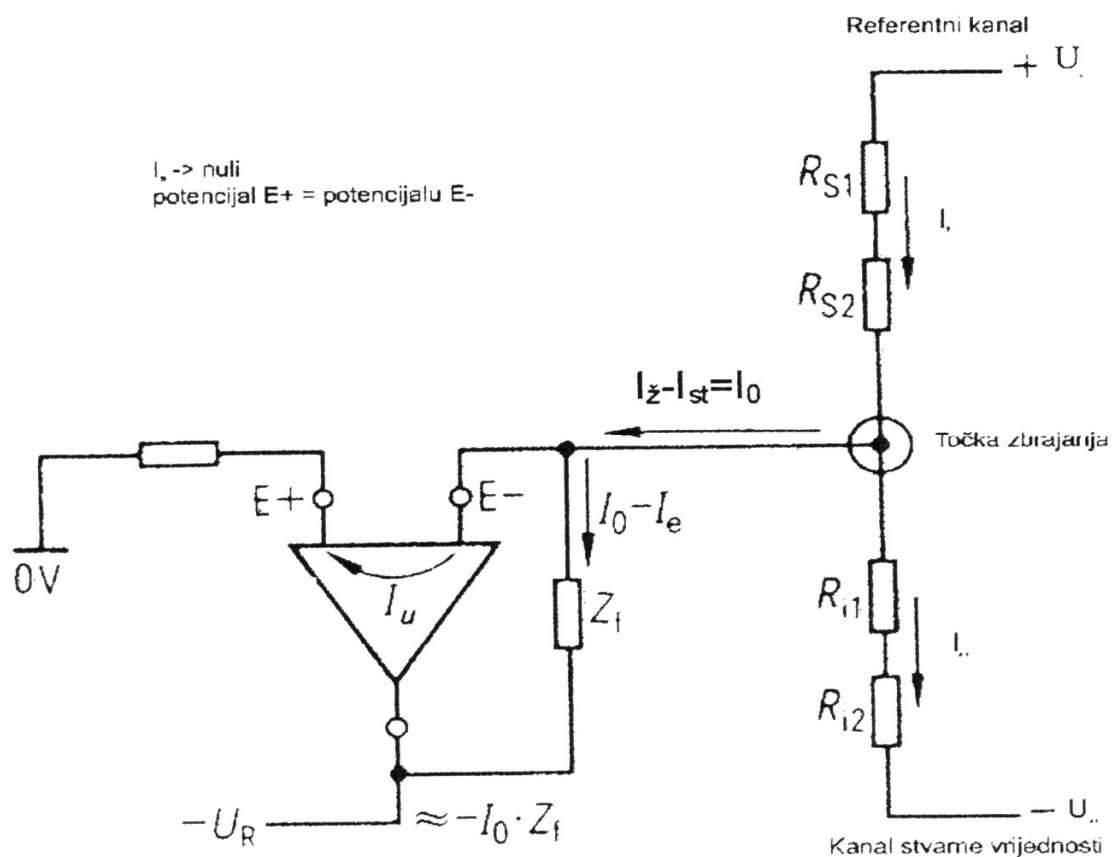
Pojačala sa negativnom povratnom vezom koje pojačava signal razlike. Osim operacijskog pojačala, koji spada u električna pojačala, postoje i pneumatska i hidraulična pojačala,

Vremenskog člana kojim se signal greške vremenski preoblikuje (derivira, integrira). Ovaj član dodaje se pojačalu te čine jedinstven sklop

.



Slika 27. Principijelna shema regulatora



Slika 28. Tokovi struja u usporedniku

Usporednik ima dva ulazna kanala, jedan za referentnu veličinu, a drugi za stvarnu vrijednost. Oba kanala sadrže u svojim granama otpornike i kapacitete koji zajedno utječu na

prigušenje kruga. Izlazi iz tih dvaju kanala sastoje se od dviju struja: stvarne i željene (I_{st} i I_e) proporcionalnih stvarnoj i željenoj veličini. Treba provjeriti da U_{st} i U_e budu različitog polariteta, kako bi se pri zbroju dobila razlika signala-regulacijsko odstupanje ε (slika 28.).

U slučaju da su ta dva signala istih vrijednosti tada je stanje na komparatoru sljedeće

$$I_z - I_{st} = 0$$

To znači da se regulirana vrijednost na izlazu sistema održala točno na željenoj razini.

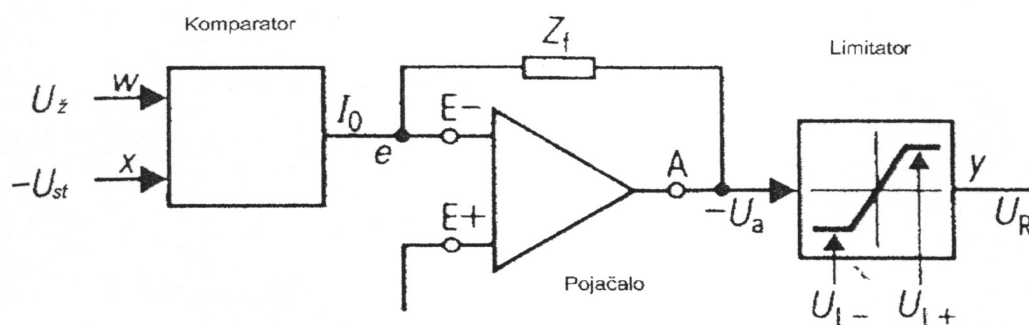
Kada struje nisu jednake pojavljuje se komponenta koja nije jednaka nuli:

$$I_z - I_{st} = I_o$$

Struja I_o održava vrijednost odstupanja ε , koja ima funkciju korekcije regulirane veličine.

Operacijsko pojačalo sa negativnom povratnom vezom čini drugi dio regulatora. Ulaz pojačala je signal ε odnosno struja I_o . Pošto je pojačalo izvedeno s integriranim krugovima, odlikuje se izuzetno visokim faktorom pojačanja, dovoljna je mala ulazna struja da bi se osigurala potrebna regulirana snaga na ulazu regulacijskog objekta.

Ta mala struja koja upravlja pojačalom je samo dio razlike struja I_o . Veći dio I_o zaobilazi pojačalo preko povratne grane Z_f koja oblikuje karakteristike regulatora. Ponekad regulatoru treba dodati još jedan regulacijski član čija je uloga da ograničava vrijednost upravljačke veličine s ciljem da ona ne prekorači tehničke mogućnosti sistema. Taj se član naziva limitator (slika 29).



