

AUTOMATSKO VOĐENJE PROCESA

Sadržaj:

1. Uvod u automatiku	5
1.1. Uvod	5
1.2. Pojam automatike i automatizacije.....	5
1.3. Stupnjevi automatizacije u industriji.....	6
1.3.1. Stupnjevi razvoja proizvodnje.....	6
1.3.2. Stupnjevi razvoja automatizacije.....	6
1.4. Upravljanje i regulacija	7
1.5. Otvoreni i zatvoreni automatski sustavi.....	7
1.5.1. Otvoreni automatski sustavi	8
1.5.1.1. Otvoreni sustav s koračnim motorom.....	8
1.5.1.2. Jednofazni diodni punovalni ispravljač bez stabilizacije napona	9
1.5.2. Zatvoreni automatski sustavi.....	9
1.5.2.1. Zatvoreni sustav s koračnim motorom	10
1.5.2.2. Jednofazni diodni punovalni ispravljač sa stabilizacijom napona.....	11
1.6. Osnovne jedinice regulacijskih krugova.....	11
1.6.1. Objekt upravljanja ili regulirani proces	12
1.6.2. Mjerni slogovi, mjerna osjetila i mjerni pretvornici.....	12
1.6.3. Komparatori ili usporednici	12
1.6.4. Regulatori	12
1.6.5. Izvršni slogovi, postavni motori i postavne sprave	13
2. Procesna mjerenja	14
2.1. Mjerni slogovi.....	14
2.1.1. Mjerna osjetila	15
2.1.2. Mjerni pretvornici	15
2.1.3. Osnovne karakteristike mjernih slogova.....	16
2.1.3.1. Ulazne karakteristike	16
2.1.3.2. Izlazne karakteristike	17
2.1.3.3. Statičke karakteristike	18
2.1.3.4. Dinamičke karakteristike.....	19
2.1.3.4.1. Standardni signali za snimanje dinamičkih karakteristika.....	20
2.1.3.4.2. Prijelazne karakteristike.....	21
2.1.3.4.3. Frekvencijske karakteristike	24
2.2. Pretvornici pomaka	26
2.2.1. Otpornički pretvornici pomaka.....	26
2.2.2. Kapacitivni pretvornici pomaka	26
2.2.3. Induktivni pretvornici pomaka	27
2.3. Pretvornici brzine vrtnje.....	28
2.3.1. Generatorski pretvornici brzine vrtnje	28
2.3.2. Impulsni pretvornici brzine vrtnje.....	29
2.4. Pretvornici sile i naprezanja	30
2.4.1. Otpornički pretvornici sile.....	30
Ugljeni pretvornici sile	30
Pretvornici sile s rasteznim osjetilima	31
2.4.2. Induktivni pretvornici sile	31
2.4.3. Kapacitivni pretvornici sile.....	32
2.4.4. Piezoelektrični pretvornici sile	32
2.5. Pretvornici tlaka	32
2.5.1. Tekućinski pretvornici tlaka.....	33
2.5.2. Deformacijski pretvornici tlaka	34
Pretvornici tlaka s membranom.....	34
Pretvornici tlaka s mijehom.....	34
2.5.3. Mehaničko-električni pretvornici tlaka	34
Otpornički pretvornici	34

Induktivni pretvornici	35
2.6. Pretvornici razine tekućine	35
2.6.1. Kapacitivni pretvornici razine tekućine	35
2.6.2. Ultrazvučni pretvornici razine tekućine	36
2.7. Pretvornici protoka	36
2.7.1. Turbinski pretvornici protoka	37
2.7.2. Rotacijski pretvornici protoka	37
2.7.3. Induktivni pretvornici protoka	37
2.7.4. Ultrazvučni pretvornici protoka	38
2.8. Pretvornici temperature	38
2.8.1. Dilatacijski pretvornici temperature	39
Bimetalni pretvornici	39
Tekućinski pretvornici temperature	39
2.8.2. Otpornički pretvornici temperature	40
2.8.3. Termoelektrični pretvornici temperature	42
2.9. Pretvornici mjernih signala u standardizirana mjerna područja	42
3. Regulatori i krugovi automatske regulacije	43
3.1. Osnovni pojmovi o regulacijskim krugovima	43
3.2. Prijenosne funkcije	44
3.3. Blokovska algebra	45
3.3.1. Serijski spoj	46
3.3.2. Paralelni spoj	46
3.3.3. Spoj s povratnom vezom	47
3.3.4. Pravila transformacije shema	47
3.3.5. Primjeri transformacije shema	48
3.4. Osnovne vrste regulatora	53
3.4.1. Regulatori s kontinuiranim djelovanjem	54
3.4.1.1. P- regulator	54
3.4.1.2. I- regulator	56
3.4.1.3. PI- regulator	57
3.4.1.4. PD - regulator	59
3.4.1.5. PID – regulator	60
3.4.2. Regulatori s diskretnim djelovanjem	61
3.4.2.1. Relejni regulatori	61
Dvopoložajni regulatori	62
3.4.2.2. Digitalni regulatori	64
3.5. Točnost zatvorenih regulacijskih krugova	65
3.5.1. Statička točnost	65
3.5.2. Dinamička točnost	65
3.6. Stabilnost zatvorenih regulacijskih krugova	66
4. Daljinsko mjerenje i upravljanje	68
4.1. Vodovi i prijenosnici za daljinsko mjerenje i upravljanje	68
4.2. Vrste daljinskog prijenosa	69
4.2.1. Daljinski prijenos analognih signala	69
4.2.2. Daljinski prijenos impulsnih signala	71
4.2.3. Daljinski prijenos digitalnih signala	72
4.2.3.1. Načini prijenosa digitalnih signala	72
4.2.3.2. Vrste prijenosa digitalnih signala	73
4.3. Primjer analognog daljinskog mjerenja	74
5. Regulacijska pojačala i izvršni slogovi	75
5.1. Izvršni ili postavni motori	76
5.1.1. Pneumatski postavni motori	76
5.1.2. Hidraulički postavni motori	77
5.1.3. Električni postavni motori	78
5.1.3.1. Istosmjerni kolektorski motori	78

5.1.3.2.	Trofazni izmjenični asinkroni motori	80
5.1.3.3.	Izmjenični sinkroni motori.....	82
	Mali sinkroni motori.....	82
5.1.3.4.	Koračni motori	83
	Koračni motori s linijskim pomakom.....	84
5.2.	Izvršne ili postavne sprave.....	85
5.2.1.	Regulacijski ventili.....	85
5.2.2.	Zasuni.....	86
5.2.3.	Regulacijske zaklopke	86
5.2.4.	Elektromagnetski ventili	86

1. Uvod u automatiku

1.1. Uvod

Još od davne prošlosti, pri obavljanju teških fizički poslova, čovjek je nastojao da energiju svojih mišića zamjeni nekom energijom većeg potencijala iz prirodnih izvora.

U srednjem vijeku se značajno koristila energija vjetra i vode (mlinovi, vjetrenjače i sl.). Međutim, intenzivan razvoj automatizacije procesa proizvodnje otpočinje sa pronalaskom parnog stroja (krajem 18. stoljeća) čime započinje era tzv. industrijske revolucije. Proizvodni procesi postajali su sve složeniji i brži pa čovjek nije više bio u stanju da ih ručno kontrolira; da donosi upravljačke odluke i da neposredno utječe na proces. Zbog toga je bilo neophodno izraditi takva tehnička sredstva koja će djelomično ili u potpunosti preuzeti navedene čovjekove funkcije i obavljati sa većom brzinom i preciznošću. Tako dolazi do pojave upravljački sustava, tzv. sustava automatskog upravljanja koji svoje funkcije obavljaju automatski – bez neposrednog učešća čovjeka. Automatizacija se danas veoma brzo razvija i nalazi sve širu primjenu u svim oblastima ljudske djelatnosti. Pri tome se čovjekova uloga podiže sa pozicije neposrednog izvršitelja na poziciju organizatora tj. čovjek organizira rad automatski sustava, projektira ih, realizira, povezuje i koristi. Posebno mjesto i značaj ima teorija automatskog upravljanja i regulacije čije se teoretske i praktične metode mogu koristiti za proučavanje i ispitivanje električnih, elektronskih, mehaničkih, pneumatskih, hidrauličnih i kombiniranih sustava neovisno od njihove fizikalne prirode. Po završetku drugog svjetskog rata dolazi do ubrzanog razvoja i šire primjene sustava automatskog upravljanja, a naročito sa pojavom elektronskih računarskih strojeva (1945 g. ENIAC).

Američki znanstvenik Norbert Wiener, se naročito bavio proučavanjem sličnosti i ponašanja sustava automatskog upravljanja, sa jedne strane, i živi bića sa druge strane i došao do zaključka da poznate metode i principi automatskog upravljanja i prenošenja informacija tehničkim sustavima važe i za žive organizme. Na toj osnovi on je razradio i objavio 1948 godine opću teoriju upravljanja koju je nazvao kibernetika – znanost o upravljanju i toku informacija u živoj i neživoj prirodi. Pojavom kibernetike, automatsko upravljanje je dobilo veliki značaj i mogućnost primjene ne samo u tehničkim sustavima nego i u drugim oblastima kao npr. u ekonomiji, medicini itd.

1.2. Pojam automatike i automatizacije

Pojam automatika dolazi od grčke riječi "automatos" što znači koji se sam događa. Prvobitno je označavao mehanizam pokretan prema nekom pravilu (npr. kretanje raznih figurica na starim satovima i sl.). Danas, pojam **automatika** predstavlja tehničku disciplinu koja se bavi automatizacijom svih tehnoloških procesa. Automatika se bavi općim principima projektiranja i primjene automatski uređaja i sustava koji mogu da izvršavaju svoje osnovne funkcije samostalno bez neposrednog učešća čovjeka.

Automatizacija se može definirati kao smanjenje udjela ljudskog rada u suvremenoj proizvodnji. Čovjek se zamjenjuje ne samo u fizičkom radu već i u funkcijama pamćenja i odlučivanja. Zamjena čovjeka u suvremenom proizvodnom procesu je nužna iz mnogo razloga. Čovjek sporo reagira, brzo se zamara, nije u mogućnosti raditi u lošim i opasnim uvjetima, nije u stanju nadgledati više parametara procesa, nije u mogućnostima donositi odluke u naglim i brzim promjenama proizvodnog procesa, neekonomičan je itd.

Dio kibernetike koji se bavi pitanjima upravljanja strojevima i upravljanje pomoću strojeva, naziva se tehnička kibernetika. Kad se govori o upravljanju strojevima, skoro redovno se misli na automatsko upravljanje pa su danas pojmovi automatika i tehnička kibernetika nazivi za istu tehničku disciplinu.

Automatizacija je uvođenje strojeva (sustava za vođenje) koji zamjenjuju čovjeka pri obavljanju rutinskih umnih poslova. Želi li se neki radni proces automatizirati prije toga se mora mehanizirati (mehanizacija predstavlja uvođenje strojeva koji zamjenjuju ljudski rad).

Automatizacija je dakle smanjenje udjela ljudskog rada u suvremenoj proizvodnji. Čovjek se zamjenjuje ne samo kao izvor snage već i u funkcijama pamćenja i odlučivanja.

1.3. Stupnjevi automatizacije u industriji

Razvoj proizvodnje možemo promatrati dvojako. S jedne strane taj razvoj možemo promatrati kao razvoj društva općenito, a s druge strane to možemo promatrati na nivou tvornice u industrijskom dobu. Ove podjele treba shvatiti uvjetno, jer niti je moguće povući stroge granice između stupnjeva razvoja, niti su se oni u svim dijelovima čovječanstva desile istovremeno.

1.3.1. Stupnjevi razvoja proizvodnje

Tijekom povijesnog razvoja proizvodnje u društvu općenito razlikujemo nekoliko etapa tog razvoja.

1. Primitivni (barbarsko) doba ili doba divljaštva je trajalo od nastanka čovjeka do prije nekih 15 000 godina. Ljudi koriste samo drveni, koštanim i kameni alat. Bavili su se lovom i skupljanjem plodova, a stanovali u pećinama. Još nema poljoprivrede i graditeljstva.

2. Agrarno (poljoprivredno) doba počelo je razvojem poljoprivrede i stočarstva. Kasnije se razvilo i graditeljstvo. Prije 6000 do 7000 godina u Mezopotamiji nastaju prvi gradovi i države. Počinje se obrađivati metal i koristiti kotač. Razvijaju se jednostavni sustavi na pogon vode i vjetra te se počinju iskorištavati životinje za teški fizički rad. Dolazi do razvoja kulture i vrlo značajne podjele rada u društvu.

Sa stajališta proizvodnje vrhunac je manufaktura u Europi u 18. stoljeću. Od 15. do 19. stoljeća značajno se razvijaju prirodne znanosti i tehnika.

3. Industrijsko doba traje od kraja 18. stoljeća. Za proizvodnju u ovom periodu značajna su dva procesa: mehanizacija i automatizacija. Mehanizacija je uvođenje strojeva koji zamjenjuju ljudski tjelesni rad. Automatizacija oslobađa ljude rutinskih umnih poslova. Želi li se neki radni proces automatizirati, prije ga treba mehanizirati. Visoki stupanj automatizacije je robotizacija.

1.3.2. Stupnjevi razvoja automatizacije

Na razini tvornice razlikujemo sljedeće stupnjeve automatizacije.

1. Radnik obavlja sve radne operacije ručno pomoću alata (18. i djelomično 19. stoljeće).
2. U procesu mehanizacije ljudski rad zamjenjuju strojevi. Sve upravljačke funkcije obavlja radnik (19. i početak 20. stoljeća).
3. Uz naprednu mehanizaciju postupno se uvodi i automatizacija radnih operacija. Radnik opslužuje stroj potrebnim materijalima i priborom te upravlja strojem, bavi se unutrašnjim prijevozom te skladištenje proizvoda i sirovina. Ovakva proizvodnja karakteristična je za sredinu 20. stoljeća u razvijenim zemljama, dok je za nerazvijene zemlje karakteristična i danas. Zbog niza nedostataka ljudskog rada ovakva proizvodnja je sve manje konkurentna na svjetskom tržištu.
4. U proizvodnji se uvode računala za praćenje i obradu podataka. Računala se povezuju u sustav sa senzorima (mjernim uređajima) i izvršnim članovima (servomotorima). Umjesto radnika, upravljačku funkciju preuzima računalo. Stroj koji bez radnika obavlja složene radne operacije na inteligentan način zovemo ga robotom. Suvremeni roboti nisu čovjekoliki strojevi, ve su to specijalizirani strojevi za složene radne operacije (npr. zavarivanje karoserija automobila, lakiranje automobila, ispitivanje složenih elektrotehničkih uređaja. U ovakvoj proizvodnji radnici rade na prijevozu, skladištenju, nadzoru i održavanju strojeva.
5. Početkom osamdesetih godina 20. stoljeća razvijaju se fleksibilni proizvodni sustavi. To su sustavi kod kojih se, zamjenom upravljačkog programa, mijenja i proizvodni asortiman. Pojedini strojevi su roboti koji

su u proizvodne lance povezani automatiziranim prijevozom, jer su i prijevozna sredstva roboti. I skladišta sirovina i gotovih proizvoda su robotizirana (regalna skladišta). Računala upravljaju čitavom tvornicom. Ovo vrijedi za komadnu proizvodnju, ali je slično i kod kontinuiranih tehnoloških procesa (npr. rafinerije, prehrambene industrije itd.). Ovakva proizvodnja još nije dominantna ali se teži tome. U ovoj proizvodnji nema radnika osim za vrijeme remonta.

6. Stupanj potpune automatizacije čitave proizvodnje. Ovaj stupanj još nije dostignut ali mu se teži.

I pored pribojavanja mnogih da će, uvođenjem automatizacije u proizvodnju, porasti nezaposlenost to se ne dešava. To pokazuju podaci o nezaposlenosti razvijenih svjetskih zemalja, kod koji je nivo automatizacije proizvodnje najveći (Japan, Švedska, itd.). Viškove radnika nastale automatizacijom preuzimaju druge djelatnosti (uslužne, sportske, kulturne itd.).

1.4. Upravljanje i regulacija

Ako su strojevi, uređaji i pojedina postrojenja, koji učestvuju u proizvodnom procesu, međusobno tako povezane i tehnički opremljene da sami izvršavaju postavljeni zadatak bez neposrednog učešća čovjeka, tada obrazuju automatski sustav.

Automatski uređaji koji su se prvi pojavili, bili su u početnoj fazi relativno prosti i služili su za djelomičnu automatizaciju pojedini funkcija (npr. za automatsko održavanje temperature, pritiska, broja obrtaja itd.). Takvi uređaji nazvani su regulatori.

Regulacija je automatsko održavanje konstantne vrijednost neke fizikalne veličine. Prema tome automatska regulacija označava održavanje neke izlazne veličine nepromijenjenom. Ta izlazna veličina može biti bilo koja fizikalna veličina (mehanička, električna, toplinska itd.). Fizička veličina koja se automatski regulira naziva se regulirana veličina, a uređaj kojim se to postiže naziva se regulatorom.

Na proizvodni proces utječu razni, različiti poremećaji koji se javljaju najčešće u obliku promjena parametara procesa (interni) i u obliku vanjski smetnji. Da bi se proizvodni proces odvijao po unaprijed utvrđenom tijeku potrebno je njime upravljati.

Pod **upravljanjem** se podrazumijeva skup radnji (akcija) kojima se osigurava unaprijed određeni tijek radnog procesa (ili ponašanje nekog objekta) u uvjetima poremećaja, to je skup akcija kojima se djeluje na objekt (proces upravljanja) da bi se ostvario određeni cilj upravljanja.

Pod automatskim upravljanjem podrazumijeva se automatsko ostvarivanje sveukupni djelovanja usmjerenih na održavanje ili poboljšanje funkcioniranja objekta upravljanja u suglasnost sa ciljem upravljanja.

Vođenje je najširi pojam. Vođenje sustava obuhvaća, pored automatskog upravljanja, još i podsustave zaštite, signalizacije i registracije. Vođenje je usko vezano za primjenu računala za upravljanje procesima. Računalo analizira proces, procjenjuje veličinu i brzinu promjena te donosi odluke o korekciji i usmjeravanju procesa.

1.5. Otvoreni i zatvoreni automatski sustavi

Prema načinu međusobnog djelovanja elemenata, sustavi automatskog upravljanja i sustavi automatske regulacije mogu se podijeliti na:

- otvorene automatske sustave i
- zatvorene automatske sustave

Sustav je tvorevina prirodna, društvena tehnička ili mješovita, koja u danoj okolini djeluje samostalno i ima određenu svrhu. Tvorevina je bilo koji skup elemenata koje su u međusobnom odnosu. Međutim, nije svaka tvorevina sustav. Npr. most je tvorevina ali nije sustav, ne djeluje, nepokretan je. Naprotiv pokretni most i

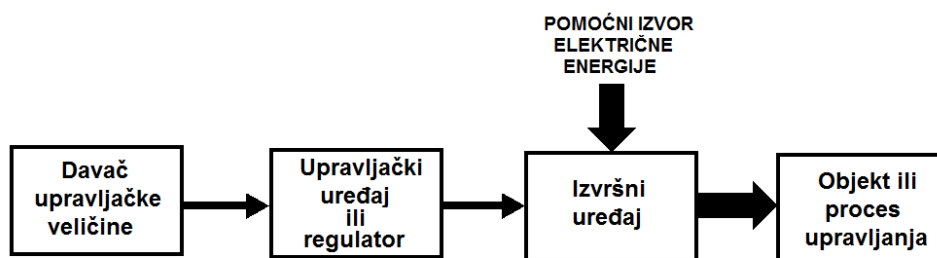
njegov rukovatelj kao cjelina je sustav. Naime, most i čovjek u nekakvom su uzajamnom odnosu, djeluju samostalno sa svrhom i čine sustav. Živa bića čine prirodni sustav. Zajednice ljudi čine društveni sustav. Tehnički sustavi su različite tvorevine: hladnjak, televizor ili elektrana. Mješoviti sustavi su zajednica ljudi i tehničkih tvorevina kao npr. već spomenuti pokretni most i rukovatelj, tvornica, brod s posadom, automobil s vozačem itd.

1.5.1. Otvoreni automatski sustavi

Otvoreni sustav je onaj sustav u kome je upravljanje objektom neovisno o izlaznoj veličini iz sustava. Primjenjuje se u tehničkim uređajima i sustavima koji su sami po sebi stabilni, gdje nema velikih utjecaja smetnji (poremećaja) i gdje se ne traži velika točnost održavanja izlazne veličine.

Otvoreni sustav nema povratne informacije o ostvarenoj naredbi. Povezanost članova sustava je jednosmjerna i usmjerena je od upravljačkog člana preko izvršnog člana na proces upravljanja (sl.1.5.1.). Na slici su veze među elementima prikazane tanjim crtama sa strelicom što označava informacijski tijek u sustavu i debljim crtama sa strelicama označava energetske tijek u sustavu.

Opća blok shema otvorenog automatskog sustava prikazana je na sl.1.5.1. Automatski sustavi imaju za cilj upravljanje objektom ili procesom. Da bi se ostvarilo to upravljanje upravljački signal koji daje neki davač upravljačke veličine dolazi na upravljački uređaj ili regulator koji će formirati signal za izvršni uređaj. Izvršni uređaj upravlja objektom ili procesom. Izvršni uređaj je najčešće uređaj veće snage pa zahtjeva i poseban izvor električne energije.



Sl.1.5.1. Otvoreni automatski sustav

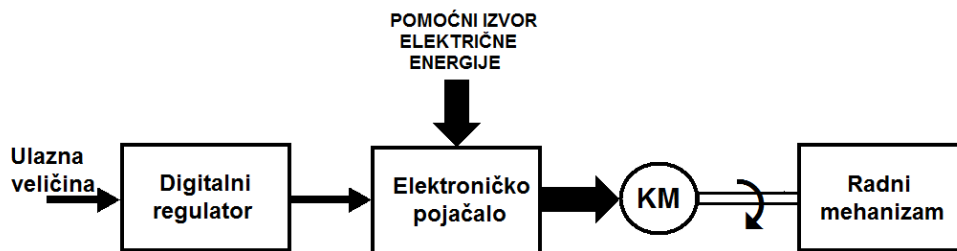
Otvorene sustave susrećemo u području strojarstva (mehanički, hidraulički, pneumatski) ili u području elektrotehnike (regulacija električnih strojeva, nestabilizirani ispravljači, pojačala).

U praksi postoji mnogo primjera za otvorene automatske sustave. Ovdje ćemo spomenuti dva.

1.5.1.1. Otvoreni sustav s koračnim motorom

Ovaj otvoreni sustav je diskretan, radi sa impulsima, a ne sa kontinuiranim (neprekinutim) električnim signalom jer se impulsima upravlja koračni motor. Na ulazu je referentna veličina (električni napon) u digitalnom obliku kojom se određuje vrijednost izlazne veličine (kut zakreta osovine koračnog motora u stupnjevima). U digitalnom regulatoru taj se signal obrađuje i šalje na elektroničko pojačalo gdje se pojačava. Elektroničko pojačalo je izvršni član koji pokreće koračni motor kao objekt upravljanja. Koračni ili step motor je vrsta elektromotora koji radi sa impulsima. Jedan impuls na ulazu koračnog motora zakreće njegovu osovinu za jedan korak. Jedan korak može biti od 0.5° do 120° ovisno o izvedbi koračnog motora. Najčešće je između 5° i 30° . Koračni motori se rade u širokom rasponu snaga od μW do nekoliko kW.

Ulaznu (referentnu) veličinu može zadati čovjek (npr. da na tipkovnici otipka željenu izlaznu veličinu) ili neki uređaj.

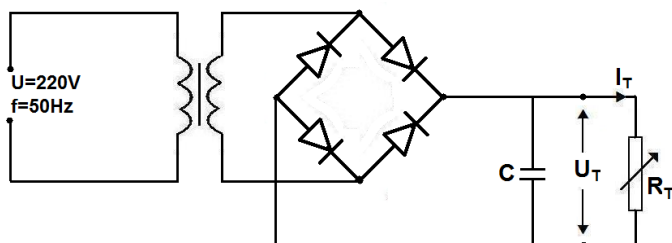


Sl.1.5.2. Otvoreni automatski sustav s koračnim motorom

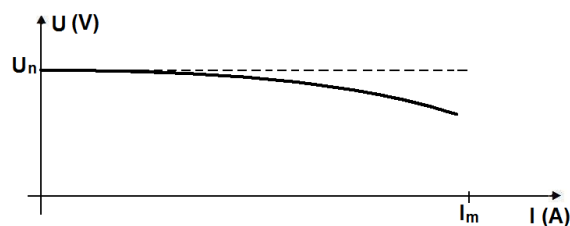
Primjer otvorenih sustava s koračnim motorom su ure (satovi) sa kazaljka, matrični pisači, crtači (ploteri) i sl.

1.5.1.2. Jednofazni diodni punovalni ispravljač bez stabilizacije napona

Ulazni napon je obično napon mreže (220V, 50Hz) koji se transformira na željenu razinu, a zatim punovalno ispravlja Greatzovom spojem te pegla na kondenzatoru (sl.1.5.3.).



Sl.1.5.3. Električna shema punovalnog nestabiliziranog ispravljača



Sl.1.5.4. Statička karakteristika nestabiliziranog ispravljača

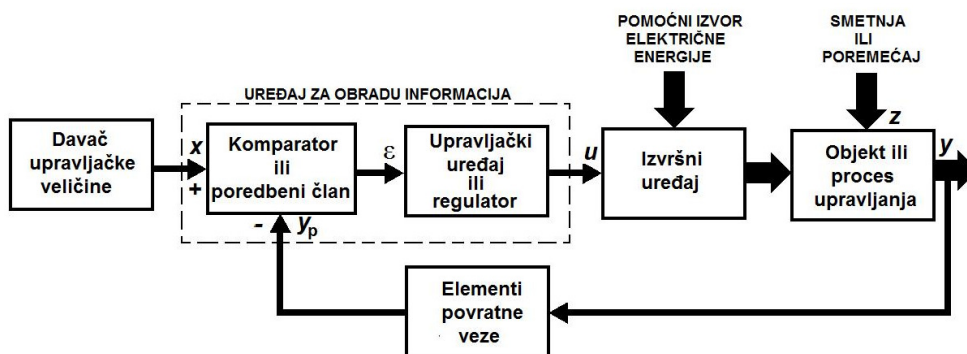
Bitno je uočiti da se promjenom otpora tereta (R_T) mijenja i struja tereta (I_T). Kad bi ispravljač bio idealan, onda bi na njegovom izlazu bio nazivni (nominalni) napon, bez obzira na promjenu otpora tereta, sve do maksimalne dozvoljene struje (I_m) (sl.1.5.4.). Međutim, kod realnih ispravljača dolazi do pada napona s padom otpora trošila, odnosno s porastom struje.

1.5.2. Zatvoreni automatski sustavi

Zatvoreni automatski sustavi krug preko povratne veze dobiva informaciju o izvršenoj naredbi. Izlazna veličina upravljanog objekta ili procesa preko povratne veze vraća u uređaj za obradu informacija tj. na komparator koji uspoređuje ulazni signal (x) davača upravljačke veličine i signala povratne veze (y_p). Izlaz iz komparatora je signal razlike (ϵ) koji dolazi do upravljačkog uređaja gdje se donosi odluka za sljedeći korak upravljanja (sl.1.5.2). Izlazni signal iz upravljačkog uređaja (u) je ulaz izvršnog člana. Ovaj signal upravlja energetske tijekom u sustavu. Energija iz pomoćnog izvora ide u objekt upravljanja pod nadzorom upravljačkog uređaja.

U grani povratne veze nalazi se mjerni član koji mjeri izlaznu veličinu i pretvarač koji tu izmjerenu veličinu pretvori u signal prikladan za obradu u uređaju za obradu informacija.

Objekt upravljanja može biti bilo koji tehnički uređaj ili bilo koji proizvodni proces. Izvršni uređaji su najčešće elektroničko pojačalo s elektromotorima ili elektromagnetskim ventilima. Uređaj za obradu informacija u posljednje vrijeme se izvodi kao programabilni digitalni elektronički uređaj ili mikroračunalo.



SI.1.5.5. Zatvoreni automatski sustav

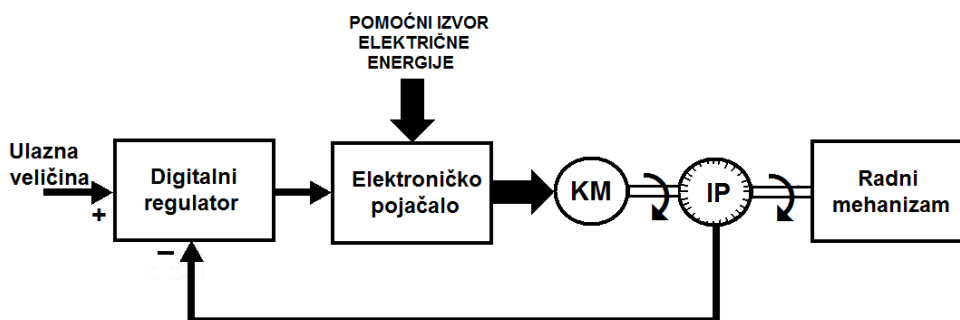
SI.1.5.2. prikazuje opću blok shemu zatvorenog automatskog sustava. Na slici, kao i kod otvorenih upravljačkih krugova, su veze među elementima prikazane tanjim crtama sa strelicom što označava informacijski tijek u sustavu i debljim crtama sa strelicama označava energetski tijek u sustavu.

Ne mora svaki zatvoreni sustav imati sve članove, a ne postoji uvijek mogućnost razdvajanja članova kao na blok shemi. Npr. mikroračunalo (μR) može biti i komparator i regulator.

Povratna veza može biti pozitivna i negativna. U automatici se uvijek koristi negativna povratna veza što se u blokovskoj shemi označava sa minusom na ulazu u komparator. Pozitivnu povratnu vezu imaju samo oscilatori.

1.5.2.1. Zatvoreni sustav s koračnim motorom

Zatvoreni automatski sustav s koračnim motorom ostvaren je povratnom vezom. Ulazna veličina sustava je napon u obliku pravokutnih impulsa zadane frekvencije. Izlazna veličina je zakret osovine motora koji pokreće neki radni mehanizam. Da bi se u digitalnom regulatoru, koji je ujedno komparator i regulator, mogle usporediti ulazna i izlazna veličina, izlaznu veličinu treba pretvoriti u napon u obliku pravokutnih impulsa (kakva je i ulazna veličina). To pretvaranje vrši se u impulsnom pretvaraču (IP) sl.1.5.6.



SI.1.5.6. Zatvoreni automatski sustav s koračnim motorom

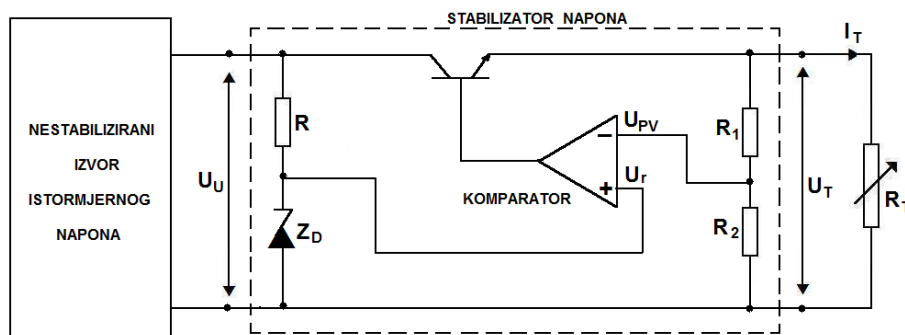
Digitalni regulator je jedinstveni upravljački uređaj za obradu informacija, koji objedinjuje dvije funkcije i komparatora i regulatora. To je mikroračunalo koje se ponekad naziva i kontroler ili mikrokontroler. Izlaz digitalnog regulatora je razlika između ulaznog signala i signala povratne veze. Taj signal se zbog niske energetske razine (obično 5V i nekoliko mW) mora pojačavati u elektroničkom pojačalu snage, osim u slučajevima koračnih motora (KM) male snage.

Prednost ovakvih sustava su velika točnost rada, velika brzina odziva, jednostavnost korištenja i jednostavan upravljački sustav sa zanemarivom potrošnjom energije.

Primjeri korištenja zatvorenog automatskog sustava s koračnim motorom je pogon tvrdog diska kod računala, pogon raznih industrijskih robota, automatskih automobilskih mjenjača itd.