Slika 29. Osnovna shema limitatora

Naponi U_{L+} i U_{L-} određuju u kojim će se granicama moći kretati napon na izlazu iz regulatora. U slučaju da izlazni napon preraste te vrijednosti tada se on "reže", te se ne preopterećuje regulacijski sustav koji bi prestao ispravno raditi.

Izvršni član sastoji se od postavnog pogona, koji može biti električni, pneumatski i hidraulični, i postavnog člana (ventili, kontakti, ...).

Objekt ili proces označava upravljani dio sustava regulacije u kojima se mora održavati zadani režim rada. Objekt regulacije karakterizira skup veličina koje se zovu varijable, promjenjive veličine i parametri.

4.2. VRSTE REGULATORA

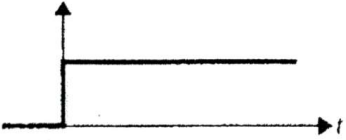
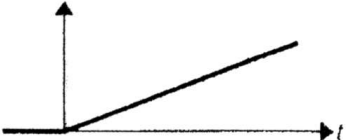
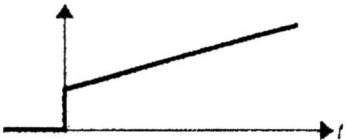
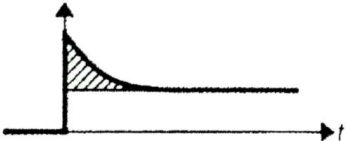

Možemo razlikovati šest vrsta regulatora čiji su odzivi na odskočnu pobudu prikazani u tablici 3.

4.2.1. Proporcionalni regulator nultog reda – P_0 regulator

Osnovni element P_0 regulatora je usko povezan sa P_0 prijenosnim članom. U slučaju nule na ulazu, na izlazu se također nalazi nula. Izlazni signal je proporcionalan sa ulaznim faktorom proporcionalnosti K_p (slika 30.).

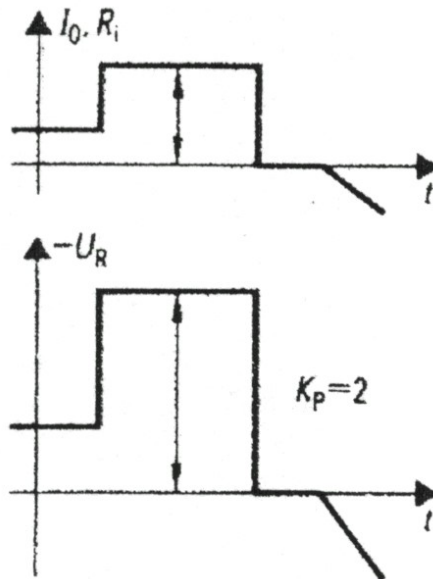
Veličina pojačanja K_p određena je pomoću otpornika R_f u krugu povratne veze pojačala (slika 31.). Da bi se određeni faktor na pojačalu postavio na neku vrijednost, mora se ponajprije poznavati otpor R_i u grani stvarne vrijednosti komparatora. Ako je vrijednost otpora povratne veze R_f poznata, tada je:

$$R_f = K_p R_i$$

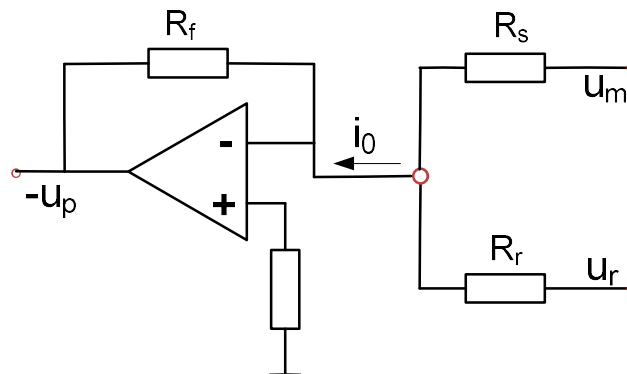
Oznaka regulatora	Step odziv regulatora
P	
I	
PI	
PD	
PID	

P - proporcionalni regulator
I - integralni regulator
D – derivacijski regulator

Tablica 3. Prikaz odziva regulatora na odskočnu pobudu



Slika 30. Odziv na pobudu regulatora sa P_0 karakteristikom



Slika 31. Određivanje vrijednosti pojačanja

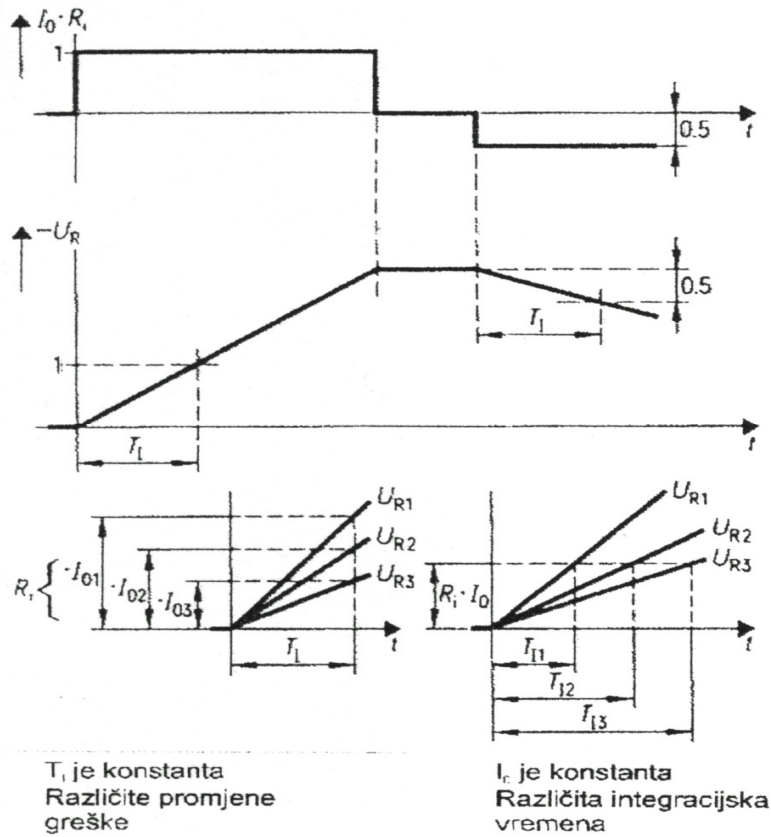
Odlike djelovanja proporcionalnog regulatora su jednostavnost, stabilnost i neposrednost, ali uz stalno odstupanje od namještene vrijednosti.

4.2.2. Integralni regulator - I regulator

Kao i u P_0 regulatoru, ulazna veličina je regulacijsko odstupanje ε odnosno odgovarajuća struja I_0 .

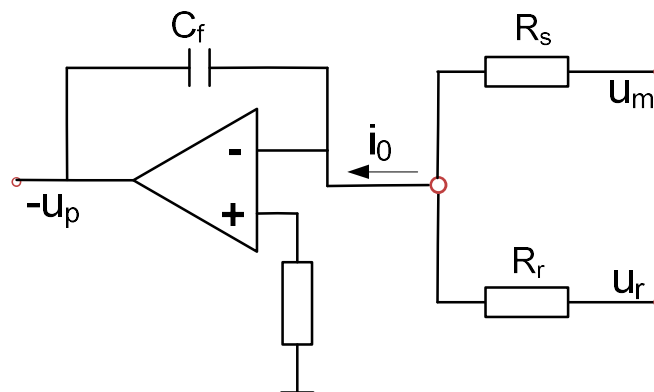
Izlazna veličina iz I-regulatora je izlazni napon U_r . U slučaju da su oba ulazna signala na usporedniku jednaka, tada je njihova razlika jednaka nuli, te slijedi da nije potrebna nikakva

korekcija. Skokovita promjena regulirane veličine uzrokuje nagibnu promjenu uzbuđnog signala (slika 32).



Slika 32. Ovisnost rada I regulatora u odnosu na zadane parametre

Nagib te kosine je to veći što je skokovita promjena veća, tj što je integracijsko vrijeme kraće. Na slici 33. prikazan je integralni regulator.



Slika 33. Shema integralnog regulatora

Poznavajući strukturu takvoga regulatora moguće je odrediti veličinu kapaciteta u krugu povratne veze operacijskog pojačala u I regulatoru:

$$k_i = \frac{1}{C_f R_s}$$

Integralni regulator nema odstupanja, ali stvarna vrijednost vođene (regulirane) veličine oscilira oko željene vrijednosti.

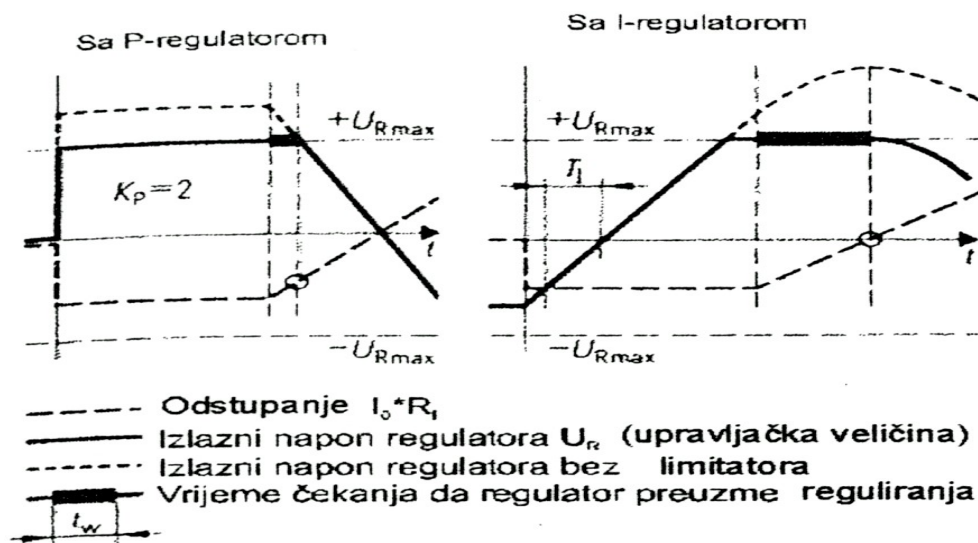
4.2.3. Usporedba P i I regulatora

Važnost usporedbe P i I regulatora sastoji se u činjenici da se svaki regulator koji ne sadrži I regulator može približno usporediti sa P regulatorom, dok svaki regulator koji ima barem jedan I regulator u osnovi funkcionira kao I regulator.

Regulator može obrađivati signal U_R u predviđenom području regulacije. Slučaj kada napon U_R , zbog velikog iznosa regulacijskog odstupanja ε i određene karakteristike regulatora prelazi dozvoljenu najveću predviđenu vrijednost, se smanjuje do vrijednosti U_{Rmax} . Taj proces "rezanja" napona vrši se pomoću limitatora napona U_R koji se zadržava na vrijednosti U_{Rmax} . Općeniti prikaz dvaju regulatora dat je na slici 34.

P regulator je regulator koji ne posjeduje I članove, te iz stanja prekoračenja maksimalnog regulacijskog napona izlazi u trenutku kada umnožak greške ε i proporcionalnog faktora K_p pada ispod granice maksimalnog napona U_{Rmax} .

I regulator je svaki regulator koji se sastoji od barem jedne I jedinice. U slučaju prereguliranja ovo stanje se ne može promijeniti sve dok odstupanje ε nije svedeno na nulu. Upravljački signal Y_H se udaljava od U_{Rmax} , tek kada odstupanje ε promjeni predznak. Usporedba između P i I regulatora data je u tablici 4.