1.5.2.2. Jednofazni diodni punovalni ispravljač sa stabilizacijom napona

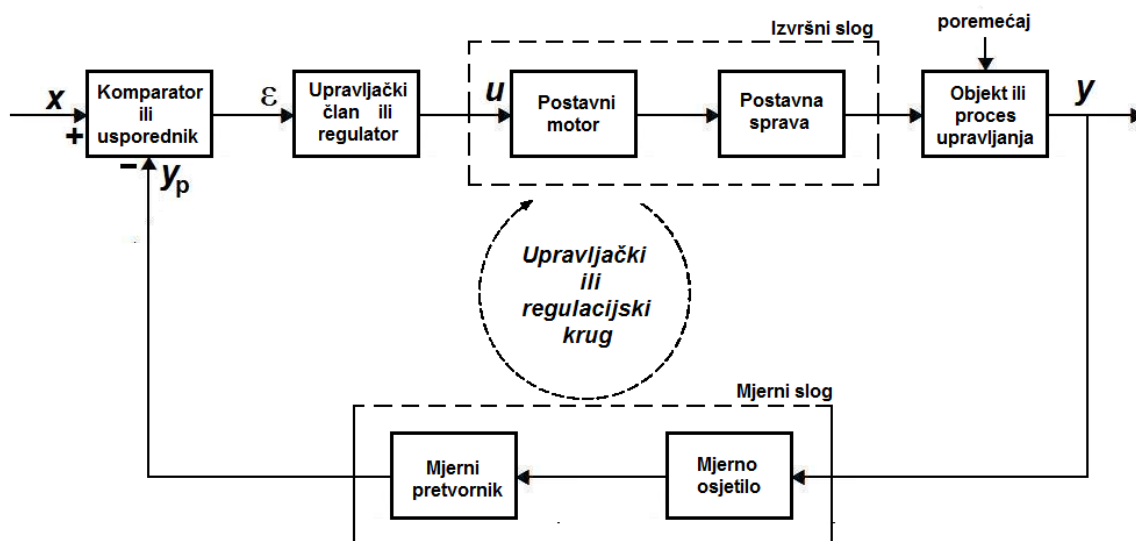
Jednofazni diodni punovalni stabilizirani ispravljač sastoji se od nestabiliziranog izvora istosmjernog napona koji se zatim stabilizira u stabilizatoru napona (sl.1.5.7.). Stabilizator napona čine operacijsko pojačalo (koji ovdje ima ulogu komparatora i pojačala), Zener dioda (Z_D – koja je izvor referentnog napona), serijski vezan tranzistor snage i naponsko dijelilo (otpornici R_1 i R_2).



Sl.1.5.7. Pojednostavljena shema stabiliziranog ispravljača

1.6. Osnovne jedinice regulacijskih krugova

Upravljački (regulacijski) krug može se prikazati na više načina. Krug se može podijeliti na manji ili veći broj osnovnih dijelova, koji se nazivaju jedinicama upravljačkog (regulacijskog) kruga. Primjer jedne takve podjele prikazan je na sl.1.5.8.



Sl.1.5.8. Blok shema upravljačkog (regulacijskog) kruga s glavnim elementima

Upravljački (regulacijski) krug prikazan je s podjelom na sedam osnovnih dijelova ili jedinica:

- objekt upravljanja ili regulirani proces
- mjerna osjetila
- mjerni pretvornici
- komparator (usporednici)
- upravljački uređaj (regulator)

- postavni motor
- postavna sprava

Ovisno o složenosti građe regulacijskih krugova, regulacijski krugovi mogu se dijeliti i na manje ili veći broj osnovnih jedinica. Neke od jedinica mogu se izostaviti. U drugom slučaju neke od jedinica mogu se podijeliti u više dijelova.

1.6.1. Objekt upravljanja ili regulirani proces

Zadatak automatskih sustava je upravljanje objektima ili procesima. Objekt upravljanja može biti bilo koji tehnički uređaj. U prethodnim primjerima spomenuli smo koračni motor i punovalni ispravljač. Regulirani proces ili proces može biti bilo koji tehnički proces. Automatski se može regulirati proces zagrijavanja prostorije, proces protoka tekućine ili plina itd. Poremećaji koji djeluju na proces ili na objekt upravljanja su vanjski poremećaji. Ti poremećaji djeluju na izlaznu (reguliranu, upravljanu) veličinu. Mogu postojati još mnogi utjecaji na proces, kao i na svaku drugu jedinicu promatranog regulacijskog kruga. Na prikazanoj blok shemi prikazan je poremećaj koji djeluje na objekt ili proces upravljanja, međutim, poremećaji (smetnje) u većoj ili manjoj mjeri djeluju na sve elemente regulacijskog kruga.

1.6.2. Mjerni slogovi, mjerna osjetila i mjerni pretvornici

Za bilo kakvo upravljanje (ili vođenje) tehnološkog procesa neophodno je mjerenje upravljanih (ili vođenih) veličina. Zato su među najvažnijim dijelovima regulacijskog kruga **mjerni slogovi**. Mjerni slog čine dva karakteristična dijela: mjerno osjetilo ili senzor i mjerni pretvornik. Zadaća mjernih osjetila i mjernih pretvornika je uzimanje i mjerenje reguliranih veličina te njihov prijenos i pretvorba u druge oblike signala pogodne za nadzor i upravljanje (vođenje) procesa.

Često se sustavima automatske regulacije ne mogu jasno odvojiti dijelovi mjernog sloga, a ponekad nema nekog od ovih dijelova. U promatranom primjeru regulacijskog kruga stabiliziranog ispravljača signal povratne veze skida se s naponskog dijelila i kako je to električni napon, kao i ulazni signal nema potrebe za njegovim pretvaranjem u drugi oblik signala. U primjeru s koračnim motorom izlazna veličina je zakret osovine motora, a ulazni signal je impulsni napon pa je tu prvo potrebno mjerno osjetilo koje će registrirati taj zakret, a zatim taj zakret pretvoriti u impulsni napon. U blok shemi je to objedinjeno u impulsnom pretvorniku.

1.6.3. Komparatori ili usporednici

Komparatori ili usporednici (sklopovi za uspoređivanje) su karakteristični dijelovi regulacijskih krugova čiji je zadatak uspoređivanje stvarne (y_p) i željene vrijednosti regulirane veličine (x). Komparatori, zapravo izvode jednostavne računske operacije zbrajanja ili oduzimanja stvarne vrijednosti izlazne (y_p) i željene vrijednosti regulirane veličine (x), odnosno regulacijsko odstupanje ($\varepsilon = x - y_p$). Predznak regulacijskog odstupanja je jednak predznaku veće vrijednosti, odnosno željene ili stvarne vrijednosti regulirane veličine.

1.6.4. Regulatori

Regulator je važan, a vrlo često i najsloženiji element automatske regulacije, odnosno sustava automatskog vođenja procesa. Glavna zadaća regulatora je da na svako regulacijsko odstupanje preko postavnog motora i postavne sprave djeluje na objekt ili proces upravljanja tako da reguliranu veličinu ponovo dovede u zadanu (željenu) vrijednost. Predznak regulacijskog odstupanja je vrlo važan. O njemu ovisi način djelovanja postavne sprave. Regulatori se grade u mnogo različitih izvedbi a mogu biti: mehanički, pneumatski i hidraulički, električna ili kombinirana regulacijska pojačala kojima se signal regulacijskih odstupanja pojačava na optimalnu vrijednost potrebnu za brzo pokretanje izvršnih dijelova regulacijskog kruga. Uz pojačavanje signala regulatori određuju i djelovanja postavnih motora i postavnih sprava.

1.6.5. Izvršni slogovi, postavni motori i postavne sprave

Izvršni dijelovi (slogovi) sustava automatskog upravljanja jesu **postavni motori i postavne sprave**. Postavni ili izvršni motor pokreću postavnu spravu. Izrađuju se u više vrsta i izvedbi. Osnovne vrste izvršnih motora su mehanički, pneumatski ili hidraulički motori, električni i kombinirani. Ulazne veličine također mogu biti različite, a najčešće je to električni signal, te pneumatski ili hidraulički signal. Izlazne veličine postavnih motora najčešće su mehanički pomak, snaga i rad kojom izvršni motor pokreće postavni uređaj regulacijskog kruga.

Postavne sprave kao važan dio regulacijskog kruga i kroz njih najčešće prolazi postavna struja energije ili materije. Postavne sprave su različite vrste ventila, sklopki itd.

2. Procesna mjerenja

Mjerenja, općenito, vezana su uz ljudski rad, pa povijest mjerenja započinje sa poviješću ljudskog rada.

Mjerenje je eksperimentalni postupak usporedbe neke mjerene fizikalne veličine s nekim odabranim jediničnim iznosom iste fizikalne veličine.

Postupom mjerenja dobivaju se informacije o stanju, odnosno fizičkim i kemijskim karakteristikama promatranog procesa ili sustava. Mjerenja služe u svrhu promatranja, vođenja ili eksperimentalnog istraživanja i analize procesa.

Mjerenje u svrhu promatranja procesa izvode se onda kada se žele dobiti podaci o stanju procesa, a ti se podaci ne koriste za njegovo vođenje. Na primjer vodomjer i električno brojilo u domaćinstvu ne služe za reguliranje potrošnje, nego samo za njezin obračun.

Mjerenje u svrhu vođenja procesa izvodi se ako da se rezultati mjerenja koriste kao informacija u sustavu vođenja ili reguliranja. Npr. mjerenje temperature u bojleru izvodi se pomoću bimetalnog termometra, a taj podatak koristi se za održavanje zadane temperature vode.

Eksperimentalna mjerenja izvode se u svrhu znanstvenih i tehničkih zadataka, a ti se podaci koriste pri analizi procesa s ciljem optimizacije procesa.

Premda čovjek ima pet osjetila, jedino osjetilo vida najviše primjenjuje za mjerenjima. Opažanje duljine je jedan od podražaja, pa se okom zadovoljavajuće dobro može odrediti višestruka daljina ili polovica duljine. Međutim postoje veličine koje se ne mogu izravno motriti osjetilom vida, npr. električna struja, sila, tlak, jakost magnetskog polja itd. Da bismo ih mjerili potrebno je raspolagati određenim napravama, koje će ih učiniti motrivim. Kaže se da ih je potrebno vizualizirati.

Tako su razvijene brojne naprave i instrumenti pomoću kojih se mjerne veličine iskazuju duljinom, npr. stakleni termometar, barometar, galvanometar itd. Razvijeni su zatim i instrumenti u kojima se promjene mjerene veličine pretvara u brojčanu vrijednost. Na ovom su načelu izvedeni digitalni instrumenti.

2.1. Mjerni slogovi

Mjerenja se izvode pomoću mjernih slogova ili mjernih uređaja koji se ovisno o izvedbi i namjeni nazivaju mjerilo, brojilo, mjerni instrument itd. Na sl.2.1. prikazana je mogući opći prikaz pojedinih jedinica mjernog sloga, mjernog uređaja ili mjernog instrumenta. Karakteristični dijelovi ovih mjernih slogova su:

- mjereno osjetilo (MO)
- mjerni pretvornik primarne u sekundarnu neelektrične veličinu (MP I)
- mjerni pretvornik sekundarne neelektrične u električnu veličinu (MP II)
- prijenosni slog (PS)
- slog za iskazivanje vrijednosti mjerne veličine (SI)

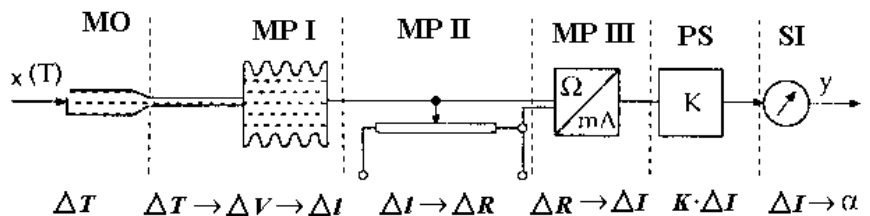


Sl.2.1. Mjerni slog

2.1.1. Mjerna osjetila

Mjerna osjetila dolaze u posredan ili neposredan doticaj s materijom kojoj mjerimo karakterističnu mjernu veličinu. Mjerno osjetilo prima osnovni signal mjerene veličine i taj signal, s istom vrstom energije daje na svom izlazu. Za mjerno osjetilo je karakteristično da ne pretvara mjerni signal iz jednog u drugi oblik energije. Mjerno osjetilo troši energiju mjerene veličine. To trošenje energije mora biti minimalno, kako bi se održala potrebna točnost mjerenja i osigurala brzina prijenosa mjernog signala.

Jednostavan primjer izvedbe mjernog osjetila je lukovica plinskog termometra sl.2.2, koja se postavlja u odabrano mjerno mjesto, gdje se želi mjeriti temperatura. Na tom mjernom mjestu lukovica uzima toplinsku energiju od mjerene materije i postiže njenu temperaturu. Na taj se način energija mjerenog signala $x(T)$ s nepromijenjenom vrstom energije pomoću mjernog osjetila prenosi od mjernog mjesta do ulaza u pretvornik.



SL.2.2. Načelna shema mjernog sloga za mjerenje temperature

2.1.2. Mjerni pretvornici

Mjerni pretvornici pretvaraju signale mjerenih veličina iz jednog u drugi oblik energije. To pretvaranje jednog mjernog sloga može biti višestruko, ovisno o tome na koji se način mjerni signal želi koristiti. Radi toga mjerne pretvornike možemo podijeliti u dvije grupe:

- pretvornici primarne u sekundarnu neelektričnu veličinu
- pretvornici sekundarne neelektrične u električnu veličinu

Pretvornici obiju ovih grupa mogu biti:

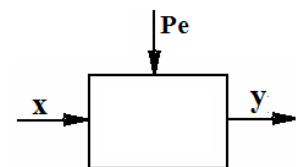
- aktivni i
- pasivni

Aktivni pretvornici sl.2.3. daju izlazne signale (y) na temelju samih ulaznih signala (x) i njihove energije.



SL.2.3. Blok shema aktivnog pretvornika

Pasivni pretvornici osim energije ulaznih signala trebaju i pomoćnu energiju (P_e) na temelju koje daju izlazne signale sl.2.4.



SL.2.4. Blok shema pasivnog pretvornika

Pretvornici primarne u sekundarnu neelektričnu veličinu izvode se tako da signal neelektrične veličine (x) pretvore u analogni signal (M) druge vrste energije koja nije električna.

Primjer izvedbe takvog pretvornika je mijeh iz mjernog sloga sa sl.2.2. Na njemu mjerena temperatura smanjuje ili povećava volumen plina, a svaka promjena volumena mijeha izaziva pomak prijenosne poluge na čijem je kraju učvršćen klizač potencijometra.

Ove pretvornike nazivamo i pretvornici neelektričnih u osnovne neelektrične veličine. Ima mnogo vrsta ovih pretvornika. Jedna nepotpuna klasifikacija primarnih i sekundarnih neelektričnih veličina prikazana je u sljedećoj tablici.

Primarne neelektrične veličine (M)	Sekundarne neelektrične veličine (Mo)
put, brzina, ubrzanje, razina, hrapavost površine, sila, tlak, tvrdoća, mehaničko naprezanje, moment naprezanja ..	pravocrti pomak (l) kutni pomak (α)
protok, vibracije, šum, brzina vrtnje, udarci, ubrzanje, moment inercije ...	brzina gibanja (v) kutna brzina (ω)
težina, gustoća, mehaničko naprezanje, zakretni moment, vibracije, tlak, protok ...	sila (F), tlak (p)
količina topline, toplinske radijacije, tlak, protok, brzina strujanja plinova ...	temperatura (T, ϑ)
svjetlosni tok, tlak, mehaničko naprezanje, sila, zakretni moment ...	jakost svjetla (L)
frekvencija, broj impulsa ...	vrijeme (t)

Iz tablice se vidi, da se mnoge neelektrične veličine mogu pretvoriti u njihove sekundarne analogne vrijednosti na više načina. Npr. neelektrična veličina tlak može se pretvoriti u neelektričnu sekundarnu veličinu pomak, silu, temperaturu, jakost svjetlosti itd.

Pretvornici sekundarnih neelektričnih u električne veličine pretvaraju signale neelektričnih veličina u analogne električne, najčešće u napon ili struju. I ovi pretvornici mogu biti izvode u više stupnjeva.

2.1.3. Osnovne karakteristike mjernih slogova

Da bismo mogli pobliže opisati mjerno područje, vladanje i uvjete primjene mjernih pretvornika, definiramo određene karakteristike prema kojim ih onda ocjenjujemo i primjenjujemo. Karakteristike mjernih slogova svrstat ćemo u ove skupine:

- ulazne karakteristike
- izlazne karakteristike
- statičke karakteristike
- dinamičke karakteristike
 - prijelazne karakteristike
 - frekvencijske karakteristike

2.1.3.1. Ulazne karakteristike

Ulazne karakteristike mjernih slogova su:

- mjerna veličina,
- mjerno područje i
- mjerni opseg.

Mjerna veličina je veličina što je treba osjećati i pretvoriti u mjerni signal. Primjeri mjernih veličina su: temperatura, sila, svjetlost, napon, brzina, vlažnost, gustoća, protok, ubrzanje itd. Mjerena veličina je ulazna veličina ili ulaz mjernog sloga.

Mjerno područje obuhvaća vrijednost mjerene veličine za koje se dani mjerni slog može upotrijebiti. Izražava se pomoću najmanje i najveće vrijednosti mjerne veličine.

Mjerni opseg je razlika vrijednosti veličina na gornjoj i donjoj granici mjernog područja. Uzmimo za primjer mjerni pretvornik temperature kojemu je mjerno područje -50°C do $+150^{\circ}\text{C}$. Temperatura -50°C je donja granica područja, a temperatura $+150^{\circ}\text{C}$ je gornja granica područja. Mjerni opseg ovog pretvornika je 200°C .

2.1.3.2. Izlazne karakteristike

Izlazne karakteristike mjernih slogova su:

- mjerni signal,
- područje mjernog signala,
- vrsta mjernog signala i
- izlazna impedancija

Mjernim signalom nazivamo izlaznu veličinu mjernog pretvarača. Mjerni signal može biti kontinuirano promjenljiva veličina ili diskretna veličina, a kad je ta diskretna veličina iskazana u brojčanom obliku naziva se digitalna veličina. Ovisno o tome kakav je mjerni signal i mjerne pretvornike nazivamo analognim (one kod kojih je mjerni signal kontinuiran) ili digitalnim (one kod kojih je mjerni signal digitalan).

Područje mjernog signala obuhvaća vrijednosti mjernog signala za određeni uređaj. Područje mjernog signala je standardizirano, tako različiti proizvođači nude mjerne pretvornike s podudarnim područjem mjernog signala ili skraćeno rečeno s podudarnim izlazom. Ta područja za električne veličine su:

- strujni električni mjerni signali: 0 do 1mA, 0 do 5mA, 0 do 20mA, 4 do 20mA ili 0 do 50mA;
- naponski električni mjerni signali: 0 do 1mV, 0 do 15mV, 0 do 100mV ili 0 do 3V.

Tako standardizirani područja mjernog signala prilagođena su s ulazima svih različitih uređaja za postupanje signalima, ulazima pokaznih instrumenata, zapisnih sprava itd. (npr. ulazna pojačala, regulatora, ampermetara, voltmetara, pisača itd.).

Izlazna impedancija opisuje ponašanje mjernog pretvornika kada je povezan sa sklopovima u mjernom lancu. Kada je mjerni signal istosmjerni električni napon, onda je izlazna impedancija izlazni električni otpor mjernog pretvornika. Na primjeru takvog pretvornika prikazat ćemo utjecaj izlazne impedancije na mjerni signal (sl.2.5.).

U promatranom primjeru idealna vrijednost mjernog signala označena je sa U_i , izlazni otpor sa R_i i otpor tereta sa R_T . Stvarna vrijednost naponskog mjernog signala označena je sa U , a strujnog mjernog signala sa I . Zavisnost vrijednosti U i I od vrijednosti U_i lako je odrediti Kirchhoffovim zakonom za promatrani krug

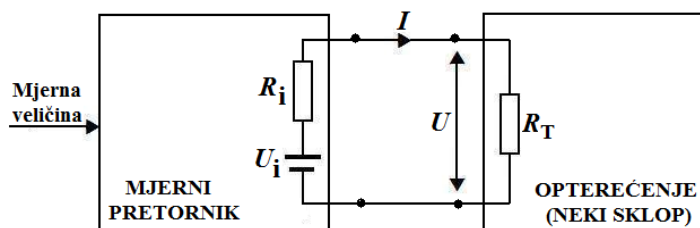
$$U_i - IR_i - IR_T = 0$$

pa za strujni mjerni signal vrijedi

$$I = \frac{1}{R_i + R_T} U_i \quad (1)$$

a za naponski mjerni signal

$$U = IR_T = \frac{R_T}{R_i + R_T} U_i \quad (2)$$



Sl. 2.5. Pojednostavljeni prikaz izlazne impedancije

Lako je uočiti da stvarna vrijednost mjernog signala u odnosu na idealni ovisi od izlaznog otpora (ili izlazne impedancije). Najpovoljnije bi bilo ostvariti takve vrijednosti R_i da pretvornik s naponskim mjernim signalom daje $U \approx U_i$, a pretvornik s strujnim mjernim signalom $I \approx \frac{1}{R_i} U_i$.

Prema ovome se usklađuju izlazne impedancije mjernih pretvornika.

U slučaju naponskog mjernog signala, preuredimo li izraz (2) dobijemo

$$U = \frac{1}{\frac{R_i}{R_T} + 1} U_i$$

Želimo li da je $U \approx U_i$, tada mora biti $\frac{R_i}{R_T} \ll 1$, što znači da izlazna impedancija mora biti mnogo manja od impedancije tereta. Kada je to tako, pretvornik se vlada kao **naponski izvor**.

U slučaju strujnog mjernog signala, preuredimo li izraz (1) dobijemo

$$I = \frac{\frac{1}{R_i}}{\frac{R_T}{R_i} + 1} U_i$$

Želimo li da je $I \approx \frac{1}{R_i} U_i$, tada mora biti $\frac{R_T}{R_i} \ll 1$, što znači da izlazna impedancija mora biti mnogo veća od impedancije tereta. Kada je to tako, pretvornik se vlada kao **strujni izvor**.

Moguće je i takvo usklađivanje u kojem pretvornik omogućuje prijenos najviše snage na idući stupanj. Takvo usklađivanje postiže se takvim izborom opterećenja da je $R_T = R_i$.

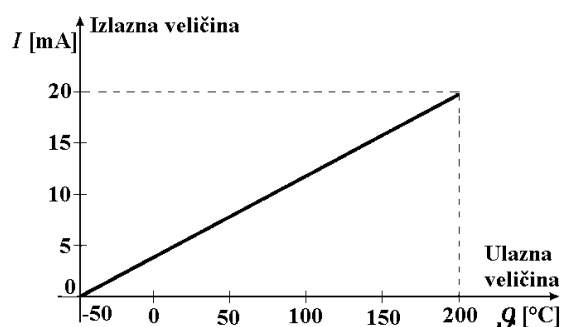
2.1.3.3. Statičke karakteristike

Statička karakteristika predstavlja odnos mjerenog signala (izlazne veličine mjernog pretvornika) i mjerene veličine (ulazne veličine mjernog pretvornika). Obično se prikazuje grafički unutar granica mjernog područja (sl. 2.6.).

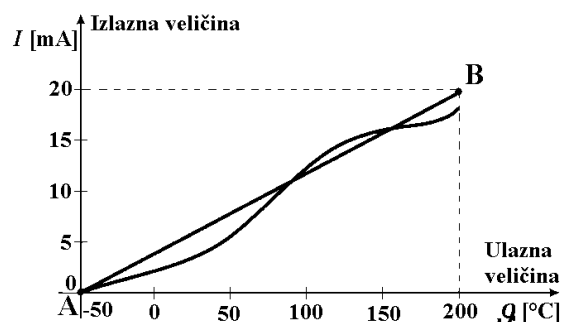
Idealna statička karakteristika je linearna. Izlazna veličina takvog pretvornika odgovarala bi po obliku i vrijednostima ulaznoj veličini. Idealna karakteristika bi bila da je pretvornik idealno zamišljen i da je izveden od idealnih materijala. Međutim, u praksi dolazi do različitih odstupanja.

Stvarna se statička karakteristika određuje eksperimentom. Postupak određivanja statičke karakteristike naziva se baždarenje (umjeravanje), a upotrebljava se i pojam kalibriranje.

Iz oblika statičke karakteristike zaključuje se da li je zavisnost izlazne i ulazne veličine linearna ili nelinearna, a određuju se i druge osobine pretvornika: ponovljivost, razlučivost, osjetni prag, histereza itd.



Sl.2.6. Statička karakteristika



Sl.2.7. Nelinearnost statičke karakteristike

Linearnost

Većina mjernih pretvornika izvedena je tako da im je statička karakteristika linearna tj. pravac. Teorijski to je pravac koji prolazi krajnjim točkama mjernog područja (sl. 2.7. točke A i B). Blizina stvarne statičke karakteristike tom pravcu je linearnost.

Ako je statička karakteristika mjernog pretvornika nelinearna, tada se pojam linearnosti ne može primijeniti.

Ponovljivost

Mogućnost mjernog pretvornika da daje jednake vrijednosti izlazne veličine pri uzastopnim mjerenjima iste vrijednosti u konstantnim radnim uvjetima označuje se kao ponovljivost.

Ponovljivost se izražava kao najveće razlika vrijednosti izlaznih veličina pri stalnoj vrijednosti ulazne veličine unutar mjernog područja. Ponovljivost je prikazana na sl.2.8.

Histereza

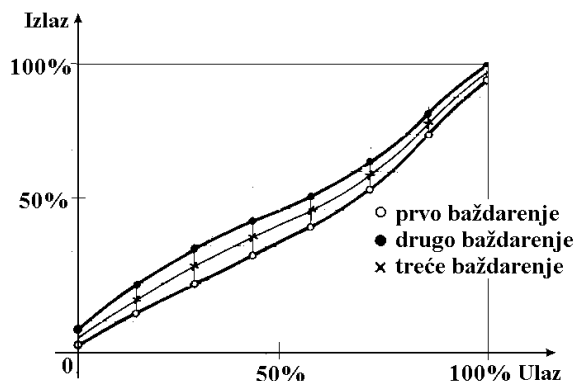
Mjeri li se vrijednost izlazne veličine tako da ulazna veličina najprije raste, a zatim se smanjuje, mogu se razlikovati vrijednosti izlazne veličine za iste ulazne veličine. Ta se pojava naziva histerezom. Ovo je nelinearna statička karakteristika. Često je prisutna, a naročito kod feromagneta. Grafički prikaz statičke karakteristike s histerezom je na sl. 2.9.

Razlučivost (rezolucija, razložnost)

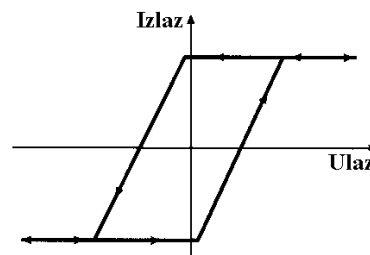
Razlučivost statičke karakteristike je pojava kada se, uz neprekinutu promjenu ulazne veličine, izlazna veličina mijenja u malim koracima (skokovito). Karakterističan primjer za ovo je kod žičanog potencijomatskog pretvornika pomaka s klizačem koji preskače sa žice na žicu. Pojednostavljen grafički prikaz razlučivosti pokazuje slika 2.10.

Osjetni prag

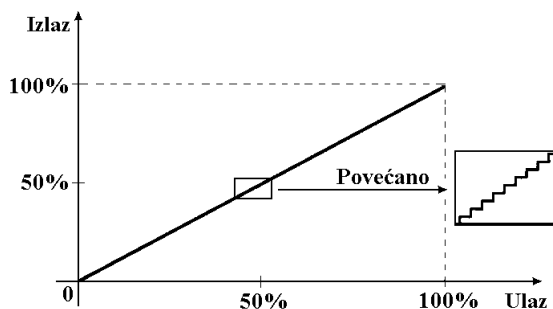
Osjetni prag je najmanja vrijednost promjene mjerene veličine potrebne da se prouzroči mjerljiva promjena izlazne veličine. Izražava se u jedinicama mjerene veličine i može imati različite vrijednosti unutar mjernog područja. Osjetni prag grafički je prikazan na slici 2.11.



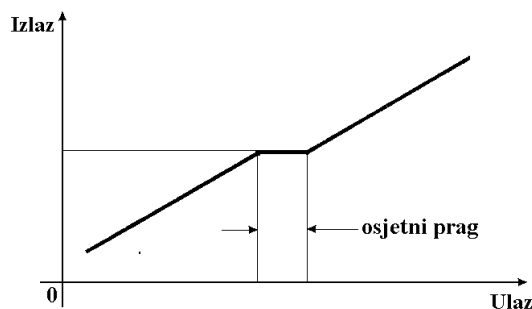
Sl.2.8. Ponovljivost statičke karakteristike



Sl.2.9. Statička karakteristika s histerezom



Sl.2.10. Razlučivost statičke karakteristike



Sl.2.11. Osjetni prag (prikazan je povećano)

2.1.3.4. Dinamičke karakteristike

Dinamičke karakteristike mjernih slogova pokazuju vremensku ovisnost izlazne veličine o promjenama ulazne veličine. One pokazuju ponašanje mjernih slogova u dinamičkom stanju, za vrijeme prijelaznih pojava. Ove se karakteristike prikazuju grafički (sl.2.12.) ili analitički izrazima:

$$y = f[x(t)]$$

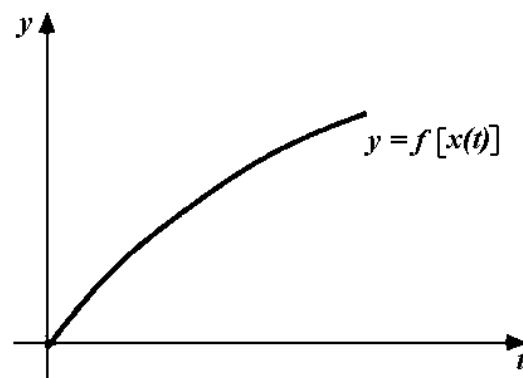
gdje su:

y – izlazna veličina; x – ulazna veličina; t – vrijeme.

Za najveći broj praktičnih izvedbi mjernih slogova spomenuti je izraz manje ili više složene diferencijalne jednačbe, čije je rješavanje složeno i teško, a danas se najčešće izvodi pomoću računala.

Među najvažnije dinamičke karakteristike spadaju:

- prijelazne karakteristike i
- frekvencijske karakteristike.



Sl.2.12. Dinamička karakteristika

Ove se karakteristike određuju matematički i snimaju grafički na različite načine i različitim postupcima.

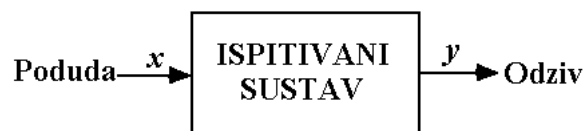
2.1.3.4.1. Standardni signali za snimanje dinamičkih karakteristika

Standardni signali za snimanje karakteristika bilo kojeg sklopa pa time i mjernog pretvornika ponekad se nazivaju: ispitni signali, pobudne funkcije, pobudni signali, pobuda, ulazni signali, ulazne promjene, ulazi. Promjena izlazne veličine koju uzrokuje promjena ulazne veličine naziva se odziv. Na sl. 2.13. prikazan je princip ispitivanja nekog sklopa ili sustava metodom crne kutije.

Ponašanje sustava moglo bi se ispitivati bilo kakvim signalom, ali se ispitni signali standardiziraju da bi se mogli ispitivati različiti uređaji.

Standardne ispitne funkcije su:

- jedinična odskočna funkcija
- jedinični impuls
- nagibna funkcija
- sinusna funkcija



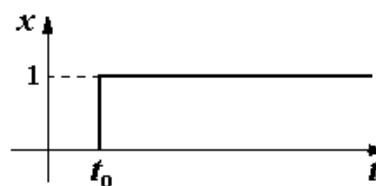
Sl.2.13. Ispitivanje metodom crne kutije

Jedinična odskočna funkcija zove se još i jedinični skok, skokovita funkcija, step funkcija, udarna funkcija i skokovična promjena. Ovo je najznačajnija ispitna funkcija i najčešće se koristi za određivanje dinamike sustava u vremenskoj domeni. To je ujedno i najteža ispitna funkcija za bilo koji sustav, jer u sebi sadrži čitav frekvencijski spektar. Ako sustav daje dobar odziv na odskočnu funkciju onda će davati dobar odziv i na bilo koju drugu funkciju.

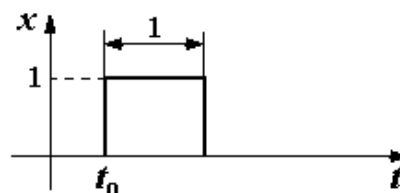
Odziv sustava na odskočnu funkciju naziva se prijelazna pojava (prijelazni proces, prijelazna karakteristika ili prijelazna funkcija). U praksi je odskočna funkcija zatvaranje sklopke.

Jedinični impuls je signal koji ima jediničnu amplitudu i jedinično vrijeme trajanja (sl.2.15.). Ispitivanje pomoću ovih signala izvodi se najčešće u elektroničkim sklopovima. Pomoću njih se mogu ispitivati ostale jedinice i mjerni slogovi kad ih se želi analizirati u djelovanju kod brzih impulsnih djelovanja mjernih signala.

Nagibna funkcija još se naziva i ulazna funkcija. Karakterizira je kontinuirani porast od vrijednosti nula do neke druge vrijednosti (sl.2.16.).



Sl.2.14. Jedinična odskočna funkcija



Sl.2.15. Jedinični impuls

Matematički opis signala je:

$$x = k \cdot t$$

gdje je:

x – vrijednost signala; k – nagib; t – vrijeme porasta.