Slika 34. Osobine regulacijskog sustava u slučaju "prereguliranja"

Tablica 4. Karakteristike regulacijskog sustava po pojavi odstupanja

SA	Po početnom odzivu sustava	Rezultat nakon dovršetka procesa regulacije
P REGULATOROM	Trenutni odziv djeluje u skladu s pojačanjem	Trajno odstupanje u stacionarnom stanju. Pri većem pojačanju manje odstupanje
I REGULATOROM	Spor odziv Integracijsko vrijeme odstupanja	Nema odstupanja Integracija prestaje sa odstupanjem = 0

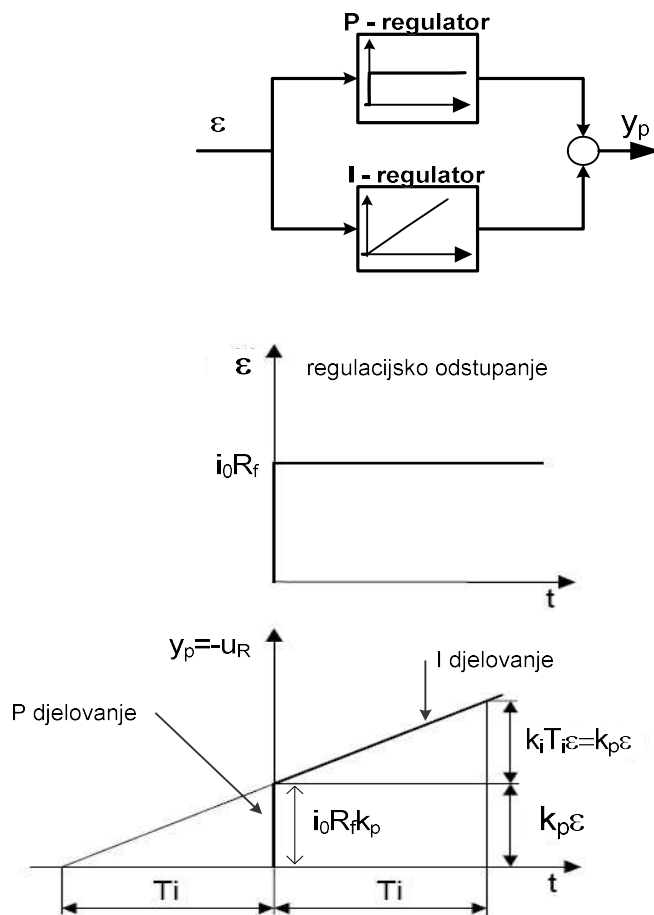
Te činjenice ukazuju da P regulator sa stanja preopterećenja brže vrši promjenu u normalno radno stanje, dok će kod I regulatora ta varijabla nastaviti sa oscilacijama za nekoliko perioda.

Sljedeća važna činjenica kod usporedbe tih dvaju regulatora je brzina odziva na skokovit impuls. Dok P regulator ima vrlo brz odziv, I regulatoru je potrebno određeno vrijeme da se postavi na željenu vrijednost. Međutim, loše je da u radu P regulatora uvijek ostaje određeno rezidualno odstupanje nakon korekcije na novu vrijednost. To znači da stvarna vrijednost U_{st} nikad nije baš jednaka željenoj U_z . Smanjenje rezidualne greške postiže

se povećanjem faktora pojačanja K_p . Kod I regulatora integracija prestaje tek kada su ove vrijednosti jednake, odnosno $U_{st}=U_r$.

Očito je da oba regulatora imaju svoje dobre i loše osobine: P regulator se ističe u početnoj fazi reguliranja zahvaljujući brzom odzivu, a I-regulator u završnoj fazi kad se vrijednost podešava na točno željenu vrijednost. Veća korist od ovih regulatora postiže se kod simultanog rada jednog i drugog regulatora (slika35.).

Nakon zasebne obrade u jednom i drugom regulatoru oba se signala zbrajaju, te čine upravljački signal Y_h . Time se postiže povećanje dobrih karakteristika i smanjenje loših.

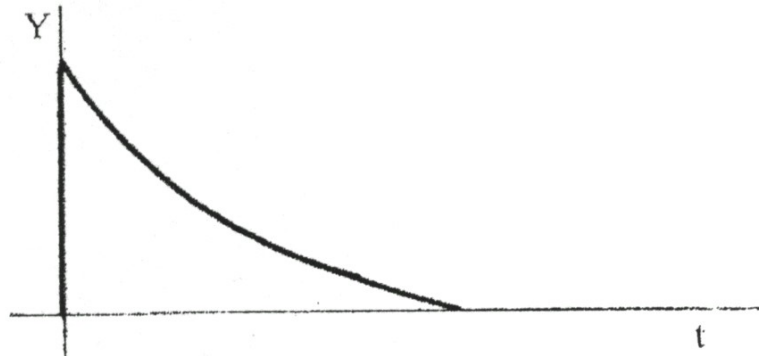


Integracijsko vrijeme T_i definiramo kao vrijeme koje je potrebno da se pod utjecajem I djelovanja postigne isti učinak koji se pod P djelovanjem dogodio na početku pojave regulacijskog odstupanja. Sa slike je vidljivo da je $k_i T_i = K_p$

Slika 35. Istovremeno djelovanje P i I komponente

4.2.4. Derivacijski regulator - D regulator

Rad derivacijskog regulatora temelji se na radu derivacijskog prijenosnog člana. Derivacijski regulator se brzim djelovanjem u obliku skoka trenutno suprosvavlja djelovanju poremećaja.