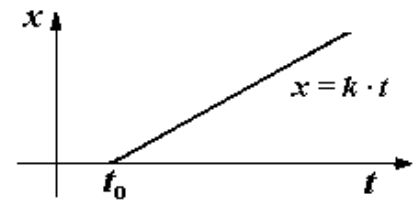
Sinusna funkcija još se naziva i harmonijska ili harmonička pobuda. Ima vrlo široku primjenu. Primjenjuje se najčešće za snimanje frekvencijskih karakteristika.

Matematički se zapisuje funkcijom:

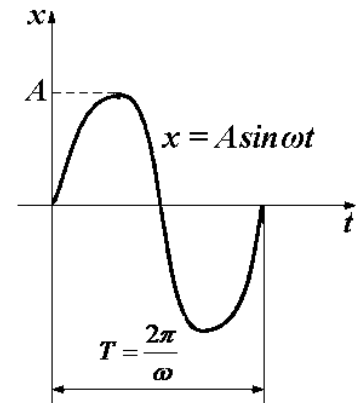
$$x = A \sin \omega t$$

gdje su:

A – amplituda; t – vrijeme; ω – kružna frekvencija i T – period promjene signala.



Sl.2.16. Nagibna funkcija



Sl.2.17. Sinusna funkcija

2.1.3.4.2. Prijelazne karakteristike

Prijelazne karakteristike su vrlo važne u mjerenjima kod automatskog vođenja procesa. Za potrebe snimanja u automatici prijelazne karakteristike najčešće se izvede pomoću odskočne funkcije. Pomoću ove karakteristike se najbolje pokazuje i analizira ponašanje jedinica automatskog vođenja procesa za vrijeme prijelaznih procesa.

Postoji više oblika prijelaznih karakteristika, a ovdje ćemo prikazati samo one najvažnije koje se najčešće susreću u praksi.

Karakteristika nultog reda ili P_0 – karakteristika

Ova karakteristika pokazuje ponašanje jedinica automatske regulacije koje nemaju nikakvo vremensko zadržavanje odskočnog ulaznog signala, a mijenjaju mu samo amplitudu (sl.2.18.), pa njihova prijelazna funkcija ima oblik

$$y = K_p \cdot x$$

gdje su:

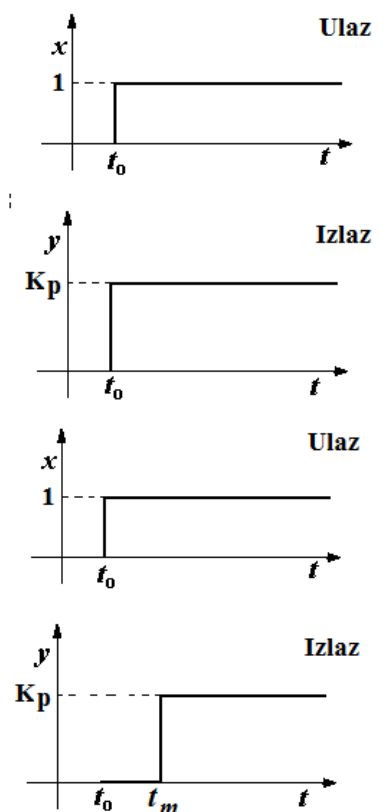
x – ulazni signal, y – izlazni signal, K_p – faktor osjetljivosti ili pojačanje.

Tipični primjeri izvedbe ovih jedinica su: otporničko naponsko djelilo ili potencijometrijski spoj, mehanička poluga, reduktor, itd.

Karakteristično je za ove jedinice da nemaju nikakvu akumulaciju energije.

Karakteristika nultog reda s mrtvim vremenom ili P_{tm} – karakteristika

Ova karakteristika pokazuje dinamičko djelovanje jedinica automatske regulacije koje imaju određeni vrijeme zadržavanja (t_m) odskočnog ulaznog signala, koje se naziva mrtvim vremenom (sl.2.19.).



Sl.2.19. P_{tm} - karakteristika

Primjer izvedbe ove jedinice je relej, gdje je mrtvo vrijeme ono vrijeme uključivanja releja.

Bez obzira što se ponekad ovakva svojstva jedinica mogu ponekad zanemariti, većina realnih izvedbi jedinica nultog reda ima ovakvu karakteristiku.

Karakteristika prvog reda ili P_1 – karakteristika

Jedinice koje imaju jedno spremište energije ili materije nazivamo sustavima prvog reda. Izlazna veličina ovakvih sustava na odskočnu funkciju teži nekoj konačnoj vrijednosti po eksponencijalnom zakonu (sl.2.20.). Prijelazna funkcija ima oblik

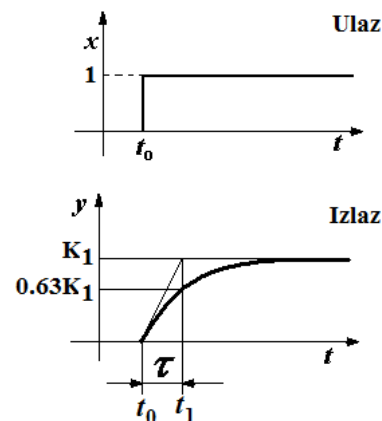
$$y = K_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \cdot x$$

gdje su:

x – ulazna veličina, y – izlazna veličina, t – vrijeme, τ – vremenska konstanta i $e = 2.718$ – baza prirodnog logaritma.

Vremenska konstanta je ono vrijeme koje je potrebno da izlazna veličina dostigne 63% svoje konačne vrijednosti.

Na prijelaznoj karakteristici vremenska konstanta se može odrediti i grafički tako da se u točki t_0 povuče tangenta, pa iz točke gdje ona siječe liniju maksimalne vrijednosti spusti okomica na vremensku os. Vremenski razmak $t_1 - t_0$ jednak je vremenskoj konstanti.



Sl.2.20. P_1 - karakteristika

Primjeri izvedbe ovakvih jedinica su brojni spomenimo samo RC – spoj.

Karakteristika drugog reda ili P_2 – karakteristika

Sustavi drugog reda imaju dva spremišta energije. Dinamika ovih sustava ne može se opisati samo sa jednom veličinom, kao što je to bila vremenska konstanta kod sustava prvog reda. Za opis ove karakteristike potrebno je više parametara, a najvažniji je parametar stupanj prigušenja (ζ).

Za automatiku je proučavanje karakteristike drugog reda od izuzetne važnosti jer se većina sustava višeg reda može svesti na sustav drugog reda. Primjera u praksi za ove sustave je mnogo: Serijski i paralelni RCL – članovi, elektromotori, hidraulički i pneumatski sustavi.

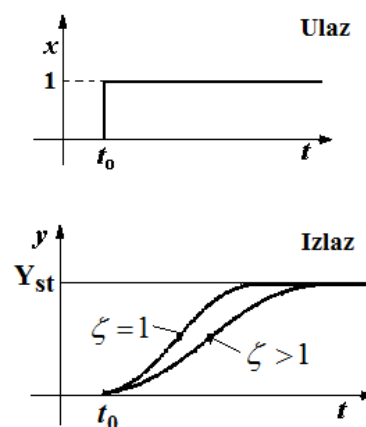
U RCL – članovima može doći do izmjene magnetske energije akumulirane u zavojnici i električne energije akumuliran u kondenzatoru. To je oscilatorni proces ili istitravanje. Kada se energija potroši pretvaranjem u toplinu u otporniku, prijelazna pojava završi.

Ovisno o uporabljenim članovima, odziv sustava drugog reda može biti:

- aperiodski i
- oscilatorni.

Aperiodski odziv

Ako je stupanj prigušenja jednako jedan ili je veći ($\zeta \geq 1$) sustav ima aperiodski odziv (sl.2.21.). Sustav nema niti nadvišenja niti oscilacija. Izlazna veličina monotono raste do stacionarne vrijednosti (Y_{st}), što je ujedno i asimptota. Tangenta u t_0 je apascisna os.



Sl.2.21. Aperiodski odziv

Oscilatorni odziv

Ovisno o stupnju prigušenja, oscilacije mogu biti:

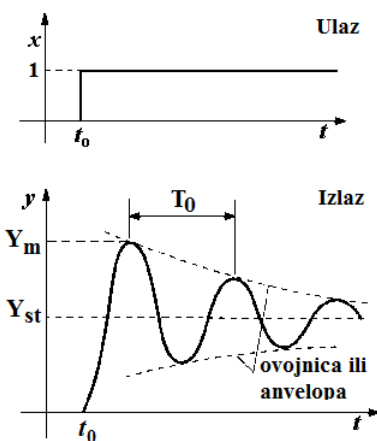
- prigušene,
- konstantne i
- neprigušene (raspirujuće).

Ako je stupanj prigušenja između nula i jedan ($0 < \zeta < 1$), oscilatorni odziv biti će prigušen (sl.2.22.). Razlika između maksimalne vrijednosti i stacionarne vrijednosti izlaznog signala ($y_m - y_{st}$) je nadvišenje.

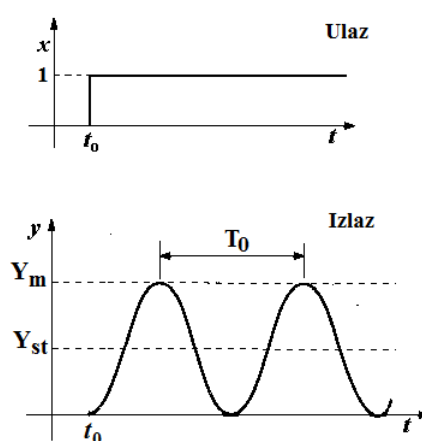
Dopušteno nadvišenje je obično 10 % ÷ 30 %. Prijelazna pojava završi kada je izlazna veličina u granicama ± 5 % do ± 1 % od stacionarne vrijednosti. Vremenom amplituda oscilacija postaje sve manja, a frekvencija prigušenja ostaje nepromijenjena.

Ovojnica ili anvelopa prigušenja je eksponencijalna funkcija.

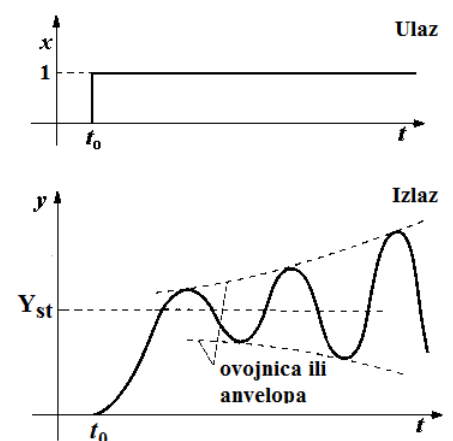
Ako je stupanj prigušenja jednak nuli ($\zeta = 0$) nastaju neprigušene oscilacije tj. sklop se ponaša kao oscilator (sl.2.23.). To je slučaj u RCL- članu ako je $R = 0$. Ovakav odziv je na granici stabilnosti i nije dopušten u



Sl.2.22. Prigušeni oscilatorni odziv



Sl.2.23. Neprigušeni oscilatorni odziv



Sl.2.24. Prikaz raspirujućih oscilacija

automatici.

U slučaju kada je stupanj prigušenja manji od nule ($\zeta < 0$) dolazi do neprigušenih oscilacija (sl.2.24.). To može nastati u slučaju pozitivne povratne veze. Neprigušen (raspirujuće) oscilacije znače nestabilan odziv. On je zabranjen u automatici jer može dovesti do uništenja uređaja. Sa slike je vidljivo da se izlazna veličina udaljava od stacionarnog stanja. Ovojnica signala je eksponencijalna funkcija.

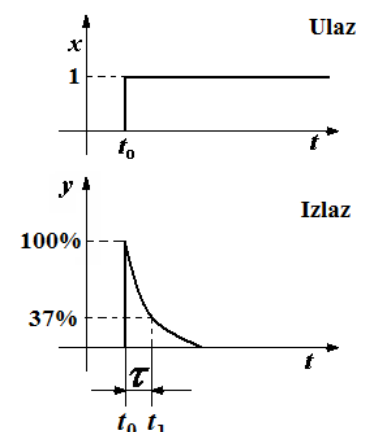
Derivacijska ili D – karakteristika

Ovu karakteristiku imaju jedinice automatskog upravljanja kod kojih je vrijednost izlazne veličine jednaka brzini promjene ulazne veličine. Matematički izraz za ovakvu prijelaznu karakteristiku je

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

gdje je:

x – vrijednost ulazne veličine, y – vrijednost izlazne veličine, t – vrijeme



Sl.2.25. D - karakteristika

i K_D – pojačanje jedinice automatske regulacije.

Derivacijska karakteristika prikazana je na sl.2.25. Na karakteristici je određena vremenska konstanta (τ), a predstavlja vrijeme potrebno da vrijednost izlazne veličine padne na 37% maksimalne vrijednosti koja se postiže u trenutku t_0 .

Sklopovi koji imaju ovakvu prijelaznu karakteristiku nazivamo sklopovima za diferenciranje.

Integracijska ili I – karakteristika

Jedinice s ovakvom karakteristikom na odskočnu ulaznu funkciju daju izlaz koji linearno raste s vremenom (sl.2.26). Matematički izraz za ovu prijelaznu karakteristiku je

$$y = K_I \cdot x \cdot t$$

gdje je:

x – vrijednost ulazne veličine, y – vrijednost izlazne veličine, t – vrijeme i K_I – osjetljivost ili faktor pojačanje jedinice automatske regulacije.

Za jedinice s ovakvim djelovanjem karakteristično je akumuliranje energije ili materije.

2.1.3.4.3. Frekvencijske karakteristike

Prijelazna karakteristika je odziv jedinica sustava automatskog upravljanja na odskočnu funkciju ovisno o vremenu. Frekvencijska karakteristika je odziv sustava na sinusnu funkciju ovisno o frekvenciji u stacionarnom stanju.

Frekvencijska karakteristika se snima tako da se na generatoru funkcija namjesti odgovarajuća amplituda (X_m) sinusoide i mijenja se frekvencija ulaznog signala. Za svaku namještenu ulaznu frekvenciju osciloskopom se snima izlazni signal. mjeri se amplituda (Y_m) i fazni pomak (φ) izlaznog signala. Svaki linearni sustav ima svoje frekvencijsko područje djelovanja.

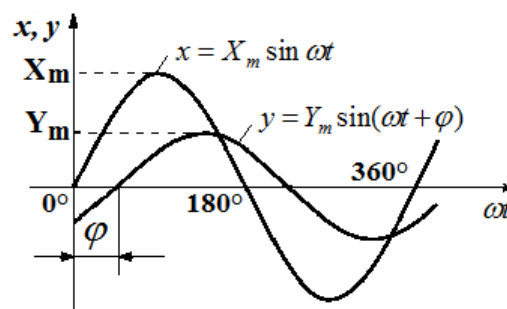
Ako sinusoida na ulazu ima oblik

$$x = X_m \sin \omega t$$

izlazni signal bit će oblika

$$y = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Vidimo da izlazna veličina ima oblik sinusoide iste frekvencije i valnog oblika, ali različite amplitude i s faznim pomakom (sl.2.27.).



SL.2.27. Sinusoidalni ulazni i izlazni signal

Često ne znamo napraviti matematički model ispitivanog sustava pa ga ispitujemo eksperimentalno. Snima mu se prijelazna i frekvencijska karakteristika.

Sustavi se ispituju samo za frekvencije koje su za njih važne. Npr. za elektromotore nisu važne visoke frekvencije, jer ih prigušuju namotaji (RL – član), u elektroakustici su važne samo frekvencije koje čuje čovjek (16 Hz do 20 kHz).

Od frekvencijski karakteristika razlikujemo sljedeće tipove:

- amplitudno-frekvencijska karakteristika,

- fazno-frekvencijska karakteristika i
- amplitudno-fazno-frekvencijska karakteristika.

Amplitudno-frekvencijska karakteristika određuje ovisnost omjera izlaznog i ulaznog signala o frekvenciji

$$(\omega). \quad A(\omega) = \frac{Y_m}{X_m}$$

Fazno-frekvencijska karakteristika određuje ovisnost faznog pomaka izlaznog i ulaznog signala o frekvenciji

$$(\omega). \quad \varphi(\omega)$$

Frekvencijska karakteristika grafički se prikazuje vrlo jednostavno, dok su analitički izrazi često vrlo složeni. Zato grafičke metode imaju veliku primjenu. Grafičke metode koje se primjenjuju u analizama frekvencijskih karakteristika su:

1. Bodeov prikaz,
2. Nyquistov dijagram i
3. Nickolsov dijagram.

Bodeov prikaz frekvencijskih karakteristika

Bodeov prikaz se sastoji od dva dijagrama:

- amplitudno frekvencijske karakteristike i
- fazno frekvencijske karakteristike

I kod jedne i kod druge karakteristike na apscisu se nanosi frekvencija (ω) u logaritamskom mjerilu zbog preglednosti dijagrama, jer se često prikazuje široko frekvencijsko područje.

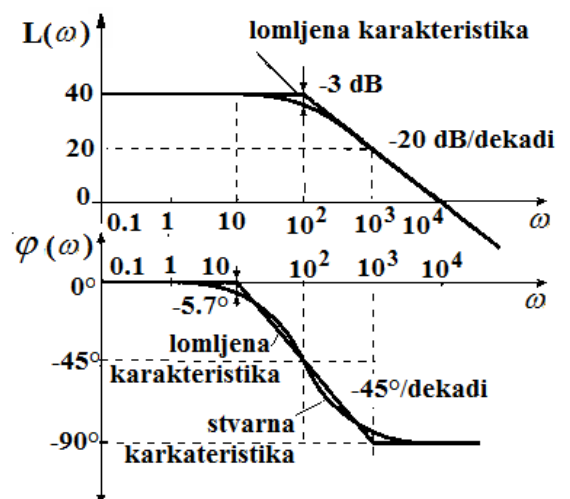
Na Bodeovoj amplitudnoj karakteristici crta se ovisnost amplitude o frekvenciji, pa se na ordinatu nanosi logaritamski omjer izlazne i ulazne amplitude

$$L(\omega) = 20 \log A(\omega)$$

Izražava se u decibelima (dB). Decibel nije mjerna jedinica već logaritamski omjer amplituda. (Npr. ako je omjer izlazne i ulazne amplitude 1000, znači 60 dB, a omjer od 0.01 znači -40 dB).

Bodeova fazno-frekvencijska karakteristika je u lin-log mjerilu. Na apscisu se nanosi frekvencija u logaritamskom mjerilu a na apscisu faza (u stupnjevima ili radijanima) u linearnom mjerilu.

Zbog brzine i jednostavnosti, obično se Bodeovi dijagrami crtaju približno, bez računanja ili mjerenja točku po točku, a sastoji se od izlomljenih pravaca. Stvarna karakteristika nešto odstupa od izlomljenih pravaca, a najveće odstupanje je lomnoj frekvenciji. Na sl.2.28. je prikazana amplitudno – frekvencijska i fazno - frekvencijska karakteristika prvog reda. Odstupanje stvarne od lomljene karakteristike na amplitudnoj karakteristici najveće je na lomnoj frekvenciji i iznosi -3 dB, a na faznoj karakteristici oko 5%. Pad amplitude iza lomne frekvencije iznosi -20 dB / dekad. Nagib faze iznosi -45° / dekad.



Sl.2.28. Bodeov dijagram sustava 1. reda

2.2. Pretvornici pomaka

Pomak može biti linearni (pravocrtni) i kutni (zakret). Pretvornike pomaka možemo razvrstati prema vrsti mjernog signala na električne, pneumatske i hidrauličke. Najčešće se primjenjuju električni pretvornici:

- otpornički pretvornici pomaka,
- kapacitivni pretvornici pomaka i
- induktivni pretvornici pomaka.

2.2.1. Otpornički pretvornici pomaka

Otpornički pretvornici pomaka su pasivni elektronički pretvornici. Mogućnost pretvora pomaka u električni signal može se vidjeti iz izraza za električni otpor vodiča:

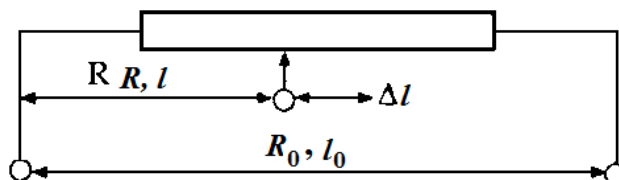
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Vrijednost otpora žičanog otpornika može se najlakše mijenjati djelovanjem na duljinu žice (l), presjeka (S) i specifičnog otpora (ρ).

Pretvornici s djelovanjem na dužinu vodiča su potencimetarski pretvornici od kojih su najpoznatiji pravocrtni i kružni potencimetri.

Kod pravocrtnih potencimetarskih pretvornika (sl.2.29.), izlazna vrijednost otpora ovisi o pomaku koju je izazvala ulazna veličina (Δl). Ako označimo cjelokupni hod klizača sa l_0 , a trenutni položaj klizača sa l prema sl. 2.29, možemo postaviti omjer $l : l_0 = R : R_0$, tada je otpor na određenom položaju klizača:

$$R = R_0 \frac{l}{l_0}$$



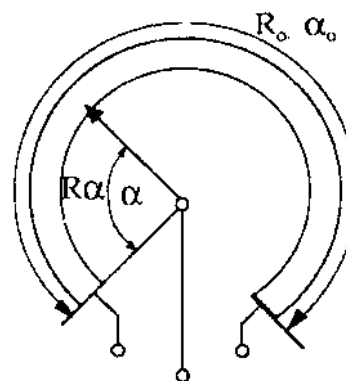
Sl.2.29. Pravocrtni potencimetarski pretvornik

Budući da su vrijednosti l_0 i R_0 konstantne vrijednost otpora R ovisi samo o duljini l tj. o pomaku koji je napravio klizač.

Slično je i kod kružnih potencimetarskih pretvornika (sl.2.30.), izlazna vrijednost otpora ovisi o kružnom pomaku koju je izazvala ulazna veličina ($\Delta \alpha$), odnosno

$$R = R_0 \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

Budući da su vrijednosti α_0 i R_0 konstantne vrijednost otpora R ovisi samo o kutu zakreta α tj. o kružnom pomaku koji je napravio klizač.



Sl.2.30. Kružni potencimetarski pretvornik

2.2.2. Kapacitivni pretvornici pomaka

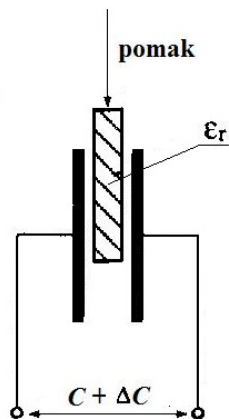
Poznato je da kapacitet pločastih kondenzatora ovisi o površini ploča (S), razmaku između ploča (d) i dielektričnoj konstanti izolatora (ϵ_r), što se izražava izrazom

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

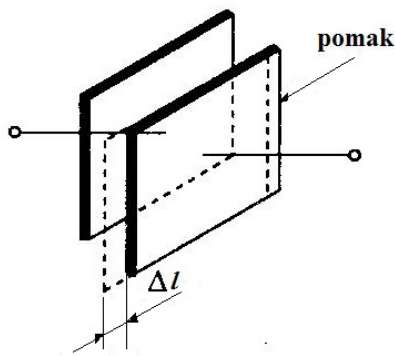
Promjenu kapacitivnosti kod ovih pretvornika (kondenzatora) možemo izvesti na više načina:

- promjenom dielektrične konstante izolatora (ϵ_r),
- promjenom površine ploča (S),
- promjenom razmaka između ploča (d)

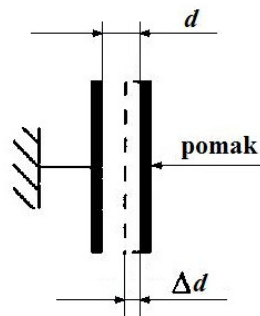
U praksi se koriste sva tri načina, na temelju kojih se izvede pretvornici.



Sl.2.31.



Sl.2.32.



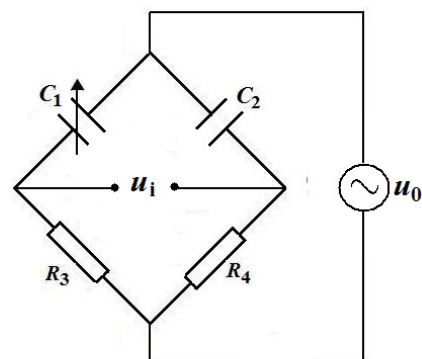
Sl.2.33.

Na sl.2.31. je prikazan primjer izvedbe pretvornika s promjenom dielektrične konstante. Pomak dielektrične konstante između ploča kondenzatora mijenja kapacitet kondenzatora.

Pretvornik pomaka izveden na principu promjene površine ploča prikazan je na sl.2.32. Pomak uzrokuje promjenu međusobnog položaja ploča, što mijenja aktivnu površinu ploča kondenzatora, a ima za posljedicu promjenu kapaciteta kondenzatora.

Sl.2.33. prikazuje principijelnu izvedbu kapacitivnog pretvornika na temelju promjene razmaka između ploča. Mijenjanjem razmaka između ploča mijenja se i kapacitet kondenzatora.

U praksi se koriste nekoliko spojeva pri izvedbi kapacitivnih mjernih pretvornika. Na sl.2.34. je prikazan spoj u Wienovom mostu. Pomak kao ulazna veličina mijenja kapacitet kondenzatora C_1 , što ima za posljedicu promjenu izlaznog napona (u_i).



Sl.2.34. Wienov most

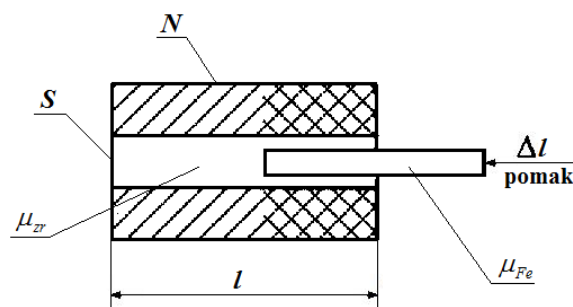
2.2.3. Induktivni pretvornici pomaka

Induktivitet svitka ovisi o magnetskoj permeabilnosti (μ), površine presjeka svitka (S), duljine svitka (l) i broja zavoja svitka (N), što se iskazuje izrazom

$$L = \mu \frac{S}{l} N^2$$

Promjenu induktiviteta kod ovih pretvornika (svitaka) možemo izvesti na više načina:

- promjenom koeficijenta permeabilnosti (μ),



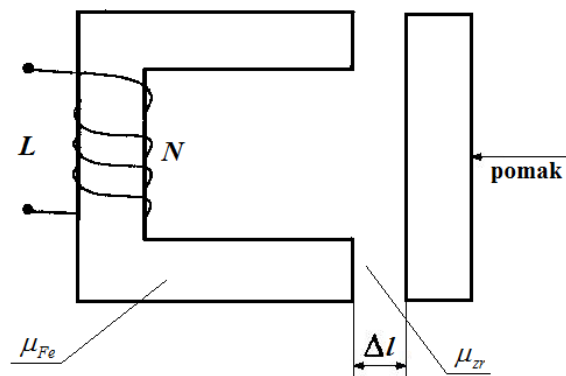
Sl.2.35. Pretvornik pomaka s pomičnim jezgrom

- promjenom presjeka zavojnice (S),
- promjenom dužine zavojnice (l),
- promjenom broja zavoja svitka (N).

Najčešće se induktivni pretvornici izvedu na principu promjene magnetskih svojstava zavojnice i djelovanjem na ukupni koeficijent permeabilnosti magnetskog kruga.

Na sl.2.35. prikazana je načelna izvedba induktivnog pretvornika pomaka, kod kojeg se pomakom jezgre mijenja permeabilnost (μ) svitka, čime se mijenja i njegov ukupni induktivitet. Na taj se način mijenja izlazna veličina pretvornika, induktivni otpor, struja ili napon, analogno promjenama vrijednosti ulazne veličine (pomaka).

Slika 2.36. prikazuje načelnu izvedbu induktivnog pretvornika pomaka u električnu veličinu. Pomak mijenja zračni raspor (Δl), a time i ukupni koeficijent permeabilnosti (μ) magnetskog kruga svitka. to se na izlazu očituje kao promjena napona ili struje zavojnice.



SL2.36. Pretvornik pomaka s pomičnom kotvom

Za mjerenje sa induktivnim pretvornicima vrlo često se koriste mosni spojevi.

2.3. Pretvornici brzine vrtnje

Kako postoje dvije vrste brzina (pravocrtna i kutna), tako postoje i dvije vrste pretvornika brzine:

- pretvornici pravocrtnne brzine i
- pretvornici kutne brzine koje ćemo zvati i pretvornici brzine vrtnja.

Od svih mjerenja brzine najčešće se primjenjuje mjerenje brzine vrtnje. Mnoga mjerenja brzine gibanja zapravo su mjerenja brzine vrtnje (npr. brzina gibanja automobila, brodova itd.).

Jedinica za mjerenje kutne brzine je rad/s, a za pravocrtnu brzinu m/s.

Za automatsku regulaciju mjerenje brzine vrtnje naročito je značajno kod reguliranih elektromotornih pogona.

Razvijeno je više načina pretvorbe brzine vrtnje. Najčešće su to mehanički ili električni pretvornici.

Od mehaničkih pretvornika najpoznatiji je centrifugalni pretvornik brzine vrtnje.

Od električni mjernih pretvornika razlikujemo generatorske pretvornike koji brzine vrtnje pretvaraju u analogni električni signal i impulsne pretvornike koji brzinu vrtnje pretvaraju u niz impulsa.

Generatorske pretvornike susrećemo i pod nazivom elektromagnetski pretvornici. Oni obuhvaćaju pretvornike što se nazivaju tahometrima.

Često se generatorski pretvornici brzine vrtnje nazivaju i tahogeneratori.

2.3.1. Generatorski pretvornici brzine vrtnje

Generatorski pretvornici rade na principu generiranja električnih napona u vodičima koji se gibaju u magnetskom polju. Ovi generatori mogu biti izmjenični ili istosmjerni. Principijelna shema ovih generatora prikazana je na sl.2.37.

Ako se rotor generatora okreće kutnom brzinom (ω) inducirani napon na rotorskom svitku je proporcionalan toj brzini

$$u_{\text{ind}} = A \sin \omega t$$

gdje je:

A – maksimalna vrijednost inducirano napona; ω – kutna brzina; t – vrijeme.

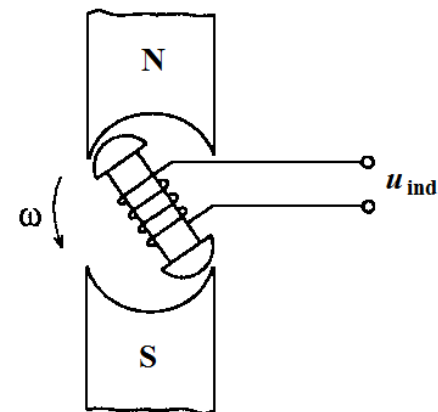
Želi li se dobiti istosmjerni napon, umjesto kliznog koluta na izlaznom dijelu rotora ugradi se kolektor. Inducirani napon sada je ispravljen i njegova srednja vrijednost je

$$U_i = k \cdot A \cdot \omega$$

gdje je:

k – konstanta ispravljanja, A – maksimalna vrijednost inducirano napona; ω – kutna brzina.

Istosmjernim pretvornicima ove vrste mjeri se brzina vrtnje do 6000 o/min, a izmjeničnima i više.



Sl.2.37. Generatorski pretvornik

2.3.2. Impulsni pretvornici brzine vrtnje

Impulsni pretvornici brzine vrtnje izrađuju se kao kapacitivni, induktivni, fotoelektrični i optičko-električni.

Od impulsnih pretvornika najčešće se koriste induktivni koji se izrađuju u mnogo različitih izvedbi. Jedna izvedba principijelno je prikazan na sl.2.38.

U rasporu nepomičnog svitka (3) vrti se zupčasta ploča (1). Na svakom zupcu ploče je permanentni magnet. Ploča je pričvršćena na osovinu (2) čiju brzinu vrtnje mjerimo. Prolaskom zupca s permanentnim magnetom kroz raspor svitka u svitku će inducirati napon u obliku pravokutnog impulsa.

Frekvencija impulsa je

$$f_i = n \cdot z$$

gdje je:

n – brzina vrtnje osovine (o/s); z – broj zubi na ploči.

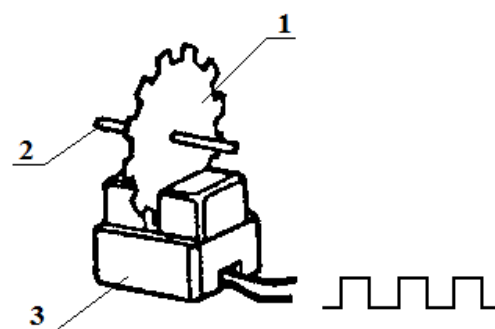
Principijelna izvedba fotoelektričnog impulsnog pretvornika prikazan je na sl.2.39.

Izbušena ploča (1) pričvršćena je na osovinu čiju brzinu vrtnje mjerimo. S jedne strane ploče postavljeno je fotoosjetilo (2), a sa druge strane izvor svjetlosti s usmjerenim optičkim sustavom (3). Nailazak rupe na snop svjetlosti prouzročit će osvjetljivanje fotoosjetila tj. generiranje impulsa.

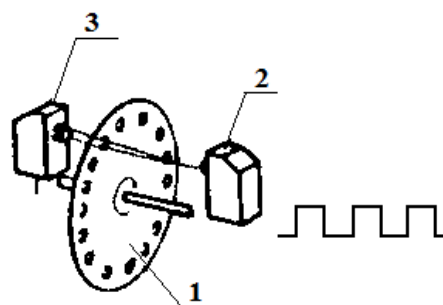
Frekvencija impulsa je

$$f_i = n \cdot z$$

gdje je: n – brzina vrtnje osovine (o/s); z – broj provrta na ploči.



Sl.2.38. Induktivni impulsni pretvornik



Sl.2.39. Fotoelektrični impulsni pretvornik

2.4. Pretvornici sile i naprezanja

Sila je veličina koja uzrokuje gibanje ili deformaciju tijela. Kad sila djeluje na tijelo, tijelo se ubrzava u smjeru te sile. sila je uzrok gibanja tijela. Ako su sile u ravnoteži, tada one opterećuju tijelo i uzrokuju deformaciju tijela, stezanje ili rastezanje tijela.

Težina je sila uzrokovana ubrzanjem Zemljine teže, tj ona sila kojom Zemlja privlači tijelo i ovisi o geografskom položaju.

Za mjerenje sile razvijene su mnoge metode i mnoštvo izvedbi mjernih instrumenata. Ovdje ćemo obraditi:

- otporničke pretvornike sile,
- induktivne pretvornike sile,
- kapacitivne pretvornike sile i
- fotoelastične pretvornike sile.

2.4.1. Otpornički pretvornici sile

Među otporničke pretvornike sile ubrajamo:

- ugljene,
- potenciometerske i
- pretvornike s rasteznim osjetilima.

Potenciometerski pretvornici sile upotrebljavaju se rijetko, a rade na principu pretvorbe pomaka uzrokovanog silom, kojom se pomiče klizač pretvornika.

Ugljeni pretvornici sile

Ugljeni pretvornici sile rade na temelju promjene otpora ugljenog stupca, ako na njega djeluje sila (sl.2.40.). Opor ugljenog stupca sastoji se od otpora pojedinih ploča i prijelaznog otpora između ploča

$$R = R_{pl} + R_{pr}$$

Opor pojedinih ploča (R_{pl}) je konstantan, ali se pod djelovanjem sile mijena prijelazni otpor (R_{pr}), po zakonu

$$R_{pr} = \frac{K}{F}$$

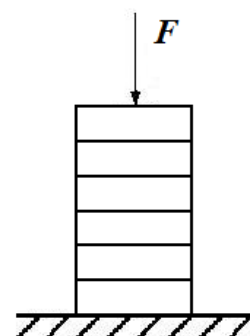
gdje je:

K – konstanta ovisna o vrsti ugljena i dimenzijama ploča, F – sila.

Ukupni otpor stupca je

$$R = R_{pl} + \frac{K}{F}$$

pa je iznos mjerene sile

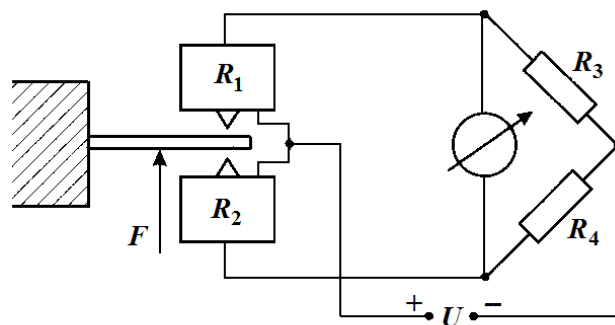


Sl.2.40. Ugljeni pretvornici sile

$$F = \frac{K}{R - R_{pr}}$$

Ovi se otpornici primjenjuju za mjerenje sile do nekoliko kN.

Mjerni spojevi za mjerenje s ugljenim pretvornicima najčešće se izrađuju kao mosni u kojima se pokazni instrumenti baždare u jedinicama za silu. Jedan takav mosni spoj prikazan je na sl.2.41.



Sl.2.41. Mosni spoj s ugljenim pretvornicima sile

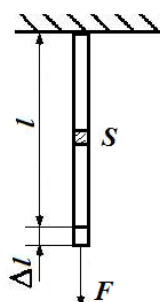
Pretvornici sile s rasteznim osjetilima

Pretvornici sile s rasteznim osjetilima rade na principu elastične deformacije tijela izazvane djelovanjem sile.

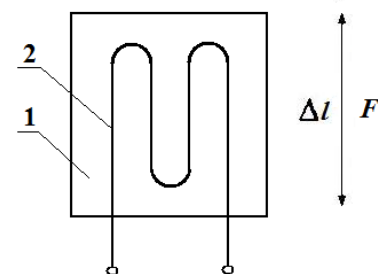
I kod ovih pretvornika iskorištena je mogućnost promjene otpora promjenom duljine, poprečnog presjeka i specifičnog otpora.

Princip rada ovih pretvornika prikazan je na sl.2.42. Najjednostavniji oblik ovog pretvornika može se predstaviti kao vodič čiji je jedan kraj učvršćen, dok mu na drugi slobodni kraj djeluje sila. Ako sila djeluje tako da isteže vodič, pod njenim djelovanjem vodi se izduži i rastanji, a djelomično mu se promjeni i specifični otpor.

Rastezna se osjetila izvode tako da se na elastičnu podlogu (1) zalijepi ili kemijskim putem nanese otporna žica (2) u više navoja (sl.2.43.).



Sl.2.42. Rastezno osjetilo



Sl.2.43. Izvedba pretvornika s rastalnim osjetilom

I kod izvedbe ovih pretvornika najčešće se koriste mosni spojevi. S njima se mogu mjeriti sile od nekoliko MN do 2000MN.

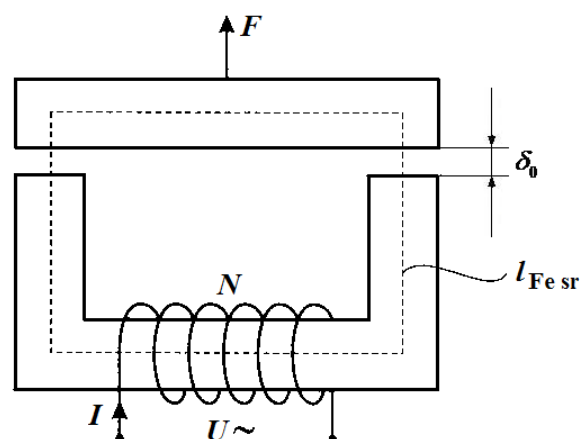
2.4.2. Induktivni pretvornici sile

Za mjerenje većih sila upotrebljavaju se induktivni pretvornici sile. Principijelna shema prikazan je na sl.2.44. Sastoji se od elektromagneta sa pomičnom kotvom. Sila djeluje na kotvu i mijenja širinu zračnog raspora (δ_0). Promjena zračnog raspora mijenja duljinu magnetskih silnica magnetskog kruga, točnije duljinu silnica kroz zračni raspor, a time i promjenu induktiviteta. Induktivitet je ovisan o broju navoja i magnetskom otporu kruga. Ako zanemarimo magnetski otpor željeza, onda je magnetski otpor kruga približan magnetskom otporu zračnog raspora (R_{m0}), pa je induktivitet kruga

$$L = \frac{N^2}{R_{m0}} = \frac{N^2}{\frac{\delta_0}{\mu_0 S}} = \frac{N^2 \mu_0 S}{\delta_0}$$

gdje su: R_{m0} – magnetski otpor zračnog raspora; N – broj navoja elektromagneta; S – površina poprečnog presjeka željezne jezgre; μ_0 – apsolutna permeabilnost; δ_0 – širina zračnog raspora.

Induktivni otpor je



Sl.2.44. Induktivni pretvornik sile

$$X_L = \omega L = \frac{\omega N^2 \mu_0 S}{\delta_0}$$

Struja koja teče elektromagnetom je

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U \delta_0}{\omega N^2 \mu_0 S}$$

Iz izraza je vidljivo da je struja proporcionalna širini zračnog raspora (δ_0). Na taj način smo silu pretvorili u strujni signal.

2.4.3. Kapacitivni pretvornici sile

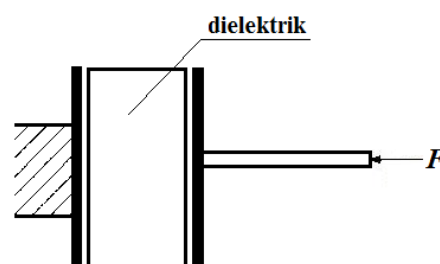
Djeluju na osnovi promjene kapaciteta pločastog kondenzatora kod kojeg je između ploča elastični dielektrik (sl.2.45.). Kada sila (F) djeluje na ploču mijenja se razmak između ploča, a time se mijenja i kapacitet kondenzatora. Odnos sile i kapaciteta kondenzatora može se izraziti formulom

$$\Delta F = k \cdot \Delta C$$

gdje su:

$$k - \text{konstanta}; \Delta C = C - C_0.$$

Ovi se pretvornici koriste za mjerenje malih sila.



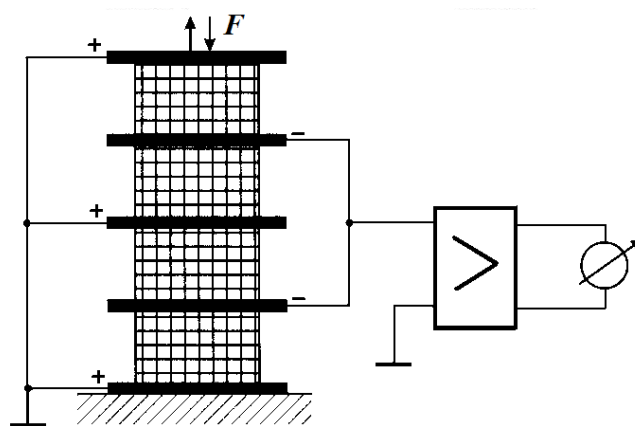
Sl.2.45. Kapacitivni pretvornik sile

2.4.4. Piezoelektrični pretvornici sile

Kada se na neke kristale (npr. kvarc) djeluje silom na njegovim plohama pojavi se naboj. Naboj se javlja na plohama okomitim na smjer djelovanja sile. To svojstvo kristala iskorišteno je kod piezoelektričnih pretvornika sile. Principijelna shema ovih pretvornika prikazan je na sl.2.46.

Piezoelektrični pretvornici prikladni su za mjerenje impulsnih sila (brzih promjena sila i po iznosu i po vremenu) do frekvencija od 15 kHz.

Koriste se za mjerenje sila u kompresorima, crpkama, eksplozijskim motorima, topovskim cijevima itd.



Sl.2.46. Piezoelektrični pretvornik sile

2.5. Pretvornici tlaka

Tlak je definiran kao djelovanje sile na površinu. Razlika tlaka je bilo koja razlika tlakova mjerenih na dva mjesta u prostoru. Tlak mjeren s obzirom na atmosferski tlak naziva se **relativni tlak** a iskazuje se omjerom mjerenog i atmosferskog tlaka. Uzimajući atmosferski tlak kao osnovicu, uobičajeno je da se relativni tlak veći od atmosferskog zove **nadtlak**, a manji od atmosferskog **podtlak**.

Jedinica za mjerenje tlaka je paskal ($1\text{Pa} = \text{N/m}^2$). Tlak manji od 133 Pa smatra se vakuumom, a tlak od 0.1Pa je visoki vakuum.

Osim paskala ponegdje su još u uporabi i stare jedinice za tlak:

- normalna (fizikalna) atmosfera ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$)
- milimetar stupca žive ($1 \text{ mm Hg} = 133.322 \text{ Pa}$)
- milimetar stupca vode ($1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$)

Budući da je tlak djelovanje sile na površinu, mjerene tlaka svodi se na uspoređivanje dviju sila i mjerenje njihove razlike. Sile koje izazivaju tlak mogu se svrstati u dvije osnovne skupine:

- sile koje nastaju uslijed gravitacije na bazi kojih se grade tekućinski pretvornici tlaka i
- sile koje djeluju na bazi elastične deformacije na bazi koji se grade deformacijski pretvornici tlaka.

Mjerni pretvornici tlaka osjećaju promjene tlaka pomoć mehaničkih osjetila u kojima se na prikladan način uspostavlja ravnoteža sila i kao posljedica mjerljiv pomak ili deformacija.

Pretvornik tlaka s indikatorom naziva se tlakomjer ili manometar.

Ovdje ćemo obraditi pretvornike tlaka koje smo svrstali u tri skupine:

- tekućinske pretvornike tlaka,
- deformacijske pretvornike tlaka i
- mehaničko-električne pretvornike tlaka.

2.5.1. Tekućinski pretvornici tlaka

Tekućinski pretvornici tlaka su pretvornici punjeni živom, vodom, alkoholom, uljem, glicerinom itd. Tekućine kojima se pune moraju imati mali temperaturni koeficijent širenja, kako bi greška mjerenja uslijed promjene temperature bila što manja.

Princip rada ovih pretvornika objasniti ćemo na primjeru pretvornika tlaka sa U-cijevima (U-manometar). Kod ovih pretvornika u staklenoj cijevi oblika slova U (sl.2.47.) nalazi se tekućina (živa, alkohol, voda itd). Na jednom kraju cijevi priključen je referentni (atmosferski) tlak p_0 , a na drugi mjereni tlak p_1 . Ako je p_1 veći od p_0 , kako je prikazano na slici, pokazat će se razinska razlika h .

Budući da razlika tlakova ovdje drži ravnotežu težini stupca tekućine, odnosno:

$$p_1 \cdot S - p_0 \cdot S = G$$

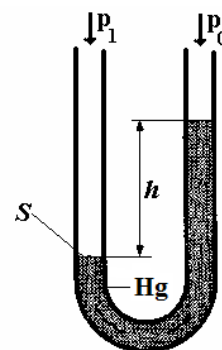
ili

$$p_1 - p_0 = \frac{G}{S} = \frac{V \cdot \gamma}{S} = \frac{S \cdot h \cdot \gamma}{S} = h \cdot \gamma$$

gdje su:

V – volumen istisnute tekućine; S – površina poprečnog presjeka cijevi; γ – specifična težina tekućine

Pri mjerenju s ovim pretvornicima, moraju se uzeti u obzir pojava kapilarnosti tekućina, koja od tankih cijevi i malih razlika tlakova mogu izazvati znatne pogreške. Isto je i sa toplinskom rastezljivošću tekućina.



Sl.2.47. Pretvornik tlaka sa U - cijevi

2.5.2. Deformacijski pretvornici tlaka

Ovi pretvornici tlaka imaju mehanička osjetila koja pretvaraju tlak u male pomake ili deformacije. U tu svrhu koriste se različite izvedbe membrana i mjehova. Pri tom je bitno da mjerni tlakovi ne prekorače najveće moguće elastične deformacije pretvornika.

Pretvornici tlaka s membranom

Obično imaju kružnu elastičnu membranu, koja po svom obodu zatvara prostor u kojem djeluje mjerni tlak. Otklon središta membrane pretvornika je proporcionalan mjernom tlaku. Taj se pomak najčešće prenosi polugom na kazaljku pokaznog sloga (sl.2.48.).

Pod djelovanjem tlaka središte membrane se pomiče za pomak:

$$\Delta l = K(p_1 - p_0) = K \Delta p$$

Konstanta K sadrži faktore ovisne o mehaničkim osobinama membrane: elastičnost, geometrijske dimenzije i način izrade membrane.

Mjerni tlakovi ovise o izvedbi pretvornika i iznose 0.2 – 30 kPa.

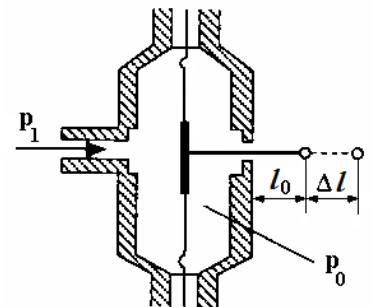
Pretvornici tlaka s mijehom

Izrađuje se od metala ili drugih elastičnih materijala (sl.2.49.). Mijeh se izduži ili skрати, ako na njegovu površinu, vanjsku ili unutarnju, djeluju tlakovi različitih vrijednosti. Kod praktičnih izvedbi se jedna ploha mijeha učvrsti nepomično, a na drugoj se postavi prijenosni mehanizam s kazaljkom.

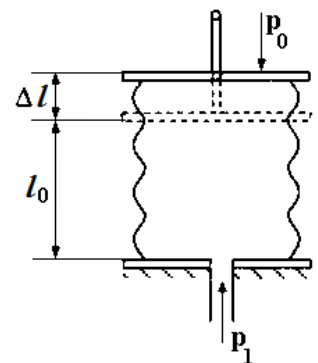
Pomak pokretne plohe mijeha s polugom i kazaljkom ovisi o izvedbi i osobinama materijala od kojeg je mijeh izrađen. Taj pomak je određen izrazom:

$$\Delta l = K(p_1 - p_0) = K \Delta p$$

Pretvornici tlaka s mijehom koriste se za mjerenje tlakova plinova u regulacijskoj tehnici. Područje mjerenja tlakova ovih pretvornika je 0.5 – 5 kPa.



Sl.2.48. Pretvornik tlaka s membranom



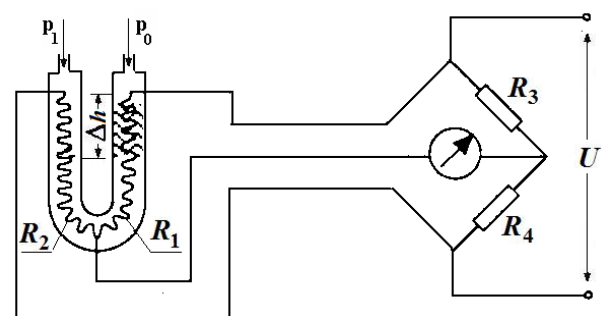
Sl.2.49. Pretvornik tlaka s mijehom

2.5.3. Mehaničko-električni pretvornici tlaka

Gore navedeni pretvornici pretvarali su tlak u mehanički pomak. Ovdje ćemo prikazati kako taj pomak pretvoriti u promjenu otpora i induktiviteta.

Otpornički pretvornici

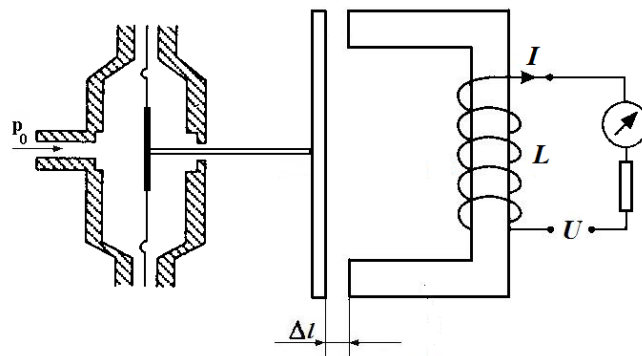
Na sl.2.50. prikazana je izvedba pretvornika tlaka s U – cijevi, gdje se pretvorba pomaka stupca žive pretvara u napon. U živin stup U – cijevi uronjena je otporna nit. Promjena tlaka uzrokuje promjenu otpora uronjene niti. Spoj je mosni pa je osjetljivost mjernog sloga velika.



Sl.2.50. Otpornički pretvornici tlaka s U - cijevi

Induktivni pretvornici

Na sl.2.51. prikazana je izvedba pretvornika tlaka s membranom i induktivnim pretvornikom. Jezgra svitka ima pomičnu kotvu koja je preko poluge spojena s membranom. Promjena tlaka koja izaziva pomak membrane preko poluge mijenja i zračni raspored svitka s jezgrom. Promjena zračnog rasporeda izaziva promjenu induktiviteta svitka, tj. induktivnog otpora, što dalje dovodi do promjene struje kroz svitak.



Sl.2.51. Induktivni pretvornik s membranom

2.6. Pretvornici razine tekućine

Mjerenje razine tekućine u spremnicima i posudama u osnovi služi kao mjera njihovog volumena ili mase. Različiti oblici posuda i različite karakteristike tekućina čine ova mjerenja složenim. Razina goriva mjeri se u rezervoarima vozila, termoelektrana, rafinerija, nivo vode u vodospremnicih itd. Razvijene su brojne metode mjerenje razine tekućine i pretvaranje tog podatka u električni signal. neke od tih metoda su:

- pomoću mehaničkog plovka,
- otporna, kapacitivna i induktivna metoda,
- ultrazvučna metoda itd.

2.6.1. Kapacitivni pretvornici razine tekućine

Princip mjerenja razine tekućine kapacitivnom metodom prikazan je na sl.2.52. Dvije elektrode uronjene su u tekućinu. Vidimo da je jedan dio elektroda u tekućini a drugi dio u zraku, pa se između elektroda nalaze dva različita dielektrika. Jedan je zrak a drugi tekućina. Uronjene elektrode ponašaju se kao dva paralelno vezana kondenzatora čiji je ukupan kapacitet

$$C = C_1 + C_2$$

a kapaciteti kondenzatora su

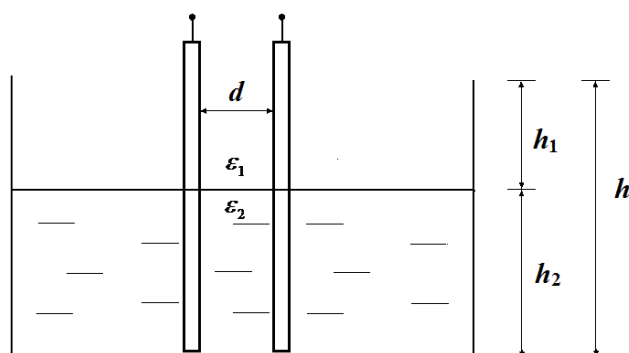
$$C_1 = \epsilon_1 \frac{S_1}{d} \quad C_2 = \epsilon_2 \frac{S_2}{d}$$

gdje su:

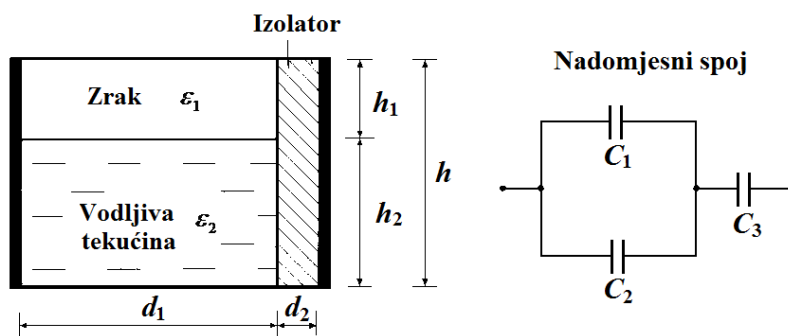
ϵ_1 i ϵ_2 – dielektrične konstante zraka i tekućine; S_1 i S_2 – površine ploča u zraku i tekućini; d – razmak među pločama.

Ako je tekućina električki vodljiva tada je potrebno elektrode međusobno izolirati (sl.2.53.). Načelo rada je isto kao i kod onih sa nevodljivom tekućinom, ali je proračun kapaciteta drugačiji. Naime ukupan kapacitet može se predstaviti nadomjesnim spojem.

kapacitet paralelnog spoja je



Sl.2.52. Kapacitivni pretvornik razine tekućine



Sl.2.53. Kapacitivni pretvornik razine vodljive tekućine

$$C_{12} = C_1 + C_2$$

Ukupan kapacitet je

$$C = \frac{C_{12} \cdot C_3}{C_{12} + C_3}$$

2.6.2. Ultrazvučni pretvornici razine tekućine

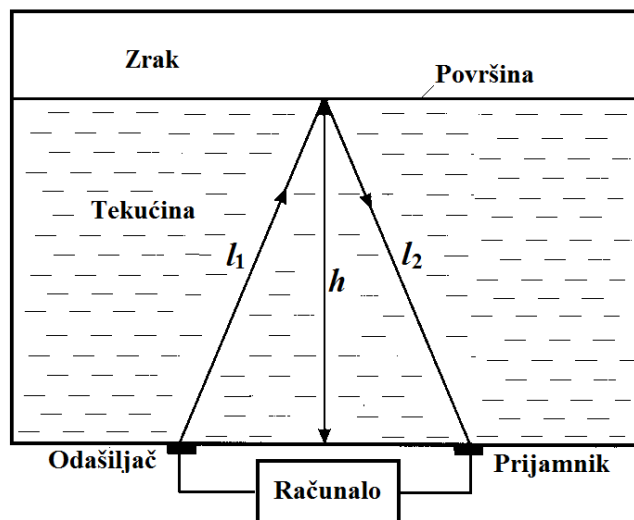
Novija metoda mjerenja razne, prikladna za velike spremnike tekućine. Princip rada prikazan je na sl.2.54. Ultrazvučni generator odašilje valove koji se odbijaju od površine tekućine i vraćaju na prijemnik. Mjeri se vrijeme između slanja i primanja ultrazvučnih valova. Mjerenje ovom metodom podrazumijeva poznavanje brzine širenja valova kroz tekućinu čiju razinu mjerimo.

Prijeđeni put vala od generatora do prijemnika je $l = l_1 + l_2$ jednak je

$$l = c \cdot t$$

gdje su: c – brzina širenja valova (različita za svaku tekućinu); l – prijeđeni put vala; t – vrijeme putovanja vala.

Iz poznatog istokračnog trokuta lako se izračuna visina trokuta (h), što je i razina tekućine u spremniku.



Sl.2.54. Ultrazvučni pretvornici razine tekućine

2.7. Pretvornici protoka

Protjecanje je gibanje tekućina i plinova. Količina tekućine ili plina što proteče u određenom vremenu zovemo protok. Obujam tekućine ili plina što protječe u jedinici vremena zove se volumni protok. Masa tekućine ili plina što protječe u određenom vremenu zove se maseni protok.

Za mjerenje protoka tekućina i plinova razvijeni su mnoge vrste mehaničkih i električnih pretvornika. Svrstavaju se na različite načine, a osnovna im je podjela na dvije skupine:

- pretvornici volumenskog protoka, odnosno

$$q_v = \frac{V}{t} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

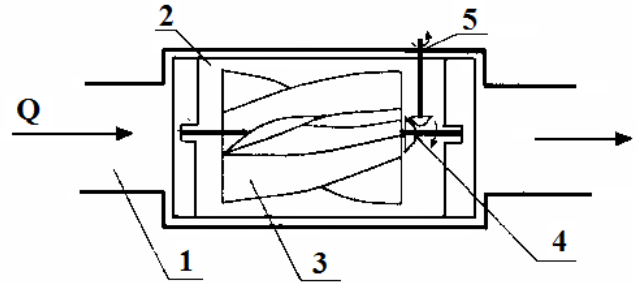
- pretvornici masenog protoka, odnosno

$$q_m = \frac{m}{t} \quad [\text{kg}/\text{h}]$$

gdje su: q_v – volumen protjecane materije u jedinici vremena; q_m – masa protjecane materije u jedinici vremena; t – vrijeme; V – volumen protjecane materije; m – masa protjecane materije

2.7.1. Turbinski pretvornici protoka

Princip rada mehaničkih pretvornika protoka objasniti ćemo na turbinskom pretvorniku protoka (sl.2.55.). Pretvornici rade na taj način da mjerena tekućina ili plin struje kroz cijev (1) i komoru (2) u kojoj je ugrađen rotor (3). Lopatice rotora postavljene su koso, tako da strujne okreće rotor brzinom proporcionalnom vrijednosti protoka. Na osovini rotora priključen je prijenosni sustav zupčanika (4) i osovina (5) koja okretanje rotora prenosi na pokazni sustav i sustav za registriranje.

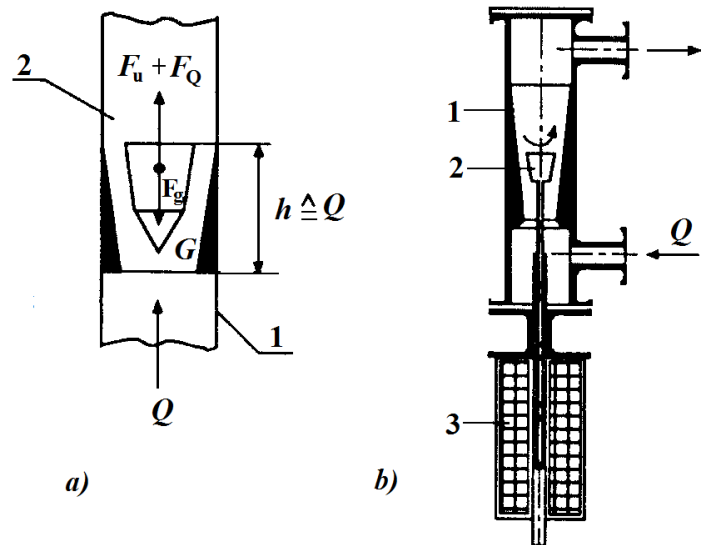


Sl.2.55. Turbinski pretvornik protoka

Sustav za registriranje je najčešće brojilo s diskovima. U slučaju pretvorbe signala u analognu električnu veličinu, na mehanički izlazni dio pretvornika priključuje se najčešće generatorski pretvornik brzine vrtnje iz kojih se onda koriste signali za brojanje i prikazivanje protoka.

2.7.2. Rotacijski pretvornici protoka

Ovo su vrlo jednostavni pretvornici koji mogu mjeriti protok tekućina i plinova. Poznati su pod nazivom rotametri. Pretvornik radi na način da se koso sužena cijev (1) kroz koju protječe mjerena tekućina postavi okomito, tako da tekućina kroz cijev struji odozdo prema gore (sl.2.56.a). U cijevi se nalazi lebdilo rotametra težine G koje djeluje prema dolje silom F_g . U suprotnom smjeru djeluje sila uzgona F_u i sila F_Q , kojom tekućina uslijed protjecanja djeluje na lebdilo i kojom lebdilo podiže okomito u cijevi. Kod određenog protoka Q sve su sile u ravnoteži i lebdilo lebdi na određenoj visini h . Skala je obično baždarena na cijevi koja je prozirna.



Sl.2.56. Izvedba rotacionog pretvornika pomaka

Kod ovakvih pretvornika znatan utjecaj na točnost pokazivanja ima i stupanj viskoznosti mjerene tekućine, pa su kod velike gustoće tvari moguće i veće pogreške.

Da se osigura daljinski prijenos mjernih veličina s ovih pretvornika uz cijev (1) rotametra (2) stavlja se dodatak s magnetskom spojkom i induktivnim pretvornikom (3) (sl.2.56.b). Rotametri se upotrebljavaju za mjerenje protoka srednjih i većih vrijednosti a pogreška pokazivanja im je 1-3%.

2.7.3. Induktivni pretvornici protoka

Induktivni pretvornici protoka primjenjuju se za mjerenje protoka vodljivih tekućina. Minimalna vodljivost pri kojoj se mjerilo može koristiti je $1\mu S/cm$.

Princip rada pretvornika zasniva se na generiranu elektromotorne sile u vodiču koji se giba magnetskom polju. U ovom slučaju mjerena tekućina se može smatrati vodičem, koji se giba u mjernoj cijevi između polova magneta. Načelna izvedba ovog pretvornika prikazan je na sl.2.57. gdje su sa (1) označen smjer strujanja tekućine u cijevi (2), koja se nalazi između polova magneta (3) sa uzбудom zavojnicom (4). Sa (5) su označene mjerne elektrode. Gibanje tekućine inducira električni napon

$$u_{iz} = B \cdot l \cdot v$$

Unutrašnjost mjerene cijevi je izolirana, a inducirani napon se javlja na elektrodama koje su u neposrednom dodiru sa tekućinom i smještene dijametralno suprotno i okomito na smjer gibanja tekućine.

Budući je protok (Q) u cijevi

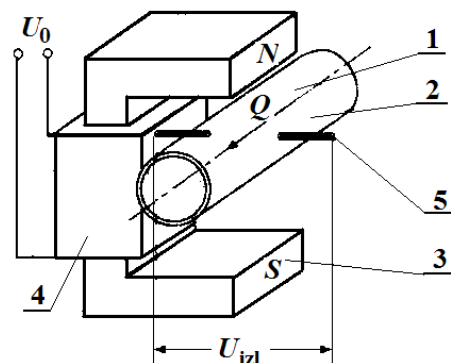
$$Q = S \cdot v$$

dobije se da je

$$Q = S \frac{u_{iz}}{Bl}$$

Kako su S , B , l konstantne vrijednosti, izlazi

$$Q = k \cdot u_{iz}$$



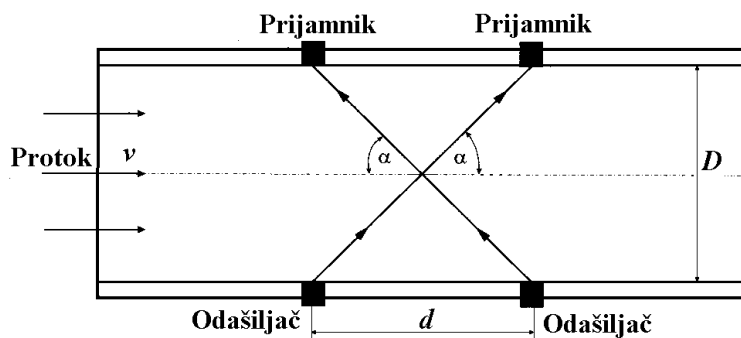
Sl.2.57. Induktivni pretvornici protoka

Inducirani naponi kod ovih pretvornika su vrlo maleni (reda mV), pa je redovito potrebno njihovo pojačanje.