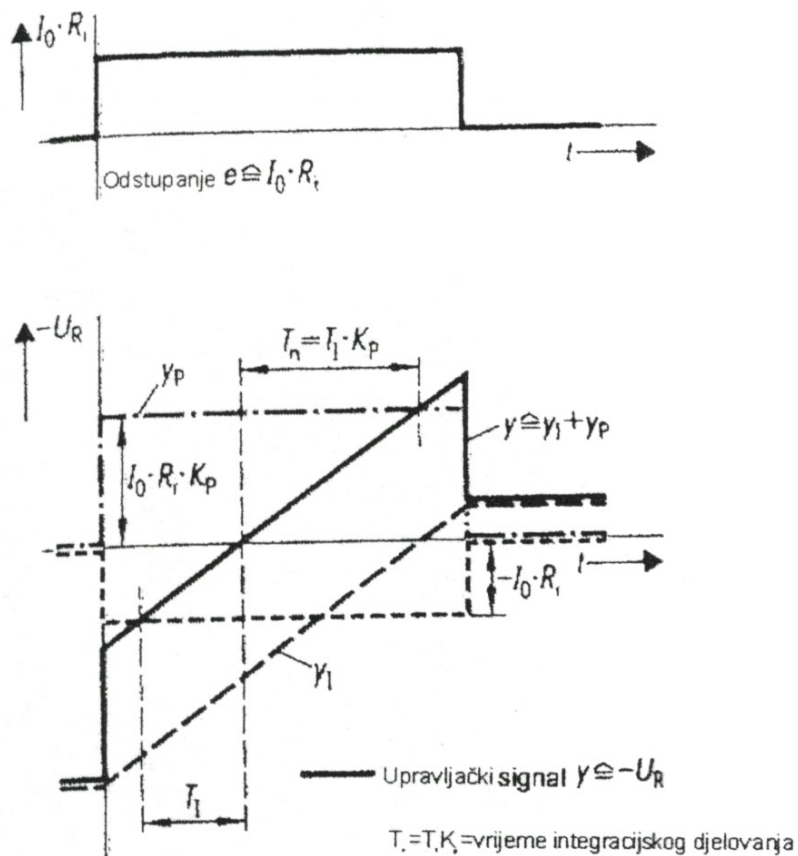


Slika 36. Odziv na odskočnu pobudu D regulatora

Čisto derivacijsko djelovanje sa operacijskim pojačalom se u praksi ne izvodi zbog teškoća u eliminaciji utjecaja šumova. Neobično je da regulator sadrži i D komponentu u reguliranim elektromotornim pogonima jer utječe na pojačanje smetnji. Takve smetnje djeluju i na reguliranu veličinu. U praksi svaka izlazna veličina mjernog člana sadrži i određeni šum. Taj se šum prenosi dalje u reguliranu veličinu, i postaje njen sastavni dio. Tipičan primjer stvaranja šuma je taho generator koji u sebi sadrži šum komutacije čija frekvencija ovisi o brzini rotacije generatora.

4.2.5. Proporcionalno-integralni regulator - PI regulator

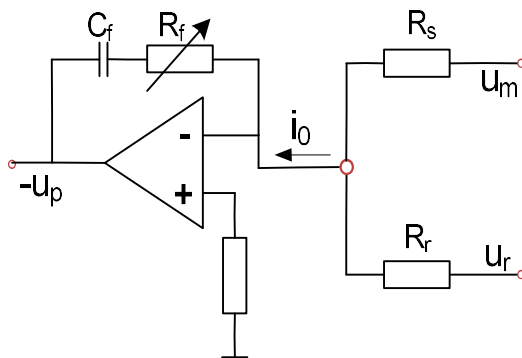
PI regulator je najčešće korištena vrsta regulatora. Sastavljen je od dva osnovna djela: proporcionalnog i integralnog dijela. Isto tako i oblik izlaznog signala prati osobine P i I regulatora (slika 37).



Slika 37. Odziv upravljačkog signala $y = U_R$ na odskočnu pobudu veličine regulatorskog odstupanja ε

Proporcionalno djelovanje daje neposrednost i stabilnost. Osobina P dijela regulatora je da vrši pojačanje signala, faktorom pojačanja K_p . Utjecaj K_p na upravljački signal vidljiv je iz izraza:

$$K_p \varepsilon = y_p$$

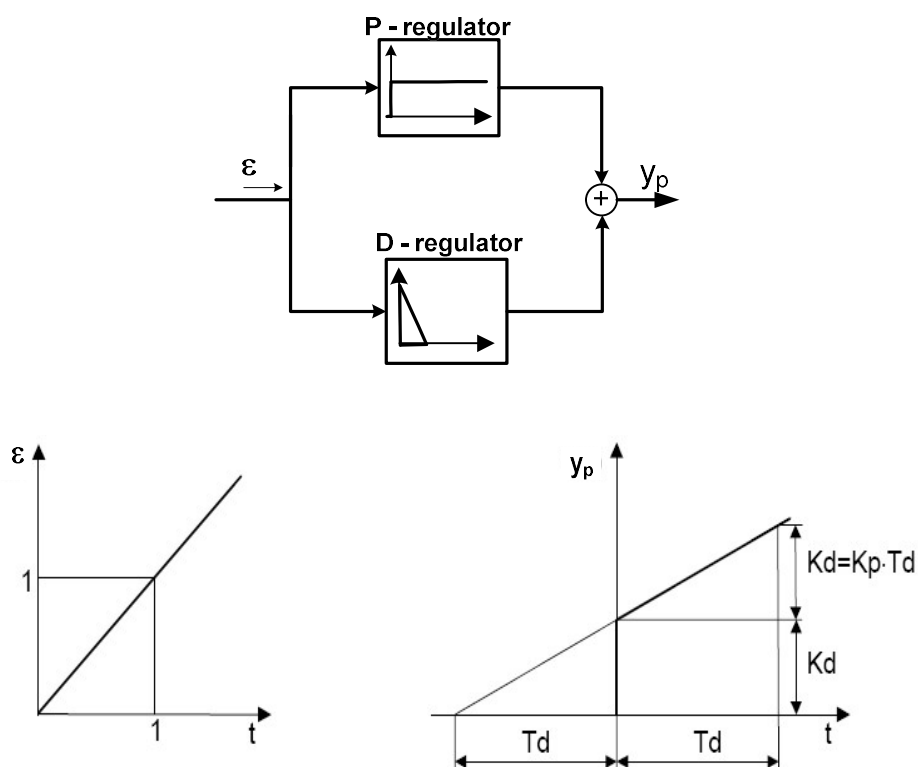


Slika 38. Shema PI regulatora

I član regulatora ima karakterističan parametar integracijskog vremena T_I . Što je vrijeme T_I kraće, brža je promjena signala Y_i . Integracijsko djelovanje otklanja odstupanje. Značajka djelovanja ovog regulatora jest neznatna oscilatornost.

4.2.6. Proporcionalno - derivacijski regulator - PD regulator

Proporcionalno-derivacijski regulator ima dva dijela: proporcionalni i derivacijski dio. Vladanje PD regulatora može se prikazati ako na njegov ulaz djeluje signal pogreške, $\varepsilon(t) = a \cdot t$.

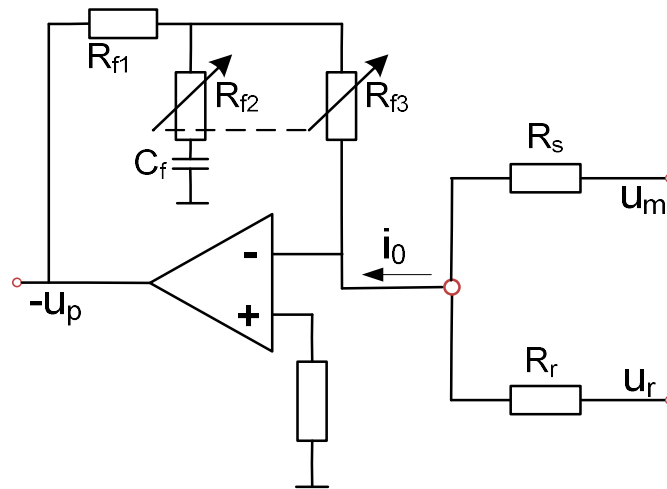


Slika 39. Odziv PD regulatora na zadanu pobudu

Sa slike 39 vidi se da na odziv utječu osobine oba sastavna dijela. Izlaz se mijenja skokovito za vrijednost K_d kao posljedica derivacijskog djelovanja, a zatim pravocrtno.