2.7.4. Ultrazvučni pretvornici protoka

Za mjerenje protjecanja ultrazvučnom metodom koriste se dva para prijemnika i predajnika (sl.2.58.). Promjer cijevi (D) i razmak između prijemnika i odašiljača (d) su konstantni. Poznata je i brzina širenja ultrazvučnog vala (c) kroz mjernu tekućinu. Mjerenje se zasniva na Dopplerovom efektu: brzina gibanja valova u smjeru protoka tekućine je veća nego u suprotnom smjeru. Mjeri li se vrijeme za koja oba vala stignu od odašiljača do prijemnika, razlika tih vremena je razmjerna brzini protjecanja.

Mjerenje vremena u suvremenoj tehnici je vrlo točno, a uređaji za mjerenje maleni i jeftini. Osobine ovih pretvornika su vrlo dobre jer ne ometaju protjecanje, nemaju pokretnih dijelova koji se troše, imaju veliku brzinu odziva itd.



Sl.2.58. Ultrazvučni pretvornik protoka

2.8. Pretvornici temperature

Temperatura je veličina kojom izražavamo toplinsko stanje tijela i njihovu sposobnost prijenosa topline na druga tijela. Toplina je energija što se zbog razlike temperature izmjenjuje između tijela i okoline, tj između dva tijela. Pod pojmom tijela ovdje se podrazumijeva kruta tijela, kapljevine i plinovi. Ako između dva tijela ne postoji temperaturna razlika, između njih neće biti ni prijenosna topline.

Promjena toplinskog stanja tijela uzrok su različitim fizikalnim pojavama, pa se mnoge od tih pojava iskorištene kao osnova za pretvorbu temperature u mjerni signal. Najvažnije su:

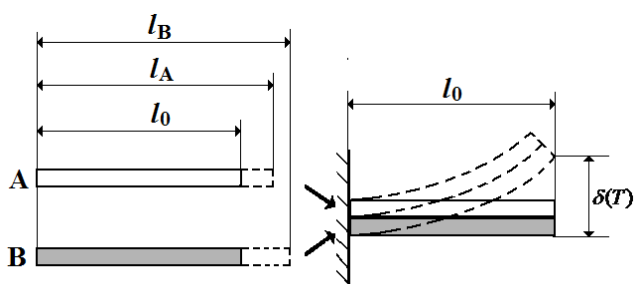
- zavisnost obujma tijela (dilatacija tijela) od temperature,
- zavisnost električnog otpora vodiča i poluvodiča od temperature
- zavisnost energije zračenja tijela od njegove temperature
- zavisnost elektromotorne sile razvijene na spojištu dvaju vodiča od temperature spojišta.

2.8.1. Dilatacijski pretvornici temperature

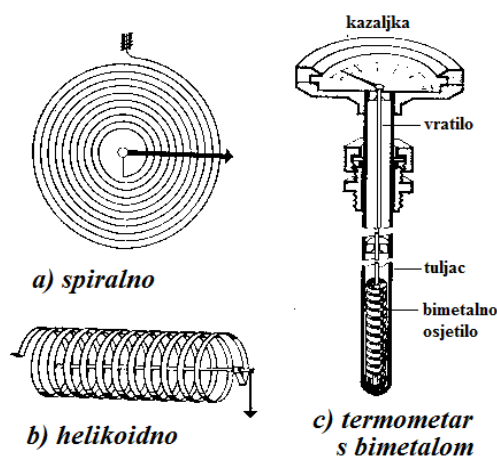
Ovi se pretvornici razvrstani u nekoliko skupina prema tvari koja mijenja obujam. Zavisnost obujma (V) od promjene temperature (ΔT) određuje se eksperimentalno za svaku tvar zasebno, pa se zatim traži matematički izraz koji najbolje opisuje tu zavisnost.

Bimetalni pretvornici

Od dilatacijskih mjernih pretvornika spomenut ćemo bimetalni dilatacijski pretvornik. Bimetal je sastavljen od dviju traka različitih materijala (sl.2.59.), pa kad se izlože promjeni temperature, savija se zbog različitih koeficijenata toplinskog širenja tih materijala. Učvrsti li se jedan kraj bimetala, otklon drugog kraja bit će mjera temperature.



Sl.2.59. Bimetalni pretvornik temperature



Sl.2.60. Izvedbe bimetalnih osjetila

Trake se mogu oblikovati u spiralu ili helikoidu, pa se tada dobije zakret kao mjera temperature. U mjerne svrhe najviše se upotrebljavaju ovakve izvedbe. Na sl.2.60. prikazani su takvi pretvornici i jedna tipična primjena. Bimetalni mjerni pretvornici koriste se samo u jednostavnijim regulacijskim krugovima kao mjerna osjetila.

Bimetalni mjerni pretvornici upotrebljavaju se za mjerna područja od -185°C do 400°C s mjernom pogreškom od $\pm 1\%$.

Materijali za bimetal su INVVAR, slitina nikla i željeza s malim koeficijentom dilatacije, te mjed ili slitina nikla i kroma s velikim koeficijentom dilatacije. Mjed se upotrebljava za niže a slitina nikla i kroma za više temperature.

Tekućinski pretvornici temperature

U ovu skupinu spadaju svi oni pretvornici koji su punjeni tekućinom. Ovi pretvornici rade na temelju temperaturno ovisnih promjene volumena tekućine. Promjena volumena tekućine može se iskazati izrazom:

$$V_T = V_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

gdje je:

V_T – obujam na mjerenoj temperaturi

V_0 – obujam na temperaturi T_0

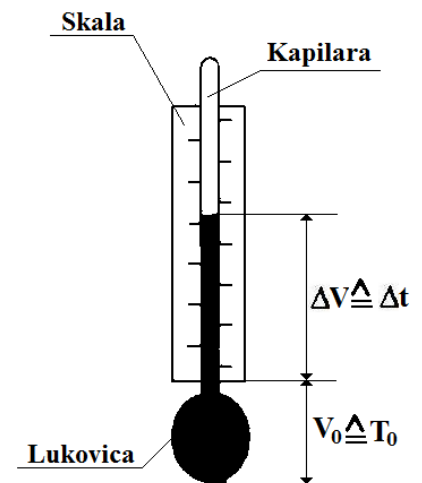
α - temperaturni koeficijent tekućine

ΔT – promjena temperature

Primjer izvedbe tekućinskog pretvornika prikazan je na sl.2.61. Stakleni tekućinski termometar sastoji se od lukovice s tekućinom, kapilare i skale. Porastom temperature tekućine poraste i njen obujam, pa porast volumena ΔV izaziva promjenu razine u kapilari u kojoj dostiže analognu visinu.

Za što bolju osjetljivost, odnosno što brže mjerenje mora se odabrati što manja vremenska konstanta termometra. Ona ovisi o građi termometra, volumenu lukovice i vrsti tekućine.

Tekućinski pretvornici mogu biti punjeni živom, alkoholom ili drugim vrstama tekućine. mjere temperaturu između -200 i +700°C.



Sl.2.61. Tekućinski pretvornik temperature

2.8.2. Otpornički pretvornici temperature

Pretvornici što imaju kao osjetilo metalni (kovinski) ili poluvodički otpornik zovu se otpornički pretvornici. Zavisnost otpora od promjene temperature određuje se eksperimentalno, a zatim se iskaže i matematički. Za većinu kovina ta se zavisnost može iskazati izrazom

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

gdje su:

R – je otpor na mjerenoj temperaturi (T); R_0 – otpor na referentnoj temperaturi (T_0); $\Delta T = T - T_0$; α – temperaturni koeficijent električnog otpora kovine.

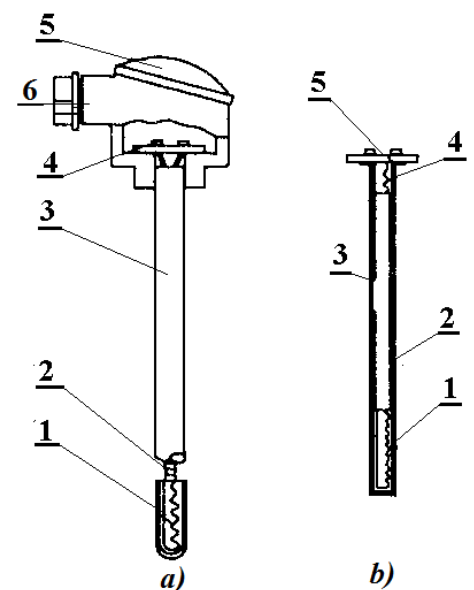
Metalna otpornička osjetila izvide se namatanjem žice ili napanjanjem tankog sloja kovine na izolator. Materijali za žice otporničkih osjetila temperature su: platina, nikal, volfram i bakar. Slojna otpornička osjetila izvide se obično napanjanjem platine na keramički izolator. Primjeri praktične izvedbe otporničkih osjetila temperature prikazani su na sl.2.62. Na slici 2.62.a. je sa (1) označeno mjerno osjetilo, (2) – zaštitna izolacija pretvornika, (3) – zaštitna cijev. (4) – priključne stezaljke, (5) – poklopac glave, (6) – izvodna cijev. Uložak pretvornika pokazan je na sl.2.62.b. gdje je: (1) – temperaturno ovisni otpornik, (2) – izolacija, (3) – keramička cijev, (4) – serijski otpor, (5) – priključne stezaljke.

Platinska žična otpornička osjetila upotrebljavaju se za precizna mjerenja u području od -183°C do +630°C, dok im je praktična primjena u području od -265°C do 1050°C. U području od -183°C do +630°C platinsko se osjetilo koristi i kao baždarno osjetilo.

Nikalna žična otpornička osjetila upotrebljavaju se za mjerenja u području od -183°C do +630°C. Jeftinija su i imaju veliku primjenu u industriji i aerotehnici.

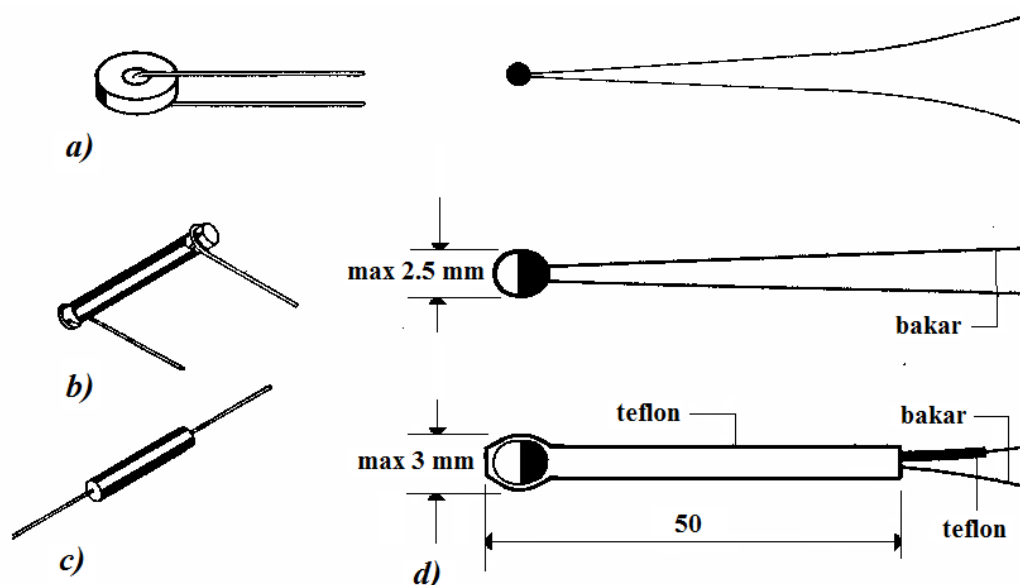
Bakarna žična otpornička osjetila temperature imaju linearnu karakteristiku, ali zbog malog otpora bakra izvedbe su im sa neprikladno dugom žicom. Upotrebljavaju se u području od -195°C do +260°C.

Volframova žična otpornička osjetila temperature skupa su i upotrebljavaju se kada je potrebno obuhvatiti široko mjerno područje. Mjerno im je područje od -268°C do +1100°C.



Sl.2.62. Izvedbe otporničkih pretvornika temperature

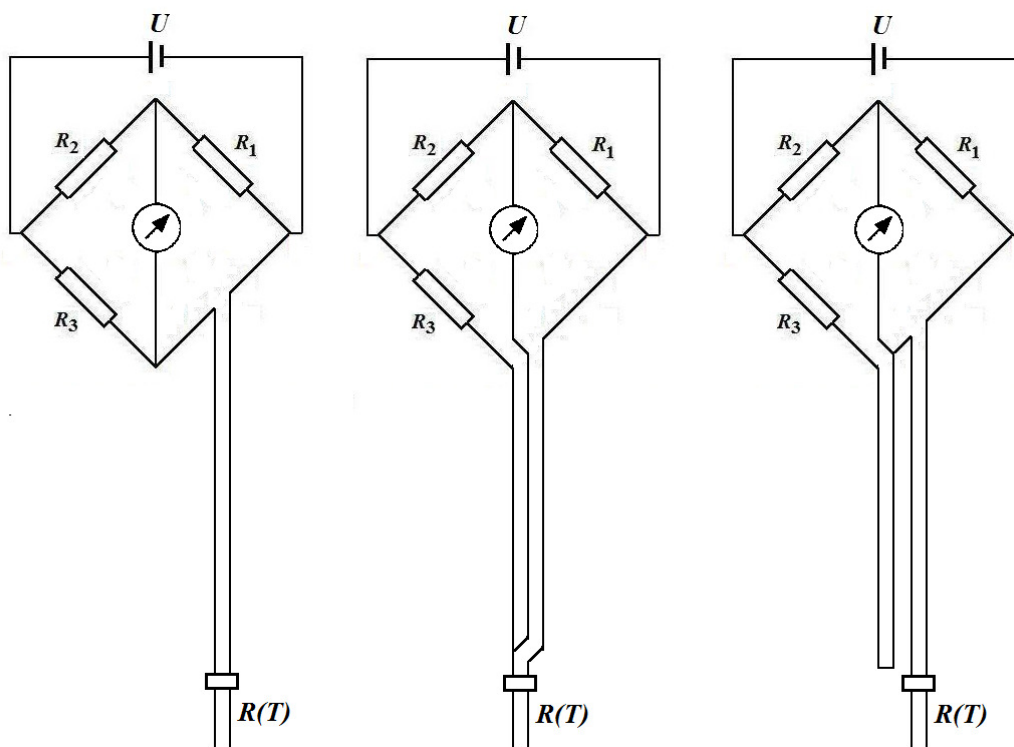
Od **poluvodičkih otporničkih osjetila** temperature najviše se primjenjuju **termistori**. Izrađuju se od smjesa sulfida ili oksida kovina kao što su magnezij, nikal, bakar, željezo i uran. Glavne značajke su im veliki otpor, veliki negativni temperaturni koeficijent otpora. Izvode se u obliku ploča, kuglica, štapića ili zrna (sl.2.63.).



Sl.2.63. Izvedbe termistora: a) pločasti, b) i c) štapićasti, d) kuglasti i zrnasti

Mjerno područje termistora su od -75°C do 250°C , ali postoje i posebne izvedbe za mjerenje vrlo niskih temperatura do -250°C .

Za mjerna osjetila u području vrlo niskih temperatura koriste se **ugljična otpornička osjetila** za temperature od 1 do 20K i germanijeva otpornička osjetila za temperature od 0.5 do 100K.



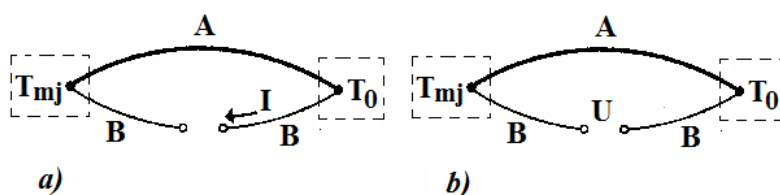
Sl.2.64. Otpornička osjetila temperature u spoju Wheatstoneova mosta

2.8.3. Termoelektrični pretvornici temperature

Njemački fizičar Thomas Johann Seebeck uočio je da se u zatvorenom krugu što ga tvore dva metala stvara kontinuirana električna struja kad su spojišta ovih metala izložena različitim temperaturama. Ta Seebeckova pojava tumači se pomoću sl.2.65. Prema toj slici žice od materijala A i B spojene su u krug, pa im je jedno spojište izloženo temperaturi T_{mj} , a drugo referentnoj temperaturi T_0 . Pomoću ampermetra beskonačno malog unutarnjeg otpora motri se nastala termoelektrična struja I , ili se pomoću voltmetra beskonačno velikog unutarnjeg otpora motri termoelektromotorna sila tj. napon U . Vrijednost razvijene elektromotorne sile zavisi od materijala žice i razlike temperatura $T_{mj} - T_0$. Ovakav spoj žice naziva se termopar.

Pretvornici temperature s termoparovima izrađuju se u mnogim kombinacijama od kojih se u praksi najčešće primjenjuju dani su u tablici:

Termopar	Za temperature
Bakar - konstantan	$-200 \div 600^{\circ}\text{C}$
Željezo – konstantan	$-200 \div 900^{\circ}\text{C}$
Nikal – Cromnikal	$0 \div 1200^{\circ}\text{C}$
Platina – Platina Rhodij	$0 \div 1600^{\circ}\text{C}$



Sl.2.65. Tumačenje Seebeckove pojave

Lako je uočiti da se ovim ostvaruje pretvorba toplinske energije u električnu. Pojava je iskorištena kao temelj za termoelektrično mjerenje temperature.

2.9. Pretvornici mjernih signala u standardizirana mjerna područja

U periodu razvoja tehnike mjerenja neelektričnih veličina nastalo je mnogo vrsta izvedbi mjernih slogova. Te su se izvedbe po načelima rada, građi, mjernim područjima, vrstama energije mjernih signala. Tak se razvilo mnogo mjernih slogova koji su bili međusobno nezamjenjivi. To je često puta dovodilo da se istu mjernu veličinu trebalo mjeriti više puta ukoliko ju je trebalo istodobno pokazivati, registrirati ili koristiti za vođenje procesa.

Danas se mjerni slogovi izvode tako, da se mjerni signali neelektričnih veličina, pretvaraju iz primarne u sekundarnu neelektričnu veličinu, zatim se pretvore u proporcionalnu električnu veličinu, a on se zatim pretvori u standardizirani (normirani) naponski ili strujni signal. Ponekad se signali neelektričnih veličina pretvaraju u standardizirane pneumatske ili hidrauličke standardizirane signale.

Najčešća mjerna područja suvremenih standardiziranih mjernih signala prikazani su u tablici.

Standardizirani mjerni signali	Mjerno područje
Naponski signal (istosmjerni ili izmjenični)	0.....1 mV
	0.....50 mV
	0.....500 mV
	0.....3 V
	0.....5 V
Strujni signal (istosmjerni)	0.....1 mA
	0.....5 mA
	0.....20 mA
	0.....50 mA
Pneumatski signal	0.2.....1 bar
Hidraulički signal	1.....10 bar

Komparatori ili usporednici (sklopovi za uspoređivanje) su karakteristični dijelovi regulacijskih krugova čiji je zadatak uspoređivanje stvarne (y_p) i željene vrijednosti regulirane veličine (x). Komparatori, zapravo izvode jednostavne računske operacije zbrajanja ili oduzimanja stvarne vrijednosti izlazne (y_p) i željene vrijednosti regulirane veličine (x), odnosno regulacijsko odstupanje ($\varepsilon = x - y_p$). Predznak regulacijskog odstupanja je jednak predznaku veće vrijednosti, odnosno željene ili stvarne vrijednosti regulirane veličine.

Regulator je važan, a vrlo često i najsloženiji element automatske regulacije, odnosno sustava automatskog vođenja procesa. Glavna zadaća regulatora je da na svako regulacijsko odstupanje preko postavnog motora i postavne sprave djeluje na objekt ili proces upravljanja tako da reguliranu veličinu ponovo dovede u zadanu (željenu) vrijednost.

Izvršni dijelovi (slogovi) sustava automatskog upravljanja jesu **postavni motori i postavne sprave**. Postavni ili izvršni motor pokreću postavnu spravu.

Postavne sprave kao važan dio regulacijskog kruga i kroz njih najčešće prolazi postavna struja energije ili materije. Postavne sprave su različite vrste ventila, sklopki itd.

3.2. Prijenosne funkcije

Svaki dio zatvorenog regulacijskog sustava može se smatrati komponentom ako obavlja neku obradu ulaznog signala. Primjeri su komparator, regulator, pojačalo, postavni motor, ventil, filter, mjerni član, itd. Proučavanje pojedinačnih komponenata je prilično jednostavno u odnosu na proučavanje sustava u cjelini zbog međusobnih utjecaja. Za opis dinamičkog ponašanja kontinuiranih sustava primjenjuju se diferencijalne jednačbe. Svaka komponenta i čitavi sustav opisuju se diferencijalnim jednačbama. Kako je rad s njima dosta težak, za opis linearnih sustava rabe se i prijenosne funkcije. Linearna diferencijalna jednačba pretvara se u običnu algebarsku jednačbu pomoću Laplaceove transformacije. Radi se s kompleksnim brojevima. Grafički prikaz je u Gaussovoj kompleksnoj ravnini. Laplaceova transformacija povezuje vremensko i frekvencijsko područje. U posebnom slučaju, kada kompleksni broj nema realnog dijela, nastaje frekvencijska prijenosna funkcija.

Prijenosna funkcija na jednostavan način povezuje pobudu i odziv. To je formalizirani analitički prikaz gdje se zanemaruju razne fizikalne osobine pa tako istosmjerni motor, elektroničko pojačalo ili hidrauličko pojačalo mogu imati jednaku prijenosnu funkciju.

Prijenosna funkcija je omjer u kompleksnu području izlaznog i ulaznog signala pri nultim početnim uvjetima.

Nulti početni uvjeti znak da su sve promjenljive veličine (varijable) u sustavu jednake nuli u trenutku početka djelovanja pobude, odnosno sustav se nalazi u ravnotežom stanju na početku ispitivanja.

Općenito, prijenosna funkcija ima oblik razlomljene racionalne funkcije. To znači da ima oblik razlomka koji ima polinome i u brojniku i u nazivniku. Stupanj polinoma u brojniku je manji nego u nazivniku.

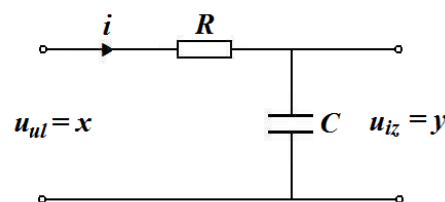
Prijenosne funkcije se označavaju slovima (G , H , F , W).

Odredimo prijenosnu funkciju RC – člana (sl.3.2.).

Koristeći se kompleksnim područjem odredimo ulazni i izlazni napon.

$$u_{ul} = x = i \cdot R + i \cdot jX_c = i \cdot (R + jX_c) = i \cdot \left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)$$

$$u_{iz} = y = i \cdot jX_c = i \cdot \frac{1}{j\omega C}$$



Sl.3.2. RC – član

Kako prijenosna funkcija predstavlja omjer ulaznog i izlaznog signala to je:

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{i \cdot \frac{1}{j\omega C}}{i \cdot (R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

Dakle prijenosna funkcija RC – člana je:

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

Primjer jedne složene prijenosne funkcije je:

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{3(j\omega)^2 + 2(j\omega) + 4}{2(j\omega)^3 + 4(j\omega)^2 + 5(j\omega) + 1}$$

Korijeni polinoma u nazivniku se zovu **polovima** prijenosne funkcije. Oni moraju biti u lijevoj poluravnini Gaussove kompleksne ravnine za stabilne sustave. Korijeni polinoma u brojniku se nazivaju **nulama** prijenosne funkcije.

Prijenosne funkcije se grafički prikazuju pomoću **blokovskih dijagrama** (strukturnih shema ili strukturnih blokova). Često govorimo o blokovskom prikazu (sl.3.3.).



Sl.3.3. Grafički prikaz prijenosne funkcije pomoću bloka

3.3. Blokovska algebra

Linearni dinamički sustavi sastoji se od više komponenti. Komponente se opisuju diferencijalnim jednadžbama, prijenosnim funkcijama ili frekvencijskim karakteristikama. Kada se sve komponente sustava opišu jednadžbama, obično je teško doći do diferencijalne jednadžbe ili prijenosne funkcije čitavog zatvorenog sustava. Međutim, svaku komponentu možemo prikazati blokom. Kada sve komponente sustava prikažemo blokovima i međusobno ih povežemo dobijemo strukturnu shemu ili blokovski dijagram. On pokazuje od kakvih se elemenata sastoji sustav i kako su ti elementi spojeni. Dosta jednostavnim postupcima može se doći do prijenosne funkcije složenog sustava. Složena shema se pojednostavni i konačno se svede na jedan blok. On predočava ukupnu prijenosnu funkciju koja jednostavno povezuje odziv i pobudu. Kako je riječ o linearnim sustavima primjenjuje se načelo (princip) superpozicije. Iz blokovskog dijagrama pomoću jednostavnih algebarskih operacija sažima se broj blokova sve do rješenja. Taj postupak ima naziv **algebra blokova ili blokovska algebra**.

Za spajanje blokova vrijede slijedeće pretpostavke.

1. Nema protudjelovanja unutar bloka – izlazna veličina ne djeluje na ulaznu
2. Djelovanje bloka je **jednosmjerno** – promjena ulaznih veličina djeluje na izlazne i to u pravilu s nekim kašnjenjem
3. Ulazne i izlazne veličine bloka povezane su JEDNOZNAČNO (isključuju se pojave poput histereze ili labavosti)

U blokovskoj algebri koriste se samo nekoliko grafičkih elemenata, bez obzira na složenost sustava:

1. Strelica koja označava smjer signala (sl.3.4.a.)

2. Točka račvanja ili grananja (sl.3.4.b.)

- nema toka energije (struja, protok)
- signal se prenosi ili električnim naponom ili tlakom (pneumatski, hidraulični)

3. Točka zbrajanja (sl.3.4.c.)

- pri prijenosu signala postoji tok energije (električna struja, protok)
- uz točku račvanja stavljamo i predznake signala

4. Blok koji označava prijenosnu funkciju (sl.3.4.d.)

U blokovskoj algebri postoje tri osnovna spoja blokova:

1. Serijski spoj
2. Paralelni spoj
3. Spoj s povratnom vezom

a)

b)

c)

d)

Sl.3.4. Grafički elementi blokovske algebre

3.3.1. Serijski spoj

Za serijski spoj prijenosna funkcija se može jednostavno odrediti primjenom algebarskih svojstava prijenosne funkcije.

$$G = \frac{Y}{X}$$

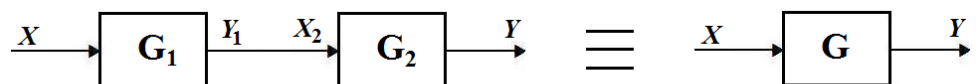
$$X_2 = Y_1$$

$$Y_1 = G_1 X$$

$$Y = G_2 X_2 = G_2 Y_1 = G_2 G_1 X$$

$$G = \frac{Y}{X} = \frac{X G_1 G_2}{X}$$

$$G = G_1 G_2$$



Sl.3.6. Serijska veza blokova

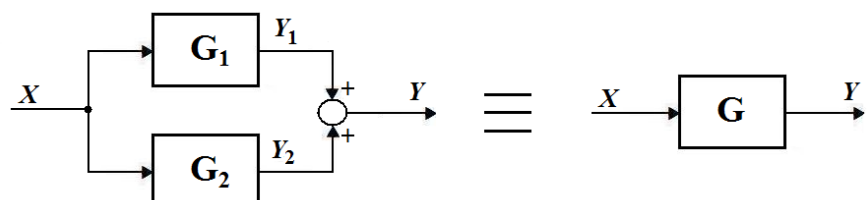
3.3.2. Paralelni spoj

Odredimo prijenosnu funkciju paralelnog spoja blokova.

$$G = \frac{Y}{X}$$

$$Y_1 = G_1 X$$

$$Y_2 = G_2 X$$



Sl.3.7. Paralelna veza blokova

$$Y = Y_1 + Y_2$$

$$G = \frac{Y}{X} = \frac{Y_1 + Y_2}{X} = \frac{G_1 X + G_2 X}{X} = \frac{X(G_1 + G_2)}{X}$$

$$G = G_1 + G_2$$

3.3.3. Spoj s povratnom vezom

U automatici se redovito primjenjuje negativna povratna veza (sl.3.8.). Odredimo ekvivalentnu prijenosnu funkciju spoja s povratnom vezom.

$$G = \frac{Y}{X}$$

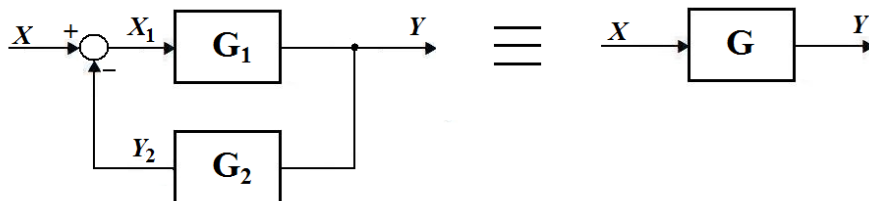
$$Y = G_1 X_1$$

$$Y_2 = G_2 Y = G_1 G_2 X_1$$

$$X_1 = X - Y_2 \Rightarrow X = X_1 + Y_2$$

$$G = \frac{Y}{X} = \frac{G_1 X_1}{X_1 + Y_2} = \frac{G_1 X_1}{X_1 + G_1 G_2 X_1} = \frac{G_1 X_1}{X_1 (1 + G_1 G_2)}$$

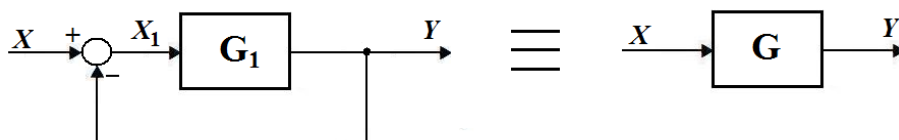
$$G = \frac{G_1}{1 + G_1 G_2}$$



Sl.3.8. Spoj blokova s povratnom vezom

Poseban slučaj povratne veze je jedinična povratna veza (sl.3.9.). Taj slučaj nastaje ako je prijenosna funkcija u grani povratne veze jednaka jedan ($G_2 = 1$). Prijenosna funkcija ovog spoja je:

$$G = \frac{G_1}{1 + G_1}$$



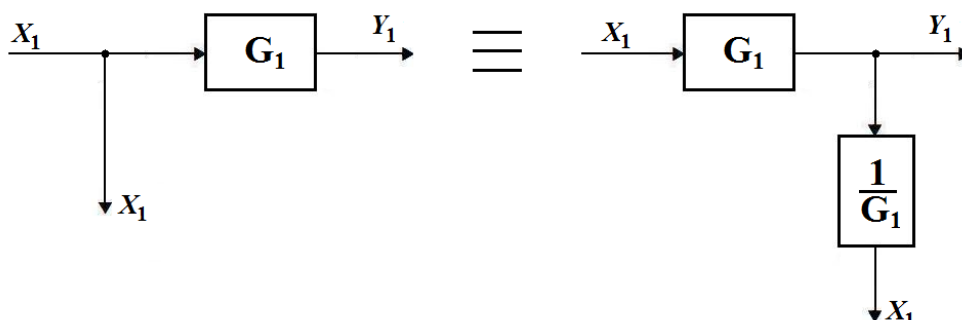
Sl.3.9. Spoj s jediničnom povratnom vezom

3.3.4. Pravila transformacije shema

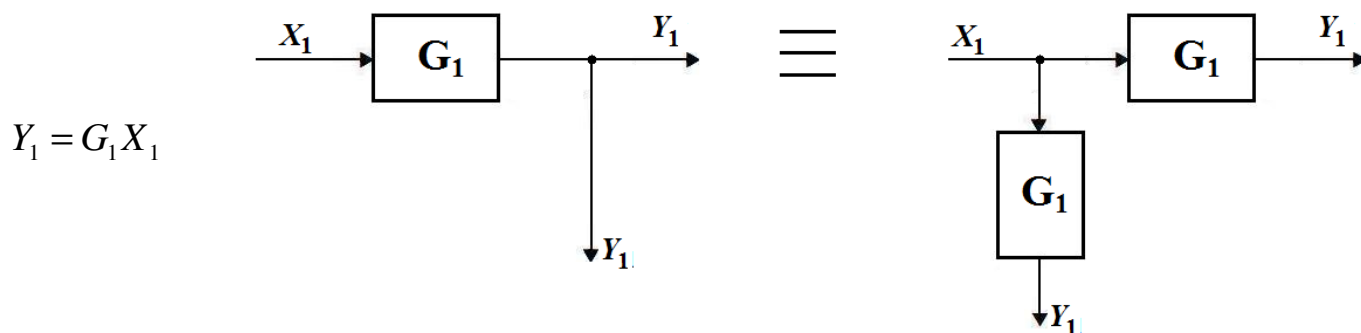
Pri radu sa blokovima i transformacijama blokovskih dijagrama može u nekim slučajevima biti zahtjevnije pa se koriste gotova pravila.