Proporcionalno djelovanje daje PD regulatoru neposrednost i stabilnost djelovanja i otklanja odstupanje, dok se derivacijsko djelovanje suprotavlja brzim promjenama vođene

veličine koje nastaju pri djelovanju poremećaja. U sustavu preostaje odstupanje stvarne vrijednosti vođene veličine od željene vrijednosti.



Slika 40. Shema PD regulatora

Pošto se radi o derivacijskom djelovanju pogodno je odabrati poremećaj (regulacijsko odstupanje) u obliku nagibne funkcije (neka bude jedinična nagibna funkcija radi jednostavnijeg objašnjenja). Ako se na ulaz PD regulatora dovodi nagibni signal, tada treba proći vrijeme derivacije ili vremenska konstanta derivacije T_d da bi se izlaz iz regulatora pod djelovanjem proporcionalnog člana promijenio za vrijednost k_d za koju se u početku skokovito promijenio pod djelovanjem derivacijskog člana. Drugim riječima, poslije vremena T_d , vrijednost postavne veličine će biti $2k_d$ (a u trenutku $t = 0$ je bilo $y_p(t) = k_d$), što daje vezu između k_p i k_d :

$$k_d = k_p T_d \Rightarrow k_p = k_d / T_d.$$

Sada se izraz za PD djelovanje može napisati u obliku:

$$y_p(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$$

Na temelju gornjeg izraza možemo napisati prijenosnu funkciju PD regulatora:

$$G_R(s) = k_p (1 + T_d s)$$

Pošto se PD djelovanje ne može definirati na osnovi odskočne promjene $\varepsilon(t)$, jer je derivacija odskočne funkcije u trenutku promjene jednaka beskonačnosti, onda se prema gore

navedenome koristi linearna promjena $\varepsilon(t) = E \cdot t$. Tada upravljački zakon PD regulatora ima oblik:

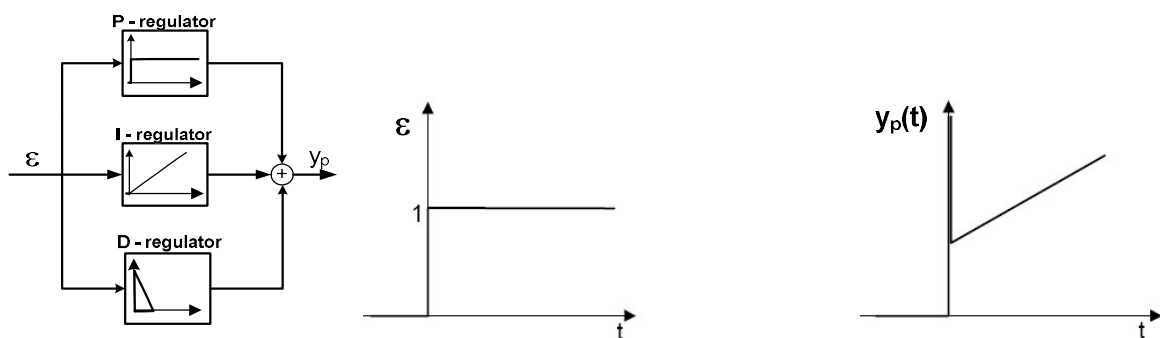
$$y_p(t) = k_p E(t + T_d)$$

Iz ove se jednadžbe vidi da je za $\varepsilon(t_0) = E \cdot t_0$ zadanu u trenutku t_0 , postavna veličina proporcionalna s $E \cdot (t + T_d)$, tj. s regulacijskim odstupanjem u trenutku $(t + T_d)$. Dakle, postoji efekt pomaka upravljačkog signala unaprijed u vremenu za iznos T_d , te se ova konstanta naziva još i *konstanta prednjačenja*. Prema tome, konstanta T_d se definira kao vremenski interval za koji derivacijsko djelovanje prednjači u vremenu, u odnosu na proporcionalno djelovanje, uz linearnu promjenu pogreške.

Proporcionalno djelovanje daje PD regulatoru neposrednost i stabilnost djelovanja, dok se derivacijsko djelovanje suprotstavlja brzim promjenama regulirane veličine koje nastaju pri djelovanju poremećaja. Kod korištenja ovoga djelovanja postoji trajno regulacijsko odstupanje, tj. preostaje odstupanje stvarne vrijednosti izlazne/regulirane veličine od referentne vrijednosti.

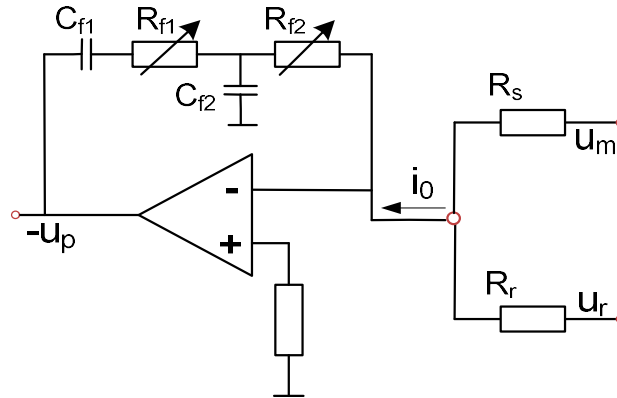
4.2.7. Proporcionalno-integralno-derivacijski regulator - PID regulator

Ovaj tip regulatora ujedinjuje sva djelovanja, tj. proporcionalno, integracijsko i derivacijsko djelovanje.



Slika 41. Odziv PID regulatora na step pobudu

Djelovanje PID regulatora povezuje sva dobra svojstva triju djelovanja: proporcionalno djelovanje osigurava stabilnost, integracijsko otklanja odstupanje, dok mu derivacijsko daje brzinu odziva i prigušuje sklonost sustava k osciliranju.