1. Prebacivanje točke račvanja iza bloka ili bloka ispred točke račvanja

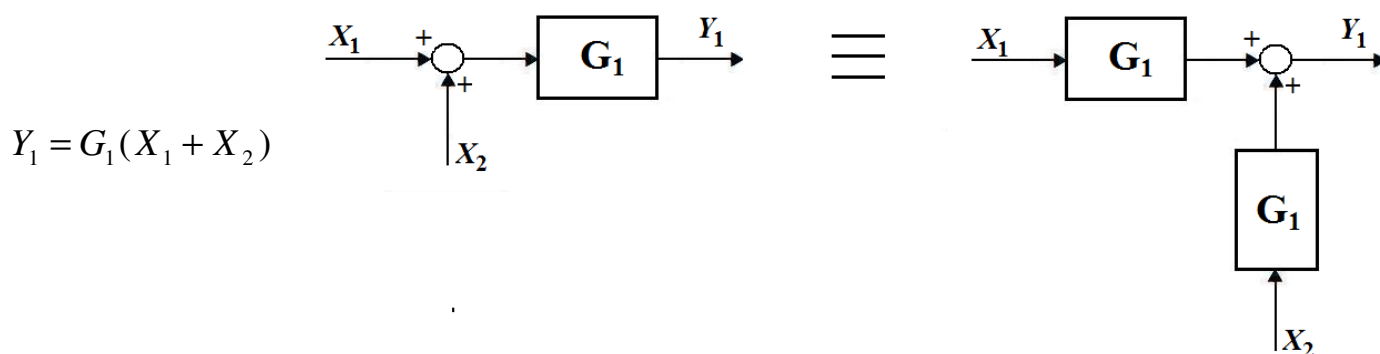
$$Y_1 = G_1 X_1$$



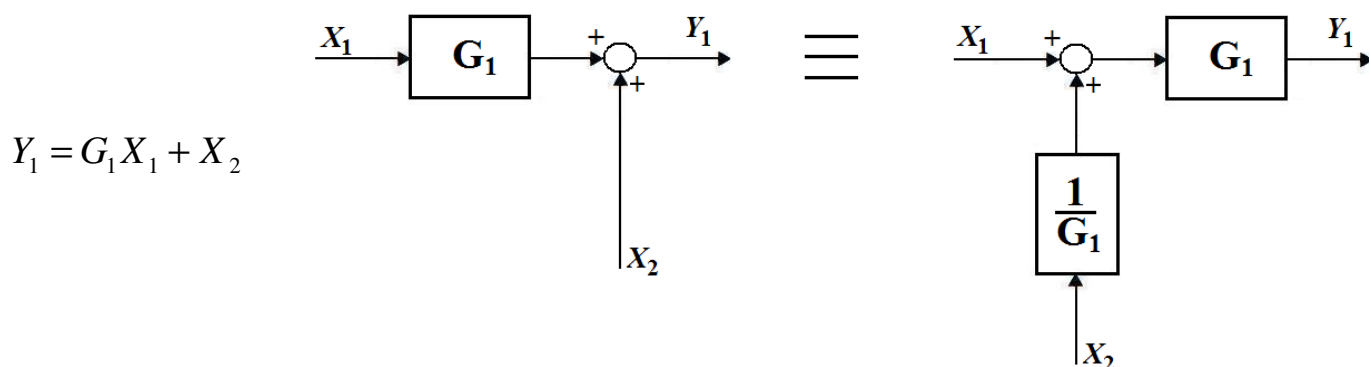
2. Prebacivanje točke račvanja ispred bloka ili bloka iza točke račvanja



3. Prebacivanje mjesta zbrajanja iza bloka ili bloka ispred mjesta zbrajanja

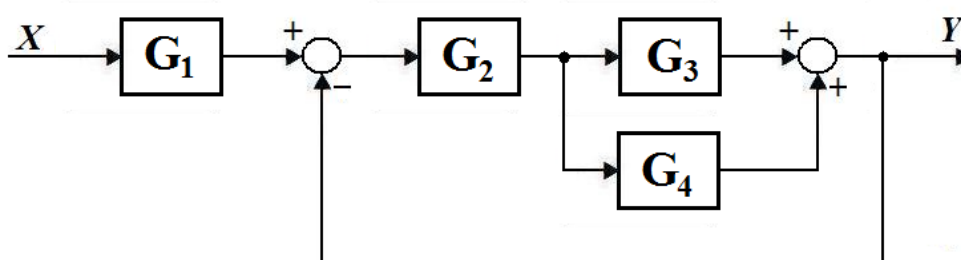


4. Prebacivanje mjesta zbrajanja ispred bloka ili bloka iza mjesta zbrajanja

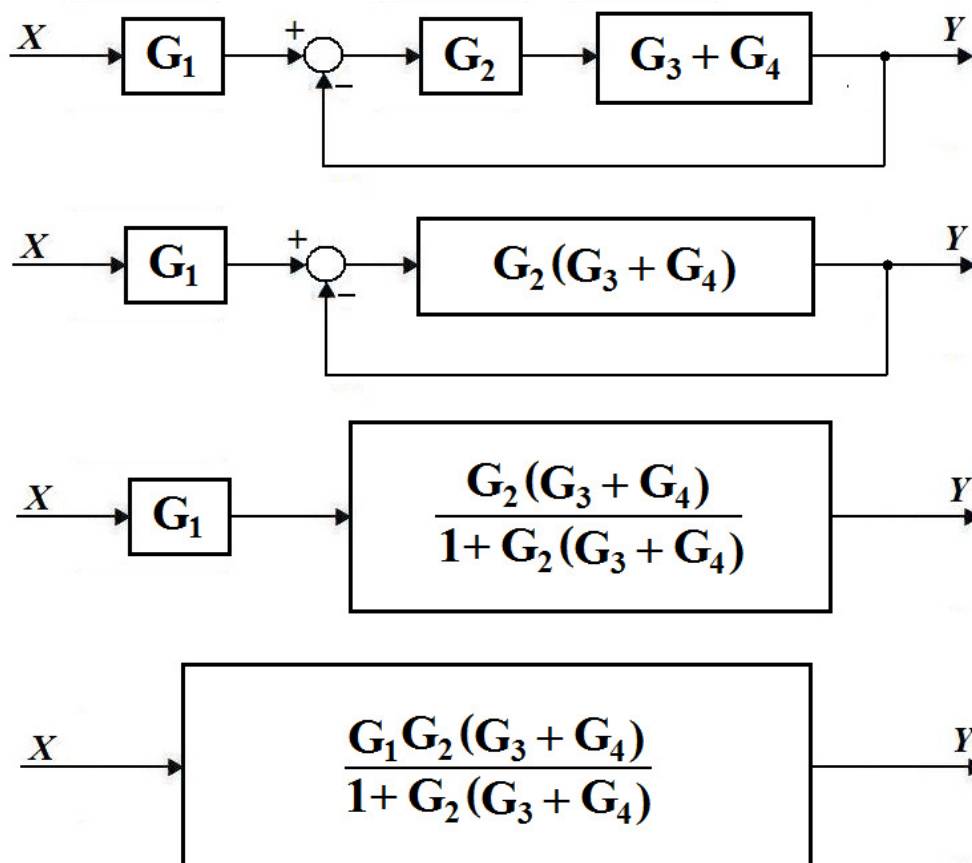


3.3.5. Primjeri transformacije shema

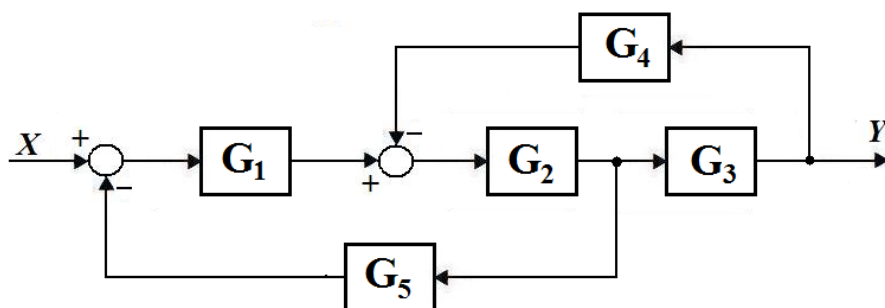
Primjer 1. Odredite prijenosnu funkciju sklopa:



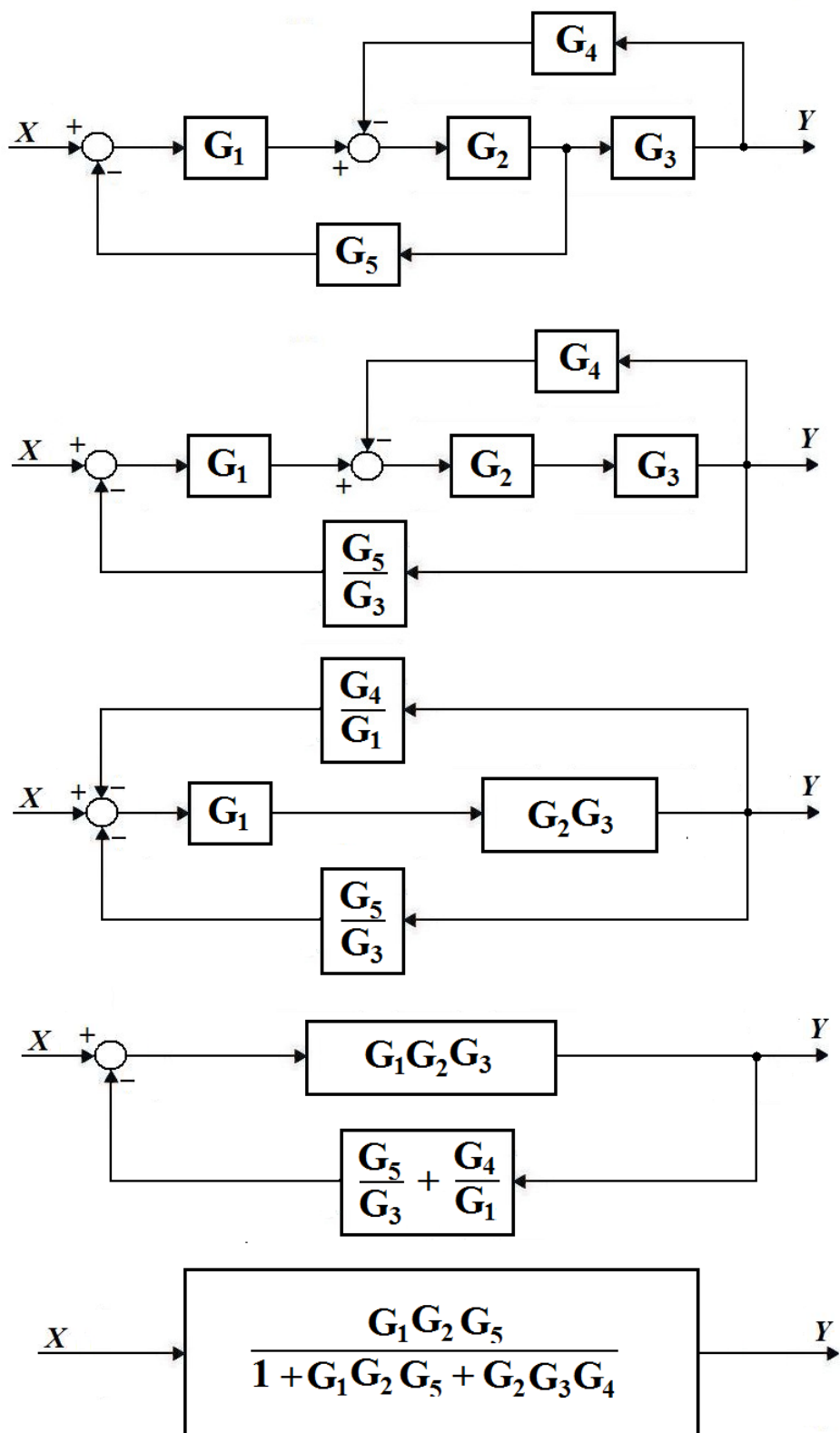
Rješenje:



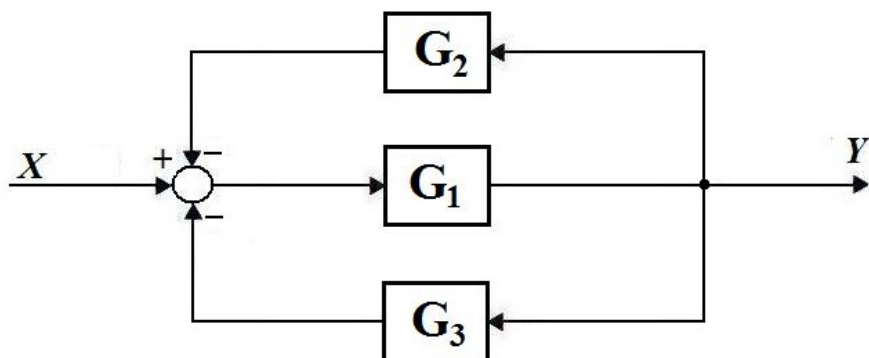
Primjer 2. Odredite prijenosnu funkciju sklopa:



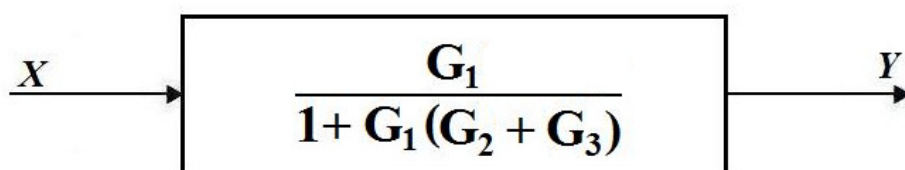
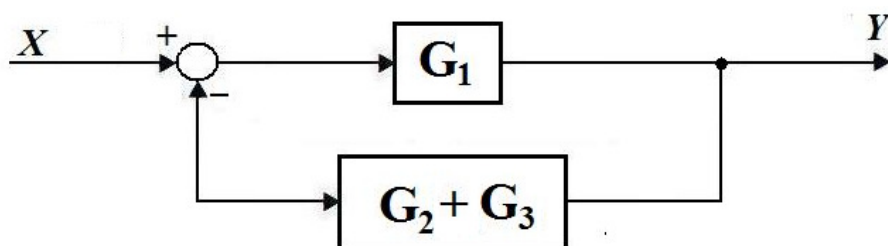
Rješenje:



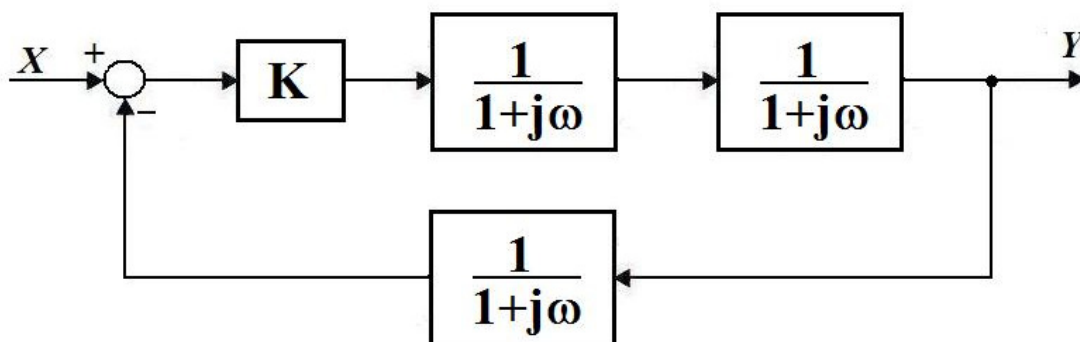
Primjer 3. Odredite prijenosnu funkciju sklopa:



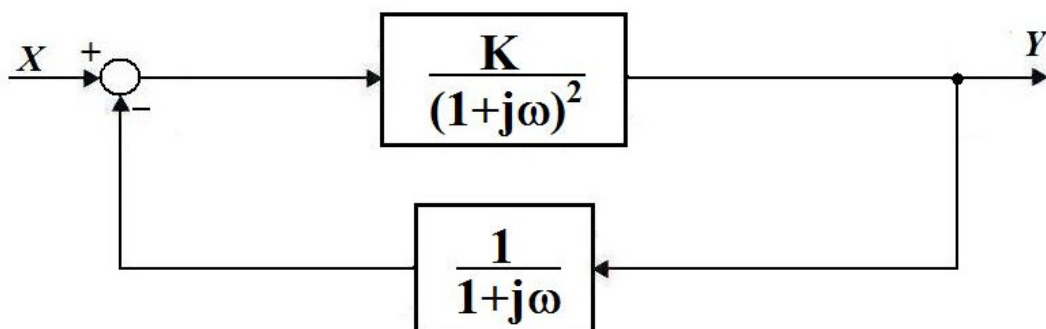
Rješenje:

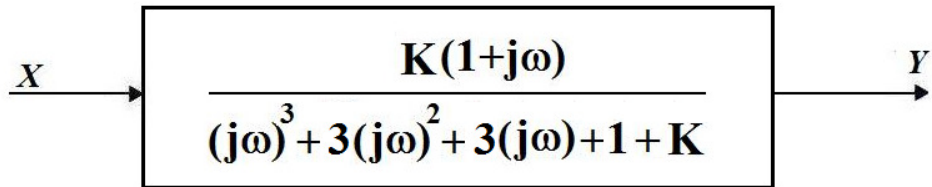
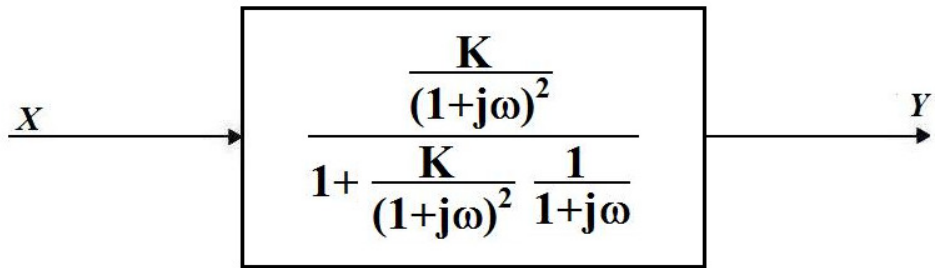


Primjer 4. Odredite prijenosnu funkciju sklopa:



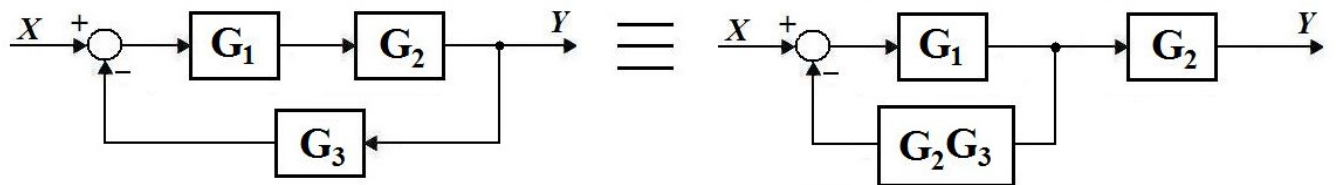
Rješenje:



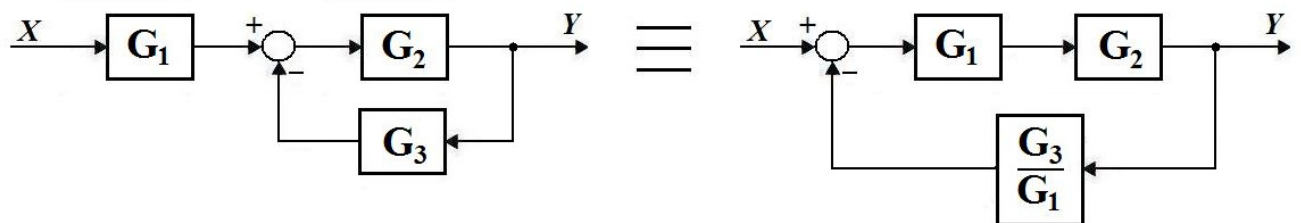


Zadaci

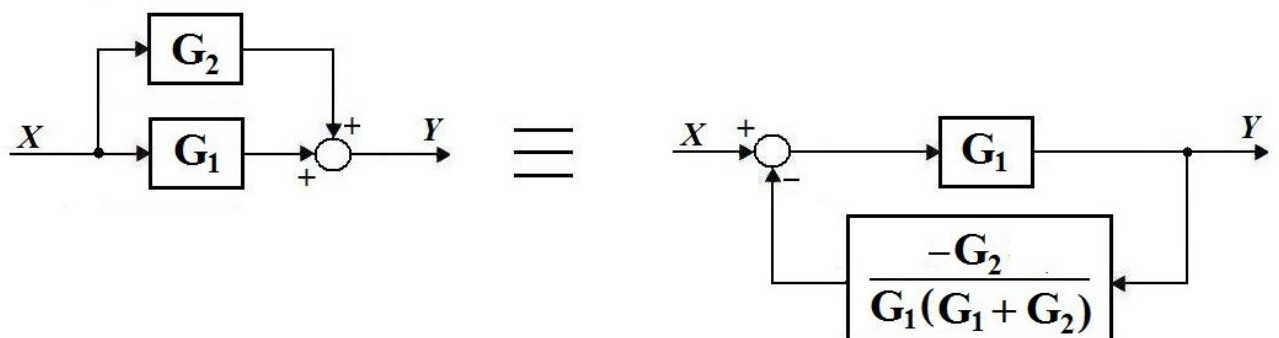
1. Dokažite ekvivalentnost sljedećih strukturnih shema tako da ih svedete na jedan blok.



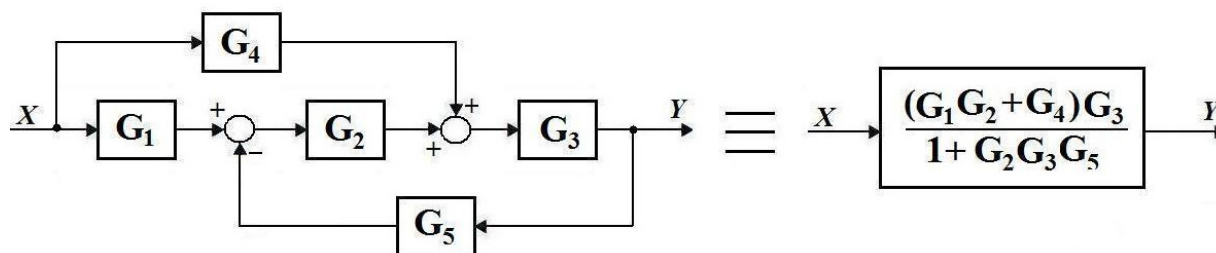
2. Dokažite ekvivalentnost sljedećih strukturnih shema tako da ih svedete na jedan blok.



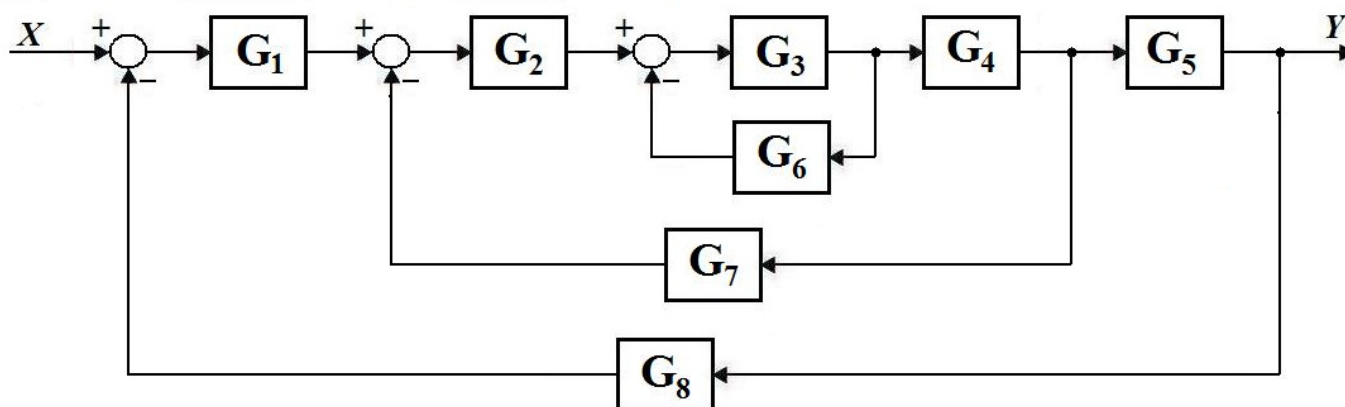
3. Dokažite ekvivalentnost sljedećih strukturnih shema tako da ih svedete na jedan blok.



4. Transformirajte strukturnu shemu i dokažite ekvivalentnost.



5. Transformirajte strukturnu shemu svođenjem na jedan blok.



3.4. Osnovne vrste regulatora

Ima više podjela regulatora na osnovne vrste. Razvrstavaju se prema načinima iskorištavanja energije, prema vrstama prenošenih signala i vrstama signala s kojima djeluju na izvršne dijelove regulacijskih sustava.

Prema vrsti prenošenih signala regulatori se dijeli na dvije osnovne skupine:

- regulatore s kontinuiranim djelovanjem i
- regulatore s diskretnim djelovanjem.

Regulatori s kontinuiranim djelovanjem daju neprekidne izlazne signale i njima pokreću izvršne dijelove krugova u određenom smjeru i zadržavaju ih u određenom položaju.

Regulatori s diskretnim djelovanjem daju isprekidane izlazne signale koji na izvršne dijelove kruga djeluju u impulsima.

Ove se dvije vrste regulatora često ne mogu jasno razlučiti. Primjerice, neke vrste impulsnih regulatora djeluju tako da primaju kontinuirane signale, prerađuju ih u impulsne oblike, dalje ih pojačavaju ili oblikuju, a onda njima djeluju na izvršne dijelove regulacijskih sustava. Tako rezultati njihova djelovanja postaju jednaki kao i u kontinuiranim regulatora.

3.4.1. Regulatori s kontinuiranim djelovanjem

Ovi automatski regulatori nazvani su prema obliku izlaznih signala. Ti regulatori na svojim izlazima daju kontinuirane izlazne signale, koje generiraju na poticaj svakog regulacijskog odstupanja. S pomoću takvih signala izvode se i kontinuirani pomaci izvršnih dijelova postavnih motora i pomaci postavnih sprava. Regulatori generiraju izlazne signale, sve dok se regulacijsko odstupanje ne smanji na minimalnu dopuštenu vrijednost.

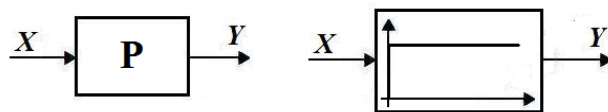
Na temelju dinamičkih karakteristika razlikujemo mnogo vrsta kontinuiranih regulatora:

- P-regulator,
- I-regulator,
- PI-regulator,
- PD-regulator i
- PID-regulator.

D-regulator i DI-regulator se ne koriste. Najvažniji su P, PI, PID-regulatori, a manje se koriste I i PD.

3.4.1.1. P- regulator

P-regulatori su kontinuirani regulatori s proporcionalnim djelovanjem. To su najjednostavniji regulatori s kontinuiranim djelovanjem. Postoje električne, hidrauličke i pneumatske izvedbe P - regulatora. Na sl.3.15. prikazani su grafički simboli P – regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.



Sl.3.15. Grafički simboli P - regulatora

Izlazna veličina svih izvedbi P- regulatora može se opisati jednostavnim matematičkim izrazom:

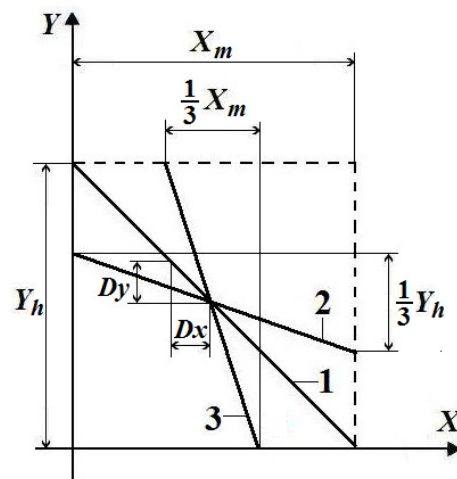
$$y_P = K_p \cdot x$$

Osnovne karakteristične veličine P-regulatora mogu se odrediti s pomoću njihovih statičkih karakteristika prikazanih na sl.3.16. Karakteristike su pravci. Nagib karakteristike određen je pojačanjem (K_p) ili osjetljivošću regulatora.

$$K_p = \frac{Dy}{Dx}$$

Veći nagib karakteristike znači i veće pojačanje regulatora (karakteristika 3 na sl.3.16.), a manji nagib karakteristike znači malo pojačanje regulatora (karakteristika 2 na sl.3.16.). Regulatori se grade tako da im se može mijenjati pojačanje.

Karakteristična veličina kojom se definira djelovanje P-regulatora je proporcionalno područje X_P . Proporcionalno područje naziva se i proporcionalnim opsegom. Proporcionalno područje je obrnuto proporcionalna pojačanju regulatora ($X_P = k/K_p$), pa veliko pojačanje regulatora znači malo proporcionalno područje i obrnuto. Izraz za proporcionalno područje regulatora može se izvesti sa statičkim karakteristikama regulatora na sl.3.16.



Sl.3.16. Statička karakteristika P - regulatora

$$X_p = \frac{\frac{Dx}{X_m}}{\frac{Dy}{Y_h}} \cdot 100$$

gdje su: Dx – regulacijsko odstupanje,

Dy – promjena izlazne veličine regulatora,

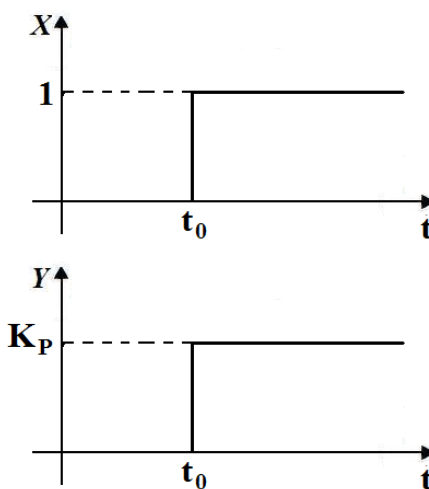
X_m – područje reguliranja regulirane veličine,

Y_h – maksimalna moguća promjena izlazne veličine regulatora i

100 je brojčani faktor s pomoću kojega se proporcionalno područje izražava u postocima.

Na sl.3.16. vidi se da za pravac 1 kada je koeficijent pojačanja regulatora $K_p = 1$ proporcionalno područje X_p je ugođeno na 100%, što znači da će promjena ulazne veličine od vrijednosti 0 do vrijednosti X_m izazivati promjenu izlazne veličine regulatora od 0 do Y_h . Ako je pojačanje regulatora veće od jedinice (pravac 3 na sl.3.16. gdje je $K_p = 3$) proporcionalno područje je 33% te promjena ulazne veličine od $0.33X_m$ do $0.66X_m$ izaziva punu promjenu izlazne veličine. Kada je pojačanje regulatora manje od jedinice (pravac 3 na sl.3.16. gdje je $K_p = 1/3$) proporcionalno područje je veće od 100% (u našem slučaju $X_p = 300\%$) te promjena ulazne veličine od 0 do X_m (puna promjena ulazne veličine) izaziva tek 1/3 promjenu izlazne veličine.

Dinamičke karakteristike regulatora pokazuju vremensku ovisnost izlazne veličine o promjenama ulazne veličine. Dinamiku P-regulatora pokazat ćemo pomoću prijelazne karakteristike na odskočne funkcije (sl.3.17.).



Sl.3.17. Dinamika P - regulatora

Primjer izvedbu elektroničkog P-regulatora s operacijskim pojačalom prikazano je na sl. 3.18. Prije nego odredimo prijenosnu funkciju P – regulatora prisjetimo se osnovnim osobina idealnog operacionog pojačala:

- beskonačno veliko naponsko pojačanje
- beskonačno velik ulazni otpor
- beskonačno mali izlazni otpor
- frekvencijski opseg od 0 do ∞
- prividno kratki spoj između ulaznih stezaljki

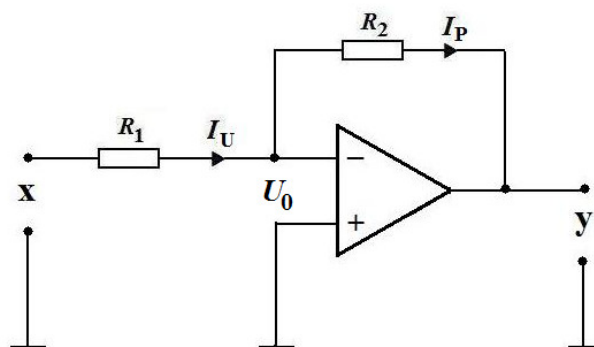
Uzimajući u obzir karakteristike operacionog pojačala, jasno je da je:

$$I_U = I_P \quad \text{i} \quad U_0 = 0$$

Sada možemo odrediti ulazni napon x i izlazni napon y

$$x = I_U R_1$$

$$y = -I_P R_2 = -I_U R_2$$



Sl.3.18. Invertirajuće pojačalo kao P - regulator

Matematička izražena ovisnost izlaznog o ulaznom signalu je:

$$y = -I_U R_2 = -\frac{x}{R_1} R_2$$

$$y = -\frac{R_2}{R_1} x = -K_P x$$

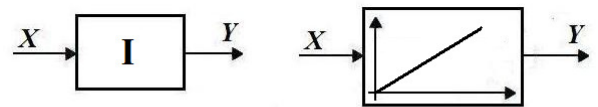
Budući da je prijenosna funkcija omjer u kompleksnu području izlaznog i ulaznog signala pri nultim početnim uvjetima, slijedi:

$$G_P = \frac{y}{x} = -\frac{R_2}{R_1} = -K_P$$

3.4.1.2. I- regulator

I – regulator je jedinica sa integracijskim djelovanjem. Na sl.3.20. prikazani su grafički simboli I – regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.

Osnovna značajke jedinica s integracijskim djelovanjem je akumuliranje energije ili materije. Pored ove spomenuti ćemo još samo one osobine koje se odnose na definiranje osnovnih svojstava I-regulatora. To su karakteristične veličine koje se mogu objasniti i s pomoću njegove prijelazne karakteristike pokazane na sl.3.21.



Sl.3.20. Grafički simboli I - regulatora

Prijelazne karakteristike prikazana je kada je ulazni signal normiranoga skokovitog oblika. Na slici je prijelazne karakteristike I-regulatora pokazane su za dva slučaja vrijednosti ulaznih signala (x , i $2x$). Nagib, odnosno brzina porasta izlaznog signala I-regulatora razmjerna je vrijednosti promjena njegovog ulaznog signala. Zato I-regulator na dvostruko veći ulazni signal ($2x$) daje dvostruko brži porast izlaznog signala ($2y_1$).

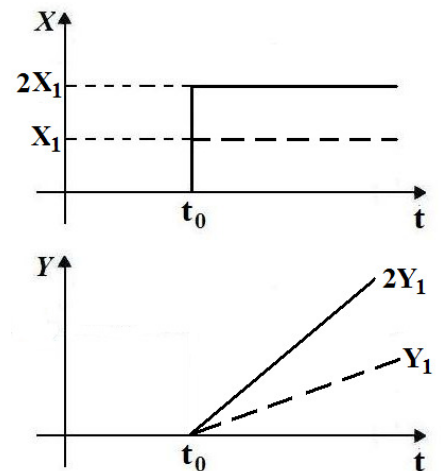
Matematički izraz za izlazni signal I-regulatora, u pojednostavnjenu obliku, glasi:

$$y_I = K_I \cdot x \cdot t$$

gdje su: K_I - pojačanje I-regulatora,

x - trenutačna vrijednost ulazne regulirane i

t - vrijeme djelovanja ulaznog signala.



Sl.3.21. Dinamika I - regulatora

Osnovna karakteristična veličina I-regulatora je integracijsko vrijeme (T_I). Ono će biti definirano kod opisa osnovnih veličina PI-regulatora.

Dvije najvažnije osobine I-regulatora koje se mogu vidjeti iz karakteristika I – regulatora su:

- I – regulator ne ostavlja nikakva regulacijska odstupanja, odnosno da djeluju maksimalno točno i
- I – regulatori su spori, a da brzina njihovog djelovanja ovisi o vrijednosti ulaznih veličina, odnosno o vrijednosti regulacijskog odstupanja.

Njihovo sporo djelovanje nije pogodno za reguliranje brzih procesa, odnosno procesa koji se vladaju kao

P-jedinice. Zbog toga se u reguliranju spomenutih procesa I-regulatori rijetko samostalno primjenjuju.

Primjer izvedbu elektroničkog I - regulatora s operacijskim pojačalom prikazano je na sl. 3.22. Odredimo prijenosnu funkciju I – regulatora.

Uzimajući u obzir karakteristike operacionog pojačala, jasno je da je:

$$I_U = I_P \quad \text{i} \quad U_0 = 0$$

Sada možemo odrediti ulazni napon x i izlazni napon y

$$x = I_U R$$

$$y = -I_P \frac{1}{j\omega C} = -I_U \frac{1}{j\omega C}$$

Matematička izražena ovisnost izlaznog o ulaznom signalu je:

$$y = -I_U \frac{1}{j\omega C} = -\frac{x}{R} \cdot \frac{1}{j\omega C}$$

$$y = -\frac{1}{j\omega RC} \cdot x$$

Budući da je prijenosna funkcija omjer u kompleksnu području izlaznog i ulaznog signala pri nultim početnim uvjetima, slijedi:

$$G_I = \frac{y}{x} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

3.4.1.3. PI- regulator

PI – regulator je spoj dva regulatora. P-regulatora, je regulator s brzim, ali netočnim djelovanjem i I-regulator koji ima sporo, ali točno djelovanje. Kako ni P niti I – regulator sa ovakvim svojstvima sam za sebe nije pogodan za reguliranje procesa u kojih je prijeko potrebno i brzo i točno reguliranje to u tu svrhu rabe kombinirani, PI-regulatori, koji istodobno imaju obje vrste djelovanja.

Može se smatrati da je PI – regulator paralelni spoj P i I – regulatora (sl.3.25.).

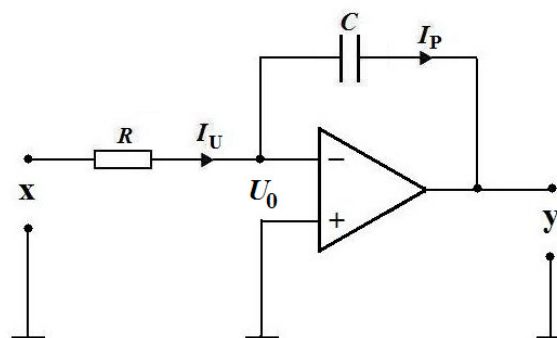
Matematički smo već opisali P i I – regulator:

$$y_P = K_p \cdot x$$

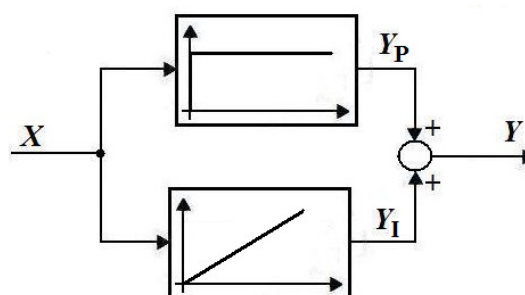
$$y_I = K_I \cdot x \cdot t$$

Pa će izraz koji matematički opisuje PI – regulator biti:

$$y_{PI} = K_p \cdot x + K_I \cdot x \cdot t = (K_p + K_I t) \cdot x$$

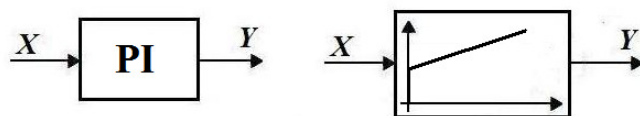


Sl.3.22. I-regulator izveden s operacionim pojačalom



Sl.3.25. PI-regulator kao spoj P i I - regulatora

Na sl.3.26. prikazani su grafički simboli PI – regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.



Sl.3.26. Grafički simboli PI - regulatora

Možemo sada definirati i prije spomenuto integracijsko vrijeme koje je karakteristično za I - regulatore, odnosno PI - regulatore. Ono se najjednostavnije određuje na njihovoj prijelaznoj karakteristici. Prema prijelaznoj karakteristici PI-regulatora, **integracijsko vrijeme (T_I) je vrijeme potrebno da PI-regulator samim I-djelovanjem postigne onu istu vrijednost izlaznog signala kao što ga postigne njegovo P-djelovanje u trenutku promjene ulazne veličine.**

Zbog velike točnosti, jednostavnoga ugađanja brzine djelovanja, mogućnosti reguliranja procesa s izjednačenjem i bez izjednačenja i najvećeg broja procesa s mrtvim vremenom, PI-regulatori se, praktično, i najčešće primjenjuju.

Primjer izvedbu elektroničkog PI - regulatora s operacijskim pojačalom prikazano je na sl. 3.28. Odredimo prijenosnu funkciju PI – regulatora.

Uzimajući u obzir karakteristike operacionog pojačala, jasno je da je:

$$I_U = I_P \quad \text{i} \quad U_0 = 0$$

Sada možemo odrediti ulazni napon x i izlazni napon y

$$x = I_U R_1$$

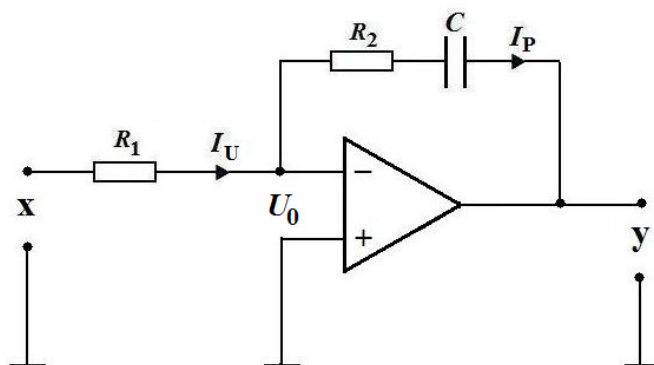
$$y = -I_P \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C} \right)$$

Matematička izražena ovisnost izlaznog o ulaznom signalu je:

$$y = -I_U \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C} \right) = -\frac{x}{R_1} \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C} \right)$$

$$y = -\frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C}}{R_1} \cdot x = -\frac{1 + j\omega R_2 C}{j\omega C R_1} \cdot x$$

$$y = -\frac{1 + j\omega R_2 C}{j\omega R_1 C} \cdot x$$



Sl.3.28. PI - regulator izveden s operacionim pojačalom

Budući da je prijenosna funkcija omjer u kompleksnu području izlaznog i ulaznog signala pri nultim početnim uvjetima, slijedi:

$$G_{PI} = \frac{y}{x} = -\frac{1 + j\omega R_2 C}{j\omega R_1 C}$$

U praktičnoj primjeni P - komponenta je dobra za prijelaznu pojavu, a I - komponenta za stacionarno stanje.

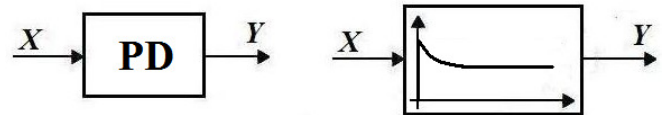
PI-regulatori su prikladni i za automatske sustave s mrtvim vremenom. Imaju veliku točnost i brzinu odziva. Oni su najčešća vrsta regulatora u reguliranim elektromotornim pogonima za regulaciju brzine vrtnje i struje.

3.4.1.4. PD - regulator

To su proporcionalno-derivacijski regulatori. Mogu se razmatrati kao paralelni spoj proporcionalnog i derivacijskog član u regulatoru. Na sl.3.31. prikazani su grafički simboli PD – regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.

Matematički izraz koji opisuje PD – regulator je

$$y_{PD} = K_P \cdot x + K_D \cdot \frac{dx}{dt}$$



Sl.3.31. Grafički simboli PD-regulatora

gdje su: K_P – pojačanje proporcionalnog člana,

K_D – pojačanje derivacijskog člana,

x - ulazna veličina i

$\frac{dx}{dt}$ - brzina promjene ulazne veličine

Njihova osnovna značajka je da im vrijednost izlazne veličine ne ovisi samo o iznosu regulacijskog odstupanja, već i o brzini promjene regulacijskog odstupanja. Zato im je u početku prijelazne pojave najveći iznos izlazne veličine, a u stacionarnom stanju je djelatna samo proporcionalna komponenta. Ovo djelovanje zorno se vidi na prijelaznoj karakteristici (sl.3.32.).

Primjer izvedbu elektroničkog PD - regulatora s operacijskim pojačalom prikazano je na sl. 3.32. Odredimo prijenosnu funkciju PD – regulatora.

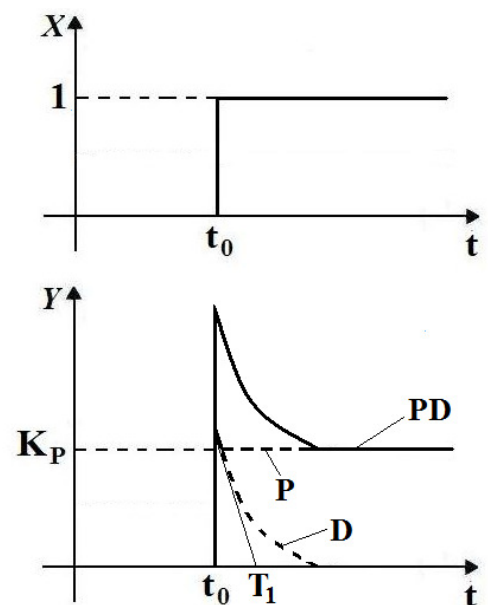
Uzimajući u obzir karakteristike operacionog pojačala, jasno je da je:

$$I_U = I_P \quad \text{i} \quad U_0 = 0$$

Sada možemo odrediti ulazni napon x i izlazni napon y

$$x = I_U R_1$$

$$y = -I_P \frac{R_2(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3})}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}} = -I_P \frac{R_2 + j\omega R_2 R_3 C_3}{1 + j\omega C_3(R_2 + R_3)}$$



Sl.3.32. Dinamika PD-regulatora

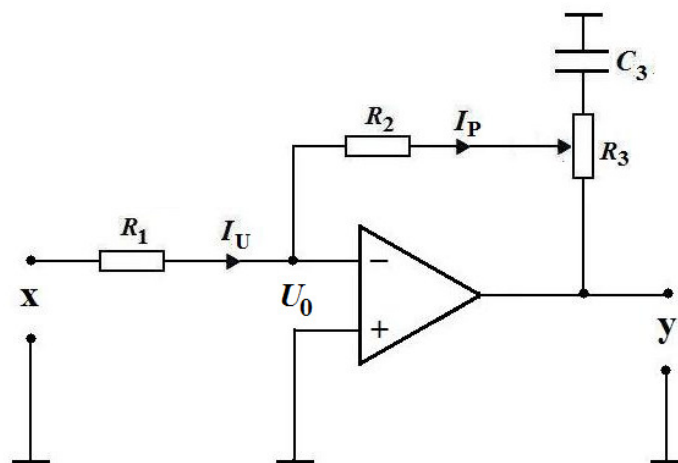
Matematička izražena ovisnost izlaznog o ulaznom signalu je:

$$y = -\frac{x}{R_1} = -\frac{R_2 + j\omega R_2 R_3 C_3}{1 + j\omega C_3 (R_2 + R_3)}$$

$$y = -\frac{1 + j\omega R_1 R_3 C_3}{1 + j\omega C_3 (R_2 + R_3)} \cdot x$$

Budući da je prijenosna funkcija omjer u kompleksnu području izlaznog i ulaznog signala pri nultim početnim uvjetima, slijedi:

$$G_{PD} = \frac{y}{x} = -\frac{1 + j\omega R_1 R_3 C_3}{1 + j\omega C_3 (R_2 + R_3)}$$

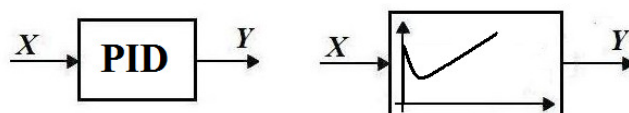


Sl.3.33. PD- regulator izveden s operacionim pojačalom

PD - regulatori nemaju veliku primjenu u tehničkoj praksi zbog osjetljivosti derivacijskog člana na smetnje. Primjenjuju se za reguliranje procesa čija regulirana veličina raste po eksponencijalnom zakonu u odnosu na ulaznu veličinu. Primjeri su održavanje smjera gibanja tijela u prostoru i održavanje položaja u prostoru.

3.4.1.5. PID – regulator

PID – regulatori su proporcionalno integracijsko derivacijski regulatori. Načelno se izvode kao paralelni spojevi triju regulatora: regulatora sa P-djelovanjem, I-djelovanjem i D-djelovanjem. Na sl.3.35. prikazani su grafički simboli PID – regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.



Sl.3.35. Grafički simboli PID - regulatora

Matematički izraz koji opisuje PID – regulator je

$$y_{PID} = K_P \cdot x + K_I \cdot x \cdot t + K_D \cdot \frac{dx}{dt}$$

PID - regulator ujedanju prednosti sva tri osnovna člana. P - regulator daje veliku brzinu odziva i stalno pojačanje, D - regulator povećava brzinu odziva i sprječava veliko regulacijsko odstupanje, a I - regulator daje točnost, jer potpuno uklanja grešku u stacionarnom stanju.

Prijelazna karakteristika PID – regulatora prikazana je na sl.3.36.

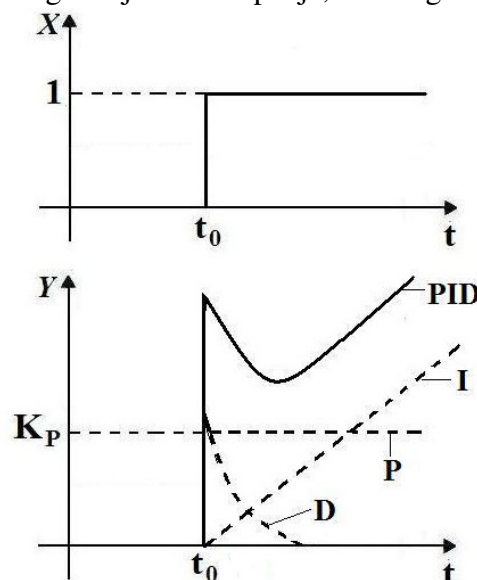
Primjer izvedbu elektroničkog PID - regulatora s operacijskim pojačalom prikazano je na sl. 3.37. Odredimo prijenosnu funkciju PID – regulatora.

Uzimajući u obzir karakteristike operacionog pojačala, jasno je da je:

$$I_U = I_P \quad \text{i} \quad U_0 = 0$$

Sada možemo odrediti ulazni napon x i izlazni napon y

$$x = I_U R_1$$



Sl.3.36. Dinamika PID - regulatora

$$y = -I_p \frac{(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2})(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3})}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_3}}$$

$$y = -I_p \frac{(j\omega)^2 R_2 R_3 C_2 C_3 + (j\omega)(R_2 C_3 + R_3 C_2) + 1}{(j\omega)^2 C_2 C_3 (R_2 + R_3) + (j\omega)(C_2 + C_3)}$$

Matematička izražena ovisnost izlaznog o ulaznom signalu je:

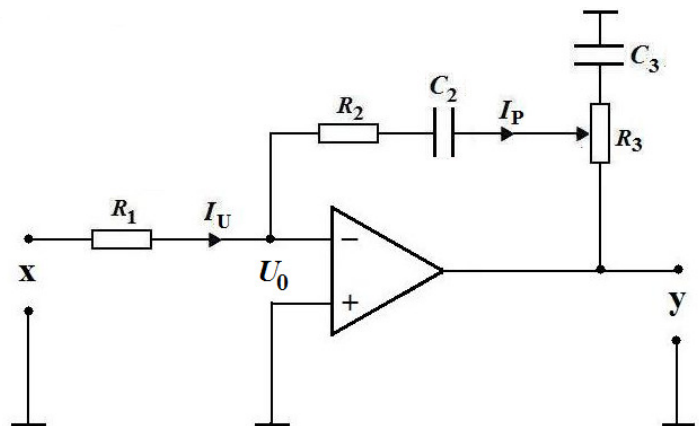
$$y = -\frac{x}{R_1} = -\frac{(j\omega)^2 R_2 R_3 C_2 C_3 + (j\omega)(R_2 C_3 + R_3 C_2) + 1}{(j\omega)^2 C_2 C_3 (R_2 + R_3) + (j\omega)(C_2 + C_3)}$$

$$y = -\frac{(j\omega)^2 R_2 R_3 C_2 C_3 + (j\omega)(R_2 C_3 + R_3 C_2) + 1}{(j\omega)^2 C_2 C_3 R_1 (R_2 + R_3) + (j\omega) R_1 (C_2 + C_3)} \cdot x$$

Budući da je prijenosna funkcija omjer u kompleksnu području izlaznog i ulaznog signala pri nultim početnim uvjetima, slijedi:

$$G_{PID} = \frac{y}{x} = -\frac{(j\omega)^2 R_2 R_3 C_2 C_3 + (j\omega)(R_2 C_3 + R_3 C_2) + 1}{(j\omega)^2 C_2 C_3 R_1 (R_2 + R_3) + (j\omega) R_1 (C_2 + C_3)}$$

Ako se dobro namjeste koeficijenti, PID-regulatori služe za reguliranje bio kakvih sustava, npr. sustava s mrtvim vremenom, s više skladišta energije, sa strogim regulacijskim zahtjevima itd.



Sl.3.37. PID - regulator izveden s operacionim pojačalom

3.4.2. Regulatori s diskretnim djelovanjem

U današnje se vrijeme sve češće upotrebljavaju i regulatori s nekontinuiranim odnosno diskretnim djelovanjem. U njih se ubrajaju relejni (dvopoložajni i tropoložajni), impulsni i sve vrste digitalnih regulatora.

Ovi regulatori pokreću postavnu spravu u impulsima. Time se u većini slučajeva postiže jednostavnija izvedba sustava za reguliranje.

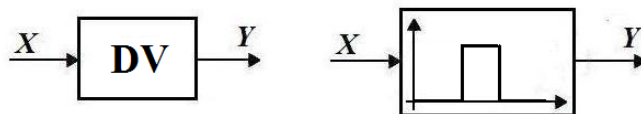
3.4.2.1. Relejni regulatori

Relejni regulatori se rabe u uređajima gdje se regulirane veličine mijenjaju sporo i gdje se ne traži velika točnost, npr. regulacija temperature u raznim toplinskim uređajima (bojler, glačalo, hladnjak itd.). Prednosti releja su niska cijena, jednostavnost izvedbe i pouzdanost rada. Releji se primjenjuju kod regulacije tlaka, temperature, brzine vrtnje nekih malih motora i napona generatora itd. Najčešće izvedbe releja su elektromagnetske i bimetalne.

Bitna razlika kontinuiranih i relejnih sustava je u tome što relejni sustavi rade u oscilatornom režimu rada. Režim vlastitih oscilacija je prirodno stanje relejnih uređaja. To znači da i u stacionarnom stanju izlazna veličina zatvorenog sustava oscilira. Točnost sustava je određena amplitudom i srednjom vrijednosti vlastitih oscilacija.

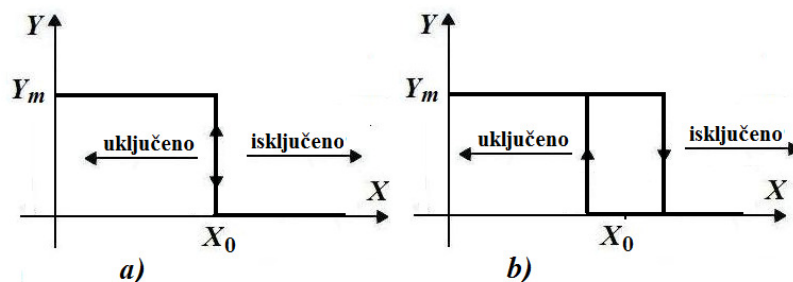
Dvopoložajni regulatori

Naziv tih regulatora potječe od položaja ili stanja njihova izvršnog dijela, od dvaju njihovih krajnjih položaja: „uključeno” i „isključeno”. Na sl.3.40. prikazani su grafički simboli dvopoložajnog regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.



Sl.3.40. Grafički simbol dvopoložajnog regulatora

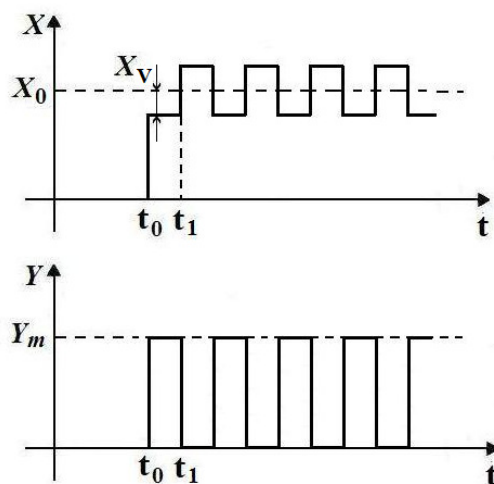
Statička karakteristika dvopoložajnog regulatora u osnovi su karakteristike s mrtvim pojasom i histerezom, a pokazana je na sl.3.41. Na sl.3.41.a. prikazana je idealna statička karakteristika dvopoložajnog regulatora, a na sl.3.41.b. stvarni oblik statičke karakteristike sa mrtvim vremenom i histerezom.



Sl.3.41. Statička karakteristika dvopoložajnog regulatora

Mrtvi pojas ili mrtvi hod u dvopoložajnih regulatora nastaje zbog mehaničkih zračnosti ili drugih mehaničkih ili električnih svojstava, primjerice neosjetljivosti ili njihova malog pojačanja. Histereza je najviše ovisna o svojstvima izlaznih sklopova i dijelova regulatora koji najčešće sadrže elektromehaničke ili elektroničke releje.

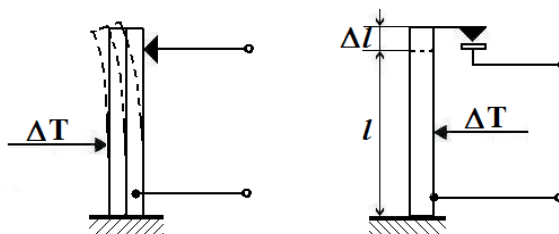
Idealne prijelazne karakteristike dvopoložajnog regulatora prikazana je na sl.3.42. Na karakteristikama se vidi da pri odstupanju regulirane veličine (x) na vrijednost višu od njezine željene, postavljene vrijednosti (x_0), vrijednost postavne veličine (Y) pada na nulu ($Y = 0$). Pri odstupanju regulirane veličine na vrijednost nižu od x_0 vrijednost postavne veličine raste skokovito na maksimalnu vrijednost (Y_m). Tako je u trenutku t_0 kad je $x < x_0$ vrijednost postavne veličine je maksimalna (Y_m), a u trenutku t_1 , kad je $x > x_0$ vrijednost je postavne veličine minimalna ($Y = 0$).



Sl.3.42. Prijelazna karakteristika dvopoložajnog regulatora

Na sl.3.43. prikazana je jednostavna izvedba dvopoložajnog regulatora sa bimetalnom vrpcom. Kada se postigne dovoljna vrijednost željene regulirane temperature bimetalna vrpca se savija i odvaja kontakt. Na taj način dolazi do prekida strujnog kruga i isključenja grijača.

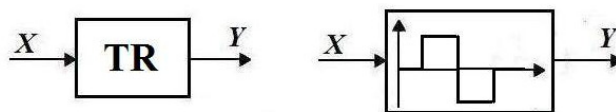
Na sličan način radi i štapni dvopoložajni regulator sa sl.3.43. Kada se postigne dovoljna vrijednost regulirane temperature štapni regulator se izduži za vrijednost Δl što omogućuje odvajanje kontakta. Odvojeni kontakt prekida strujni krug i isključuje grijač.



Sl.3.43. Bimetalni i štapni dvopoložajni regulator

Tropoložajni regulatori

Naziv ovih regulatora, slično nazivu dvopoložajnih regulatora, potječe od položaja (stanja) njihovih izvršnih dijelova. Za razliku od dvopoložajnog regulatora čiji izvršni dijelovi mogu zauzeti jedno od dva moguća stanja, izvršni dijelovi tropoložajnog regulatora može zauzeti jedan od tri moguća položaja. Na sl.3.45. prikazani su grafički simboli tropoložajnog regulatora, odnosno njegov blokovski prikaz.



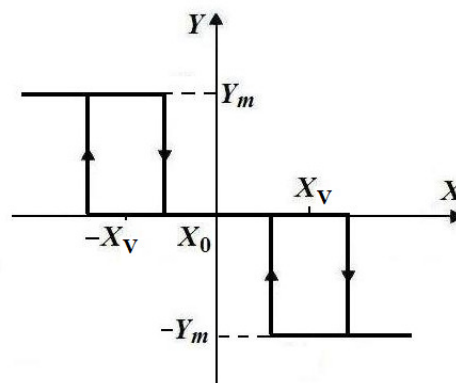
Sl.3.45. Grafički simbol tropoložajnog regulatora

Na sl.3.46. prikazana je realna statička karakteristika tropoložajnog regulatora.

Karakteristika ima mrtvi pojas i histerezu. Kao i kod dvopoložajni i kod tropoložajnih regulatora mrtvi pojas i histereza su posljedice mehaničkih ili električnih svojstava.

Na sl.3.47. prikazana je prijelazna karakteristika tropoložajnog regulatora.

Ulazna karakteristika, tj. oblik ulaznog signala kojemu se vrijednost mijenja tako da je od trenutaka t_0 do t_1 , vrijednost regulirane veličine $x < x_0$, a od trenutaka t_1 do t_2 vrijednost je regulirane veličine $x > x_0$.



Sl.3.46. Statička karakteristika tropoložajnog regulatora

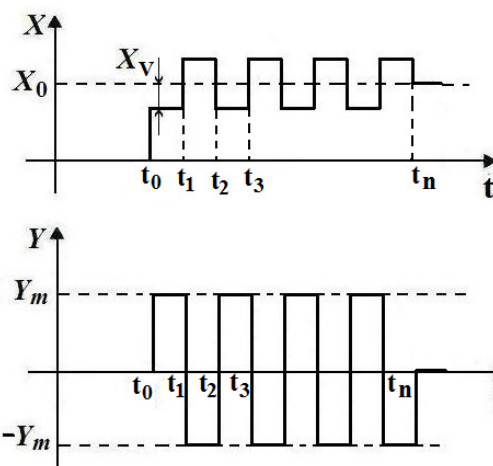
Izlazni signal tropoložajnog regulatora ima tri osnovne vrijednosti:

$$y = 0, \text{ za vrijednosti } x = x_0$$

$$y = +y_m, \text{ za vrijednosti } x < x_0$$

$$y = -y_m, \text{ za vrijednosti } x > x_0$$

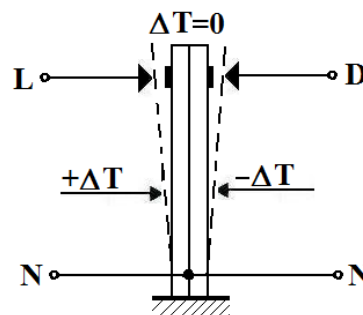
Vrijednost izlazne veličine ($Y = 0$) postiže se u isključenom stanju, u vrijeme prije trenutka uključivanja kruga t_0 i u vrijeme kad je postignuta jednakost stvarne i željene vrijednosti regulirane veličine ($x = x_0 = 0$), odnosno nakon trenutka t_n kad više ne postoji nikakvo regulacijsko odstupanje željene od stvarne vrijednosti regulirane veličine.



Sl.3.47. Prijelazna karakteristika tropoložajnog regulatora

Tropoložajni regulatori primjenjuje pri klimatiziranju, kada se za održavanje određene temperature regulacijski sustav mora, osim grijanja, uključivati i hlađenje i ventiliranje prostori. Tako se postiže veća točnost reguliranja.

Na slici 3.48. pokazan je najjednostavniji tropoložajni regulator, regulator s bimetalnom vrpcom. Osnovni položaj izlaznih dijelova regulatora ($Y = 0$) postiže se kada je regulirana temperatura jednaka zadanoj, kad je njeno odstupanje od željene vrijednosti jednako nuli ($\Delta T = 0$). Pri smanjenju temperature ispod njezine željene vrijednosti ($-\Delta T$) vrpca se, primjerice, svija udesno i spaja kontakte pripadnog kruga N — D.



Sl.3.48. Bimetalni tropoložajni regulator

Pri povećanju temperature iznad željene vrijednosti ($+\Delta T$) vrpca se svija ulijevo i spaja kontakte za suprotni pripadni krug N-L. Preko krugova N-D i N-L uključuje se izvršni dio kruga u jednom ili drugom smjeru djelovanja, primjerice grijanja ili hlađenja, okretanja ulijevo ili udesno i slično.

3.4.2.2. Digitalni regulatori

Kao što digitalni sustavi u svim tehničkim oblastima općenito, potiskuju analogne, tako i digitalni regulatori sve više potiskuju sve ostale vrste regulatora. Da bi se u reguliranju procesa mogli koristiti digitalni regulatori analogni signal reguliranog procesa potrebno je pretvoriti u digitalni te nakon obrade u digitalnom regulatoru ponovo vratiti u analogni.

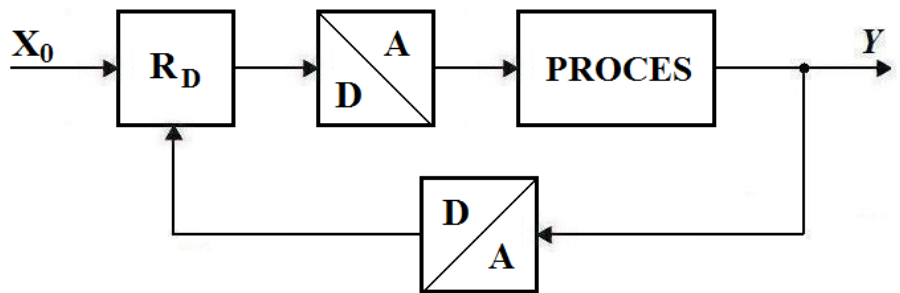
Pretvorba analognog signala u digitalni naziva se „digitaliziranja“, a pretvorba digitalnog u analogni „analogiziranja“ signala. Ovi se postupci nazivaju još i postupcima diskretiziranja signala.