Slika 42. Shema PID regulatora

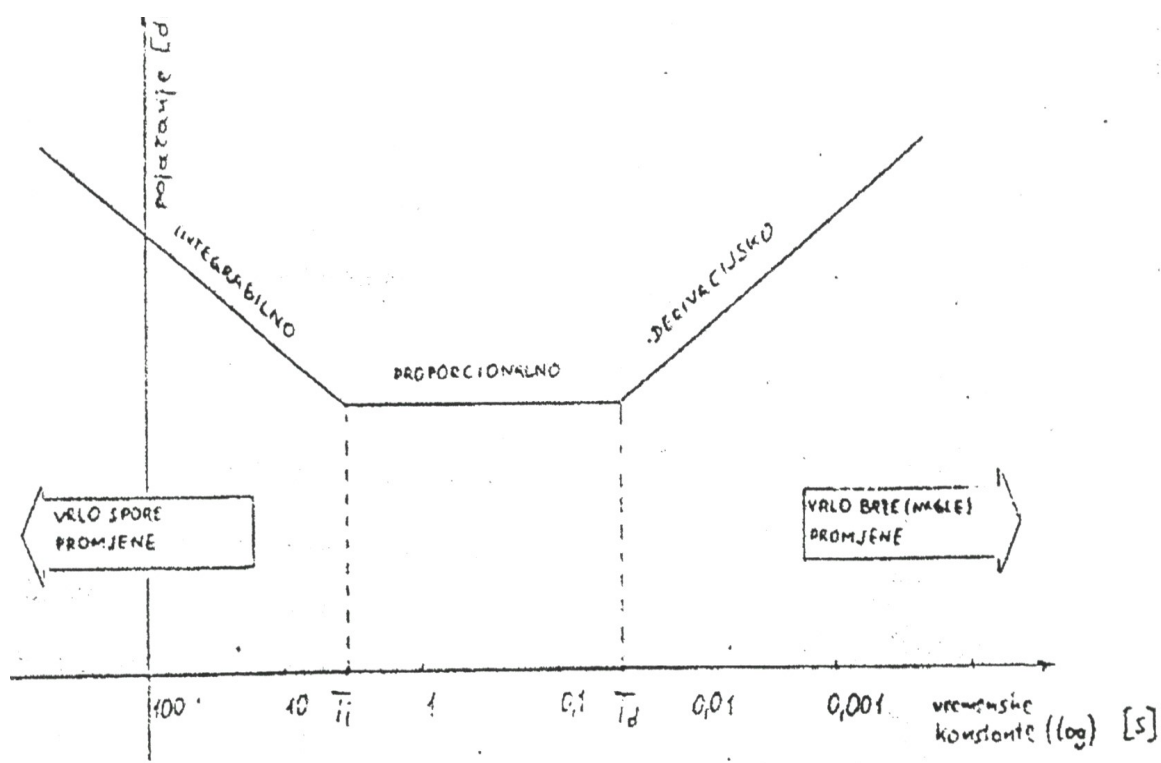
Ovako izveden regulator ima promjenljivo pojačanje na niskim i visokim frekvencijama. Kod komercijalnih izvedbi se parametri K_p , T_i , T_d mogu namještati pomoću odgovarajućih vijaka (gdje je K_p pojačanje, T_i vremenska konstanta integracije i T_d vremenska konstanta derivacije).

4.3. PODEŠAVANJE REGULATORA

Podešavanje regulatora izvodi se njegovim testiranjem, simulacijom stvarnog rada. Takav način postavljanja je jedini moguć jer nije moguće predvidjeti pod kakvim će uvjetima regulator raditi, kakvi će biti vanjski utjecaji na sustav, te stanje naponske mreže.

Obično se radi o potrebi da se postigne određna stabilnost djelovanja, prikladno prijelazno vladanje ili odgovarajuća točnost regulacije.

PID regulator, od kojeg se mogu dobiti ostali regulatori, podešava se mjenjanjem proporcionalnog pojačanja K_p i lomnih frekvencija koje su obrnuto proporcionalne integracijskoj vremenskoj konstanti T_i i derivacijskoj vremenskoj konstanti T_d .

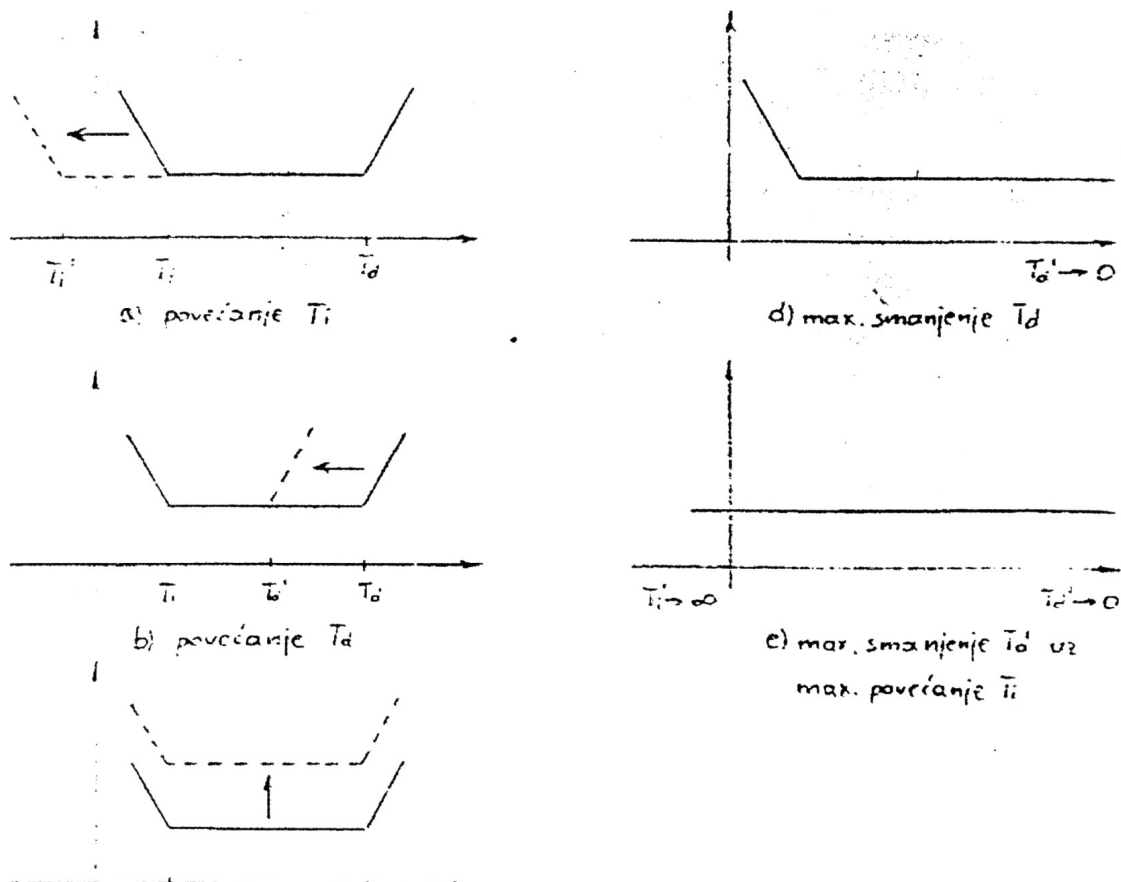


Slika 43. Amplitudno – frekvencijska karakteristika PID člana

$$T = \frac{1}{\omega_1}$$

Iz slike 44 može se vidjeti kako promjena pojačanja i vremenskih konstanti utječe na amplitudnu frekvencijsku karakteristiku regulatora.

Treba uočiti da se postavljanjem vrlo male derivacijske konstante ($T_d \rightarrow 0$) poništava derivacijsko djelovanje (slika 44 d), te se na taj način dobija PI regulator. Ako se sada još maksimalno poveća integracijska konstanta ($T_i \rightarrow \infty$) čime se poništava integracijsko djelovanje dobiti će se čisti P regulator (slika 44e). Maksimalnim povećavanjem integracijske konstante ($T_i \rightarrow \infty$) kod normalne vrijednosti derivacijske konstante dobije se PD regulator.



Slika 44. Utjecaj promjene parametara regulatora na amplitudno-frekvencijsku karakteristiku

Ako želimo smanjiti statičku grešku smanjiti ćemo integracijsku konstantu, a ako sustav sporo reagira, zbog čega dolazi do velikih odstupanja kod naglih promjena, trebamo povećati derivacijsku konstantu. Međutim, problem je u tome što se pojačavanjem različitih parametara smanjuje stabilnost sustava. Nestabilan sustav dati će lošu regulaciju sa stalnim oscilacijama ili progresivnim povećavanjem amplituda oscilacija koje dovode do uništenja sustava. Znači, ako postavimo prejako jedan parametar, moramo zbog stabilnosti sustava smanjiti drugi parametar. To znači da za svaki regulator postoji jedna optimalna kombinacija parametara koja je eksperimentalno određena.

Puštanje u pogon regulatora izvodi se na sljedeći način: prvo se postavi maksimalna integracijska konstanta T_i , minimalno pojačanje i derivacijska konstanta T_d . Nakon toga

podiže se pojačanje do određene granice. Poslije pojačanja pojačava se integracijsko djelovanje smanjivanjem integracijske vremenske konstante. Ako je riječ o PI regulatoru i sve je u redu, onda je podešavanje završeno. Kod PID regulatora treba još povećanjem regulacijske konstante namjestiti derivacijsko djelovanje. Poslije namještanja svakog parametra treba malom promjenom referentne veličine provjeriti stabilnost sustava.

Pokvareni ili razdešeni regulator karakteriziraju dugotrajne oscilacije ili presporo (aperiodsko) reagiranje, kao i pojava većeg odstupanja (statička greška) u stacionarnom stanju. Kod pojave bilo kojeg od ova tri simptoma, treba prvo prelaskom na ručnu regulaciju provjeriti da li svi elementi u regulacionom krugu ispravno funkcioniraju (mjerno osjetilo, izvršni član, ...), a tek se nakon toga upuštati u zahvate na regulatoru.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu pokušao sam približiti način rada i karakteristike mjernih pretvornika procesnih veličina, ali i ostalih regulacijskih elemenata koji se koriste u ostvarivanju regulacijskog zadatka. Posljednja kretanja u razvoju procesnih mjernih pretvornika karakterizira minijaturizacija, težnja ka “inteligentnim mjernim pretvornicima” (kombinacija senzora i obrade signala), kombinacija više senzora u multisenzorske sisteme itd., a sve se više koriste i senzori koji daju digitalni izlaz. Današnje izvedbe procesnih mjernih pretvornika u pravilu sadrže mikroprocesor koji upravlja njihovim funkcijama. Analogni se signal iz mjernog pretvornika digitalizira i obrađuje u ugrađenom računalu. Na taj način “inteligentni” mjerni pretvornici su prikladniji za povezivanje, i komunikaciju u oba smjera.

Odabir procesnih mjernih pretvornika za pojedinu aplikaciju ovisi o procesnim uvjetima (klimomehanički uvjeti), mogućnostima ugradnje, željenoj točnosti, potrebnoj brzini reakcije i cijeni. Također, treba imati na umu da je uloga procesnih mjernih pretvornika presudna za sigurnost posade (operatera), postrojenja i okoline. Zato izboru procesnih mjernih pretvornika treba posvetiti veliku pažnju, i održavati ih u skladu s propisima.

Može se zaključiti da će se pronalascima novih materijala, kovina itd., cijena mjernih pretvornika smanjivati, a doći će do još većeg stupnja minijaturizacije, povećanja brzine odziva, veće preciznosti i pojednostavljenja ugradnje.

LITERATURA

1. Vinko Tomas, Ivica Šegulja, Marko Valčić: Osnove automatizacije; Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka 2018.
2. Tugomir Šurina: Automatska regulacija, Školska knjiga, Zagreb 2001.
3. Juraj Božičević: Temelji automatike 1 i 2, Školska knjiga, Zagreb 1992.
4. Perić, N.; Petrović, I.: Automatizacija postrojenja i procesa, FER, Zagreb, 2005.
5. Kuzmanic, I.: Automatizacija broda, Pomorski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2005.
6. Hrvatski registar brodova: Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, dio 13 – Automatizacija, Split, 2022.
7. Antonić R.: Automatizacija broda II, Pomorski fakultet u Splitu, 2005.
8. Smith, C.; Armando, A.; Corripio, B.: Principles and practice od automatic process control, John Wiley & Sons, Inc.,2005.
9. Perić, N.: Automatsko upravljanje - predavanja; skripta, Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, 2015.
10. www.ad.siemens.de ("Automation and Basic of Control Components"), travanj 2022.
11. Matika, D.; Brnobić, D.: Osnove regulacijske tehnike, skripta, Tehnički fakultet Rijeka, 2004.
12. www.wikipedia.org, siječanj 2022.