Postupci diskretiziranja mogu biti:

- vremenski, u kojima se vrijednosti analognih signala očitavaju u određenim vremenskim razmacima, primjerice svakih 10 ms, ili
- amplitudni, u kojima se vrijednosti signala očitavaju u jednakim intervalima promjena amplituda reguliranih signala.

Postupci diskretiziranja mogu biti i kombinirani, primjerice vremenski i amplitudni.

Na sl.3.55. prikazana je pojednostavljena načelna shema digitalnog reguliranja procesa. U digitalnom regulatoru (R_D) uspoređuje se željena vrijednost sa onom iz povratne veze. Regulirani signal regulatora iz digitalnog oblika pretvara se u analogni kojim se upravlja procesom. Vidimo da se i regulirani izlazni signal iz analognog oblika pretvara u digitalni da bi se mogao obrađivati u digitalnom regulatoru.



Sl.3.55. Načelni prikaz digitalnog reguliranja procesa

Prednosti digitalnih sustava, a time i digitalnih regulatora su:

- velika točnost (proizvoljno velika, ovisna o cijeni),
- velika otpornost na utjecaj smetnji (naročito važno za daljinski prijenos podataka, vozila i industrijske procese),
- upravljanje nizom objekata (time sharing),
- složeni upravljački algoritmi koji se ne mogu ostvariti u drugim izvedbama (optimalni, adaptivni, nelinearni),
- automatsko otkrivanje i otklanjanje grešaka,
- velika fleksibilnost zbog programabilnosti,
- mala cijena, veličina, masa i potrošnja energije zbog integrirane poluvodičke tehnologije,
- jako razvijene jedinice za unos, ispis i pamćenje podataka.

Danas je digitalno elektroničko računalo je središte digitalnog sustava. To su mikroračunala, često u jednočipnoj izvedbi. Za digitalne regulatore se koriste i nazivi mikrokontoleri i kontroleri.

3.5. Točnost zatvorenih regulacijskih krugova

Iako je u automatici najvažnija stabilnost sustava to nije i dovoljan uvjet za ispravan rad automatskog sustava. I točnost je bitna karakteristika automatskih sustava. Razmatra se posebno točnost u stacionarnom stanju i točnost za vrijeme prijelazne pojave.

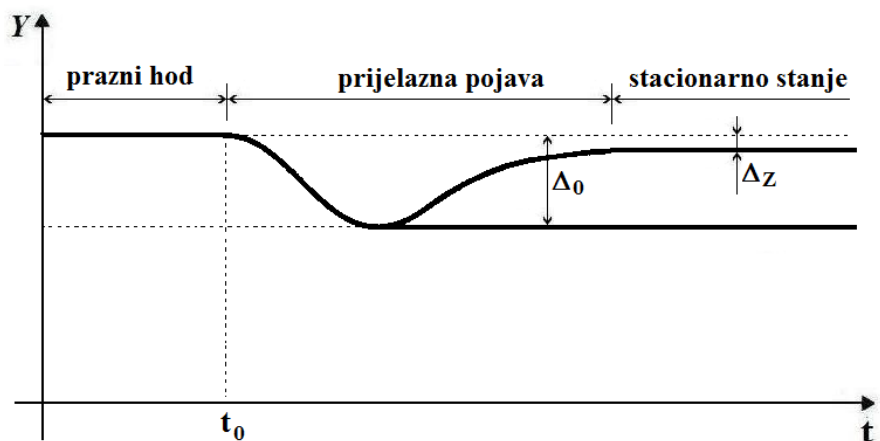
Automatski sustav mora biti stabilan, dovoljno točan u stacionarnom stanju i mora imati što brži odziv. Brzi odziv ugrožava stabilnost, povećava potrošnju energije i poskupljuje izvršne članove to smanjuje pouzdanost zbog većih naprezanja. Sa stanovišta točnosti vrlo važno je nadvišenje i koji je broj oscilacija za vrijeme prijelazne pojave.

3.5.1. Statička točnost

Za određivanje statičke točnosti razmatra se pogreška odziva u stacionarnom stanju. Promatrat ćemo točnost regulirane veličine u zatvorenom (reguliranom) i u otvorenom (nereguliranom) sustavu (SI. 3.60.).

Regulirane veličine (y) mogu biti različite (npr. napon sinkronog generatora, napon ispravljača, brzina vrtnje istosmjernog motora itd.).

Za određivanje točnosti najprije se u praznom hodu namjesti iznos (y) regulirane veličine pomoću referentne veličine na ulazu u sustav. Zatim se uređaj u trenutku t_0 optereti konstantnim opterećenjem. U nereguliranom sustavu regulirana veličina (y) se znatno smanji zbog djelovanja tereta. Greška u stacionarnom stanju je Δ_0 . U reguliranom sustavu, zbog djelovanja negativne povratne veze, stacionarno odstupanje izlazne veličine Δ_Z je znatno manje. U praksi se smatra da je prijelazna pojava završila kada je Δ_Z u granicama od 2 % do 5 %.



Ranije smo spomenuli da je točnost je veća ako postoji integracijska komponenta (I-član) u sustavu.

SI.3.60. Grafički prikaz statičke točnosti

3.5.2. Dinamička točnost

U dinamici sustava proučavamo ponašanje izlazne veličine za vrijeme prijelazne pojave. U vremenskom se području ocjena o kvaliteti prijelazne pojave donosi na temelju odziva na odskočnu pobudu. Na SI. 3.65. je prikazan prigušeni oscilatorni odziv. On je stabilan. Ima istitravanje gdje se smanjuju amplitude oscilacija. Prijelazna pojava je kvalitetnija što je manje nadvišenje (prebačaj) i što kraće traje. Razmatramo samo točnost odziva na djelovanje poremećajne veličine na ulazu. Ne treba zaboraviti da postoji regulacijsko odstupanje u stacionarnom stanju i bez smetnji, zbog nesavršenosti samog sustava.

Na slici su označeni sljedeći parametri koji pokazuju kvalitetu prijelazne pojave, a time definiraju i dinamičku točnost:

t_s – vrijeme smirivanja (trajanje prijelazne pojave),

t_m - vrijeme prvog maksimuma,

t_r - vrijeme porasta y od 10 % do 90 % y_{ST} ,

t_d - vrijeme kašnjenja y od trenutka djelovanja pobude dok y ne dosegne 10 % od y_{ST} ,

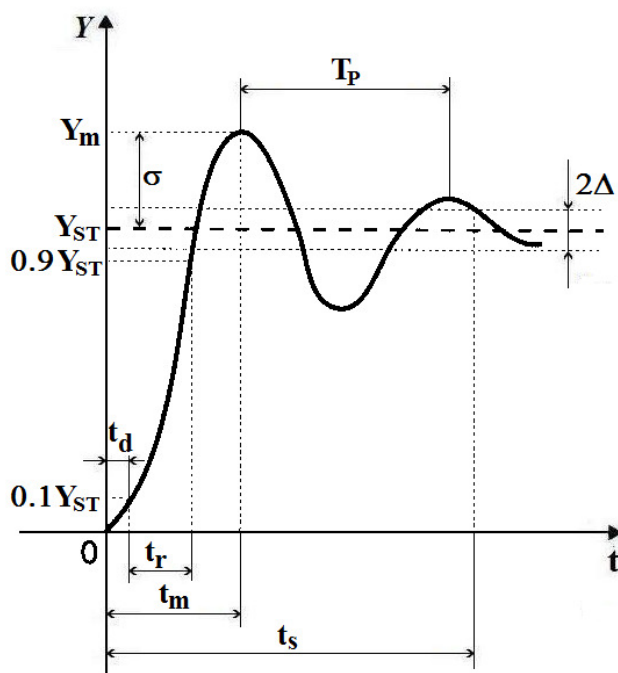
y_{ST} - iznos izlazne veličine u stacionarnom stanju,

y_m - najveći (maksimalni) iznos izlazne veličine,

σ - nadvišenje, u praksi 10% ÷ 30%, a izuzetno do 70%,

T_P - period prigušenih oscilacija ($T_P = 1 / f_P$),

N - broj oscilacija do t_s , obično 3 ÷ 4.



Sl.3.65. Dinamički pokazatelji točnosti

Postoje automatski sustavi, kao što su položajni slijedni sustavi (pozicijski servomehanizmi) kod kojih oscilacije nisu dopuštene (dizalo, dizalica, alatni stroj, ruka robota itd.), pa se oni moraju izvesti bez nadvišenja i oscilacija.

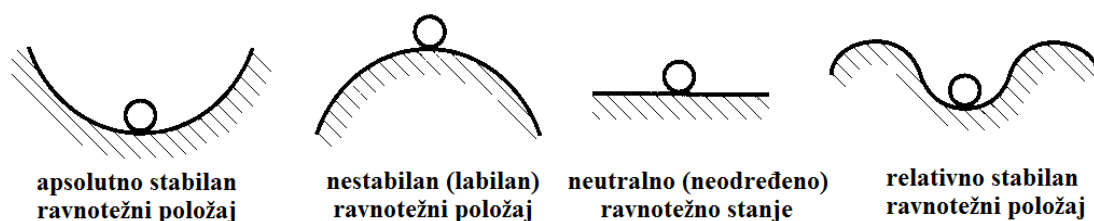
3.6. Stabilnost zatvorenih regulacijskih krugova

Pojam stabilnosti je opći pojam prisutan svugdje: u prirodi, društvu, tehnici. Tehnički uređaji obično traju od 10 do 30 godina i njihova stabilnost se razmatra u tom ograničenom vremenskom opsegu.

Stabilan sustav radi dobro neovisno o djelovanju smetnji ili poremećajnih veličina. Stabilnost znači sposobnost uređaja da se nakon prestanka djelovanja vanjskih sila vraća u početno ravnotežno stanje.

Pojam stabilnosti u mehanici objasniti ćemo na primjeru kugle smještene na razna mjesta (sl.3.70.). Sa slike se vidi da stabilnost može biti apsolutna i relativna. Kod apsolutne stabilnosti kuglica se uvijek vraća u ravnotežni položaj, dok kod relativne stabilnosti kuglica se vraća u stabilan položaj samo ako ne prijeđe rub stabilnosti.

Također se vidi da kuglica može biti u nestabilnom (labilnom) ravnotežnom položaju kada mali poremećaj izbaci kuglicu iz ravnoteže, te neodređeno ravnotežno stanje gdje ravnoteža nastupa svugdje gdje se kuglica zaustavi.



Sl.3.70. Načelni prikaz stabilnosti u mehanici

Stabilnost automatskih tehničkih sustava može se ispitivati na razne načine:

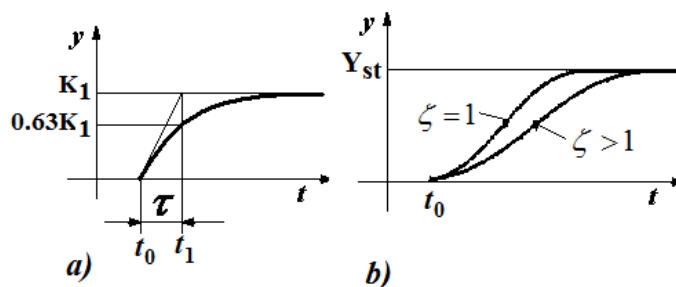
1. u vremenskom području,
2. u frekvencijskom području i
3. pomoću algebarskih kriterija.

Ovdje ćemo ponoviti već ranije spomenutu stabilnost u vremenskom području. Stabilnost sustava smo

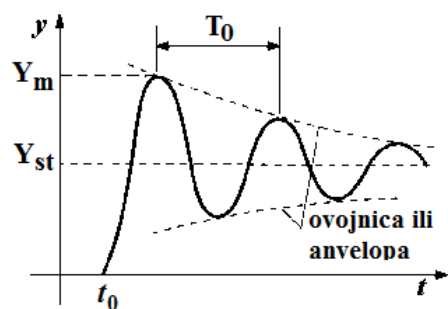
promatrali tako da smo u vremenskoj domeni promatrali odziv sustava na odskočnu pobudu. Vidjeli smo da je odziv sustava prvog reda apsolutno stabilan (sl. 3.71.a.).

Također smo vidjeli da sustava 2. reda može biti stabilan (Sl. 3.71.b.).

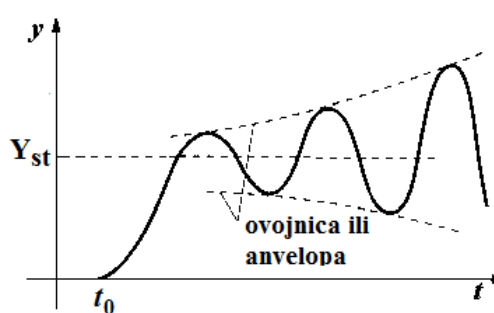
Sustavi drugog reda mogu biti i relativno stabilan (sl.3.72.) i nestabilan (sl.3.73.). Stabilnost sustava 2. reda ovisi o stupnju prigušenja.



Sl.3.71. Stabilni sustavi prvog i drugog reda



Sl.3.72. Relativno stabilan sustav 2.reda



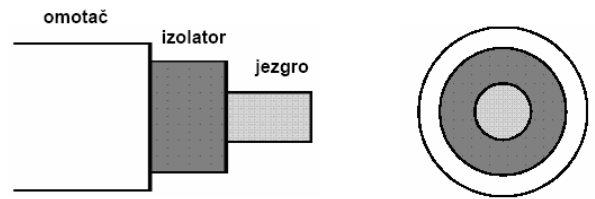
Sl.3.73. Nestabilan sustav 2. reda

4. Daljinsko mjerenje i upravljanje

U tehničkoj praksi se često mjerni podaci moraju prenositi na daljinu, a isto tako i upravljački signali. Primjeri prijenosa na male udaljenosti su signali u vozilima i zgradama, a na velike udaljenosti elektroenergetski sustavi, svemirska istraživanja, meteorološki podaci, vojni uređaji, željeznički sustavi itd. Daljinska mjerenja se još nazivaju telemetrijom, a sustav prikupljanja, prijenosa i obrade mjernih podataka akvizicijom.

4.1. Vodovi i prijenosnici za daljinsko mjerenje i upravljanje

Podaci, upravljački i mjerni električni signal na daljinu se mogu prenositi pomoću vodova ili bežično. Prvi, a danas još zastupljen način prijenosa je pomoću električnih signala koji se prenose bakrenim vodovima. Nedostaci prijenosa bakrenim vodovima su veličina i masa bakrenih vodova, te jak utjecaj smetnji. Sva vanjska električna i magnetska polja djeluju kao smetnje. Da se smanji utjecaj smetnji razvijen niz načina zaštite (oklapanje, uzemljenje, prepletanje vodova, smještaj vodova). Danas se bakreni vodovi se više zamjenjuju svjetlovodima (optičkim kabelima).

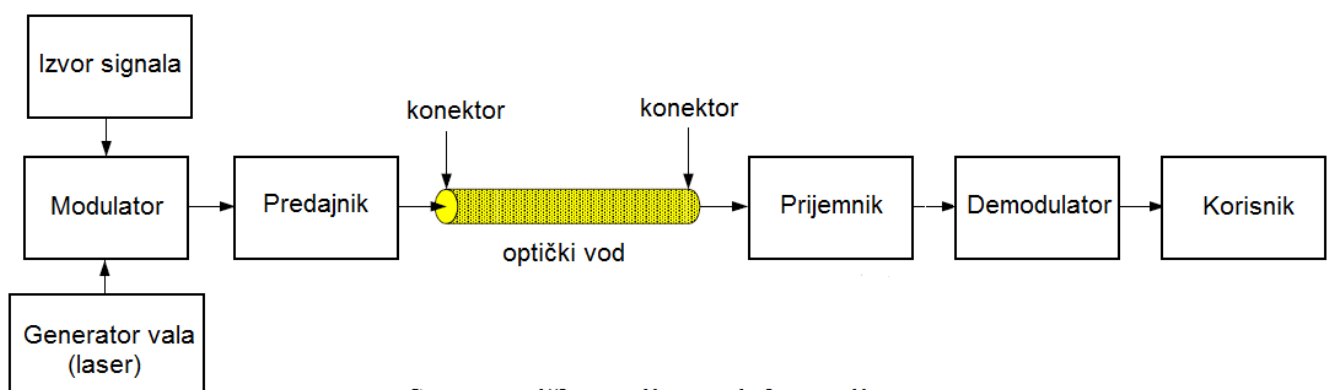


Sl.4.1. Svjetlovodni kabel

Optički kabel je tanki, fleksibilni mediji koji prenose podatke u obliku svjetlosnih valova kroz staklenu "žicu" ili kabel. Koristi se za udaljenosti koje su veće i od 1 kilometar i vrlo su sigurni (jer na njih ne utječu električne smetnje). Čvrsta jezgra sastoji od vrlo tankog stakla, okružena je plastičnim izolatorom koji služi za reflektiranje svjetla natrag prema jezgri. Taj sloj je pokriven koncentričnim slojem tanke plastike koja služi za zaštitu od oštećenja (sl.4.1). Kada postoji više od jednog optičkog vlakna u kabelu, oni se grupiraju zajedno i dodatno se svaka grupa prekriva tankim slojem plastike.

Sustav za optički prijenos informacija sastoji se od izvora informacija, generatora vala (najčešće se koristi laser), modulatora u kojem se svjetlosni val modulira sa signalom informacije, predajnika, optičkog voda, prijemnika, demodulatora gdje se vrši razdvajanje (demodulacija) signala nositelja (svjetlosni val) od signala informacije i na kraju takva informacija dolazi do korisnika (sl.4.2.).

Najvažnija svojstva optičkih vodova su veliki informacijski kapacitet (velika propusna moć), malo gušenje signala, otpornost na smetnje, mali gabariti i otpornost na ometanje prijenosa.



Sl.4.2. Sustav optičkog prijenosa informacija

Očekuje se da će u budućnosti svjetlovodi potpuno zamijeniti bakrene vodove. I suvremene digitalne telefonske centrale su povezane podzemnim ili podvodnim kabelima od staklenih vlakana. Zbog neosjetljivosti na smetnje i manje mase ugrađuju se sve više u zrakoplove, automobile i brodove. Svjetlovodi su savitljivi. U obliku svjetlosnih impulsa, signali se prenose i na velike udaljenosti bez značajnih gubitaka. Primjenjuju se zrake iz infracrvenog područja (od 700 2000 nm) koje imaju gotovo iste osobine kao i vidljiva svjetlost valnih duljina od 400 do 700 nm. Za pretvorbu električnih signala u svjetlosne rabe se infracrvene svjetleće diode (LED) ili posebne laserske diode. PIN fotodiode služe kao prijamne diode za pretvorbu informacija iz svjetlosnog u električni oblik.

Osim prijenosa pomoću vodova, važan je i bežični prijenos podataka. On je nužan kod brodova, zrakoplova, svemirskih letjelica, vrtivih objekata i sl. U primjeni su radio valovi, usmjerene mikrovalne veze (optička vidljivost), laserske veze, akustičke veze (ultrazvučne i infrazvučne).

Danas posebnu ulogu u bežičnom prijenosu imaju satelitske komunikacije sve važnije (telefon, radio, televizija, navigacija), a rabe se elektromagnetski valovi u mikrovalnom području.

Do sada smo naveli niz načina prijenosa podataka: električni signali u bakrenim vodovima, svjetlosni signali u svjetlovodima i elektromagnetski valovi u prostoru. Postoji još i prijenos podataka pomoću tlaka fluida u cjevovodima. Hidraulički sustavi su značajni u gibajućim objektima, a pneumatski u kemijskoj industriji zbog zapaljive i eksplozivne okoline. Pneumatski se signali, zbog prigušenja u cijevima, mogu rabiti do udaljenosti od 100 metara. Brzina rasprostiranja tlaka zraka je približno jednaka brzini zvuka.

4.2. Vrste daljinskog prijenosa

Podaci, mjerni i upravljački signali se mogu prenositi na tri načina s obzirom na vrstu signala:

- analognim signalima,
- impulsima,
- digitalnim signalima.

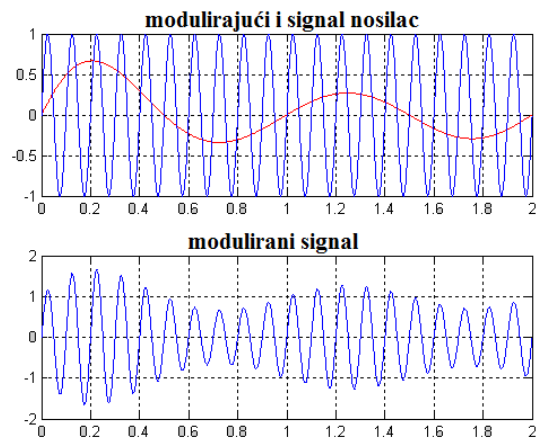
4.2.1. Daljinski prijenos analognih signala

Analogni signali su podložni utjecaju smetnji. Veće su mogućnosti prijenosa izmjenične struje na veće udaljenosti, a naročito radio valovima. Za prijenos na veće udaljenosti primjenjuju se amplitudna i frekvencijska modulacija analognih signala.

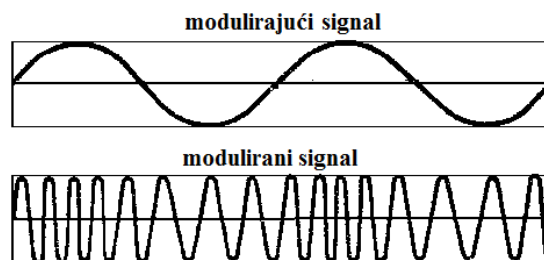
Pojam modulacije podrazumijeva mijenjanje parametara pomoćnog signala ovisno o signalu koji sadrži informaciju. Pomoćni signal naziva se nosilac, a signal koji sadrži informaciju te vrši promjenu vala nosioca naziva se modulacijski signal. Kao rezultat modulacije nastaje signal koji zovemo modulirani signal. Sklop u kojemu se obavlja modulacija naziva se modulator.

Objasnimo to sljedećim primjerom. U radio stanici, dok govorimo kroz mikrofona, naš glas se pretvara u električki signal koji sadržava informaciju. To je modulacijski signal. Nakon toga modulacijski signal ulazi u modulator gdje će se pomiješati sa valom nosiocem koji je također ušao u modulator i kao rezultat na izlazu iz modulatora dobiti ćemo modulirani signal visoke frekvencije.

Amplitudna modulacija ili kraće **AM** je postupak modulacije kod kojega se amplituda signala nosioca mijenja proporcionalno sa modulirajućim signalom (sl.4.3.). Amplituda anvelope (ovojnice) jednaka amplitudi ulaznog kontinuiranog signala. Takav modulirani signal se prenosi putem nekog medija do prijamnika.



Sl.4.3. Amplitudna modulacija



Sl.4.4. Frekvencijska modulacija

Mijenjanje amplitude signala nosioca u funkciji ovisnosti o razini modulacijskog signala prikazano je na slici gdje je na vertikalnoj osi prikazuje amplitudu signala, a na horizontalnoj vrijeme.

Kod frekvencijske modulacije amplituda je konstantna, a frekvencija ovisi o amplitudi ulaznog kontinuiranog signala.

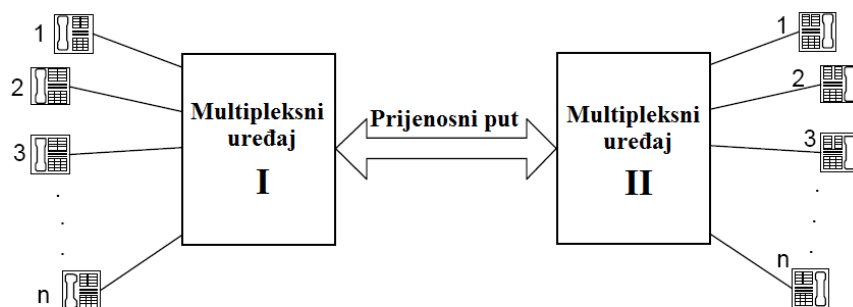
Frekvencijska modulacija nastaje kada se mijenja trenutna frekvencija prijenosnog signala proporcionalno promjeni razine modulacijskog signala.

Na sl.4.4. je prikaz modulacijskog signala koji ima oblik sinusoide i moduliranog signala kod kojeg se frekvencije za pozitivnu poluperiodu povećava, a za negativnu smanjuje.

Za prijenos više mjernih i upravljačkih signala te podataka na daljinu po jednom prijenosnom putu koriste se multipleksni sustavi. Spomenimo ovdje da postoje dva najpoznatije multipleksa:

- vremenski i
- frekvencijski multipleks

Principijelna shema multipleksa prikazana je na sl.4.5. Objasnimo frekvencijski multipleks na prijenosu govornog signala.



Sl.4.5. Principijelna shema n-kanalnog multipleksa

Pretpostavimo da vršimo amplitudnu modulaciju signalom informacije koji se sastoji od govornog signala u rasponu frekvencija u od 0.3 KHz do 3.4KHz. Radi jednostavnosti reci ćemo da je širina govornog opsega 4KHz, premda je ta širina ustvari 3.1 KHz ($3.4 \text{ KHz} - 0.3 \text{ KHz}$). Modulaciju ćemo izvršiti prijenosnim signalom čija je frekvencija 60 KHz.

Modulacijom prebacujemo govorni opseg od 4 KHz u više područje frekvencija u opseg od 60 do 64 kHz.

Sljedeći govorni signal modulirati ćemo sa 64 KHz dakle govorni opseg prebaciti u opseg od 64 do 68 kHz.

Tako redom moduliramo više kanala.

4.2.2. Daljinski prijenos impulsnih signala

Za prijenos signala na daljinu pomoću impulsa koristi se četiri vrste impulsne modulacije:

- amplitudno impulsna modulacija
- širinsko impulsna modulacija
- fazno impulsna modulacija
- frekvencijsko impulsna modulacija

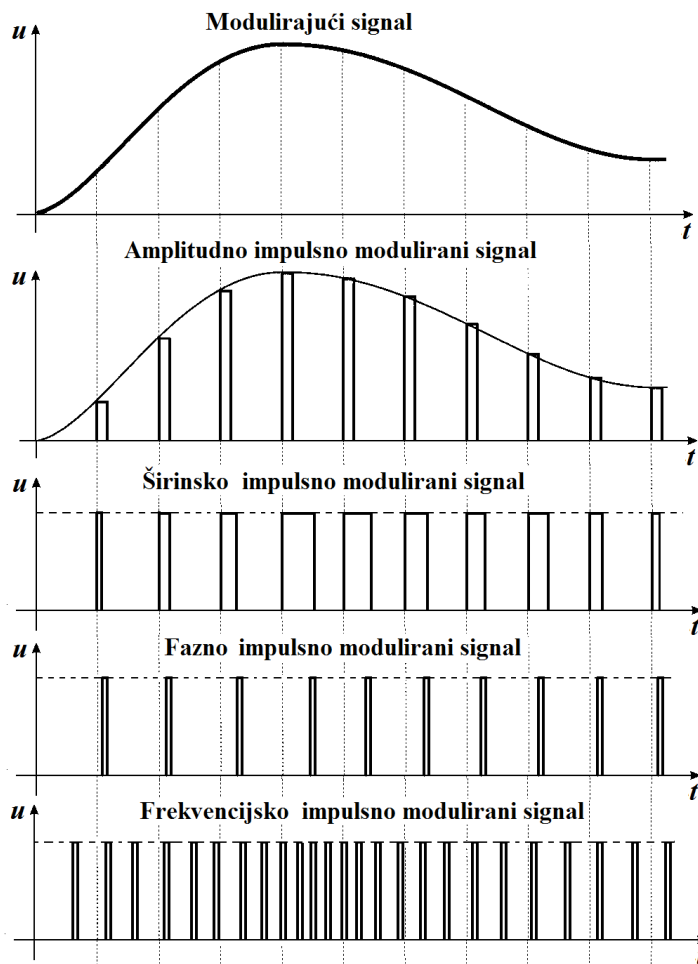
Na sl. 4.6. prikazane su sve vrste impulsne modulacije.

Kod amplitudno impulsne modulacije širina impulsa je konstantna a mijenja se amplituda impulsa moduliranog signala proporcionalno amplitudi modulirajućeg signala.

U slučaju širinsko impulsne modulacije amplituda impulsa moduliranog signala je konstantna a mijenja se širina impulsa proporcionalno amplitudi modulirajućeg signala.

Fazno impulsna modulacija je vrsta modulacije kod koje je amplituda impulsa moduliranog signala konstantna a mijenja se faza impulsa proporcionalno amplitudi modulirajućeg signala.

Kod frekvencijsko impulsne modulacije također je konstantna amplituda impulsa moduliranog impulsa ali mu se frekvencija mijenja proporcionalno amplitudi modulirajućeg signala.



Sl.4.6. Vrste impulsne modulacije

4.2.3. Daljinski prijenos digitalnih signala

Da bi se digitalni signal prenosio na daljinu, bilo preko vodova ili bežično, potrebno ga je modulirati. Tehnike modulacije analognog signala koriste se i za modulaciju digitalnih signala. Kao i kod analogne tako i kod digitalne modulacije koriste se:

- amplitudna
- frekvencijska i
- fazna modulacija

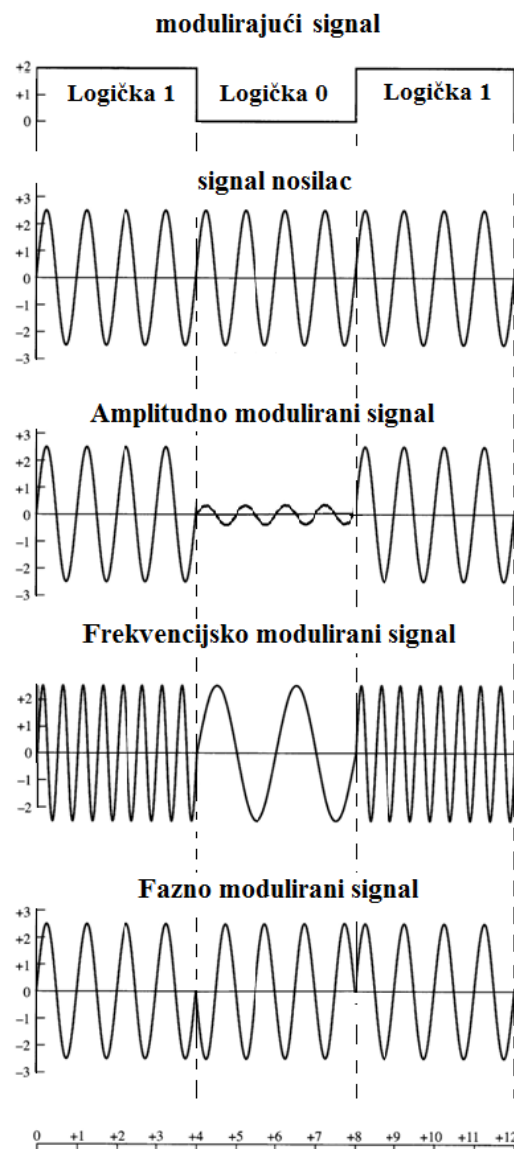
Digitalna modulacija amplitude - ASK (Amplitude Shift Keying)
Ovo je najstarija diskretna modulacija a prikazana je na sl.4.10.

U vremenskom intervalu modulacijskog signala koji pripada znaku «1», modulirani signal ima amplitudu U_{pm} i frekvenciju f_p , a u intervalu koji odgovara znaku «0», amplituda moduliranog signala jednaka je nuli.

Digitalna modulacija frekvencije - FSK (Frequency Shift Keying)

Ovaj se modulacijski postupak temelji na tome da se svakom stanju binarnog digitalnog signala dodijeli jedna diskretna frekvencija prijenosnog signala (Sl.4.10). Obično se stanju «1» dodijeli frekvencija f_1 , a stanju «0» frekvencija f_0 , pri čemu je $f_1 > f_0$.

Ova se pojava koristi danas veoma mnogo, a modulacijski postupak kojim se dobiju najbolji rezultati naziva se GMSK.



Digitalna modulacija faze - PSK (Phase Shift Keying)

Sl.4.10. Vrste digitalne modulacije

Kod ove modulacije se binarnim znakovima 1 i 0 pridaju diskretne vrijednosti faze koje su točno definirane. Kao referentna uzima se faza prijenosnog signala. Na primjer, znaku «1» pridajemo fazu 0° , a znaku «0» pridajemo fazu 180° , odnosno π .

4.2.3.1. Načini prijenosa digitalnih signala

Postoje tri osnovna načina prijenosa digitalnih podataka:

1. Simpleksni prijenos je način rada gdje se podaci mogu slati samo u jednom smjeru. Budući da i u drugom smjeru treba slati barem administrativne podatke (nadzorni signali, potvrda prijama, provjera ispravnosti prijenosa itd.), u praksi simpleks obično nije prihvatljiv.
2. Dupleksni prijenos je način rada gdje se podaci šalju istovremeno u oba smjera. Mogućnosti prijama ne moraju biti jednake za oba smjera. Takav je prijenos najčešći.

3. Poludupleksni prijenos znači da se podaci ne mogu istovremeno (simultano) prenositi u oba smjera, već se sustav mora prebacivati na rad u drugom smjeru. Ponekad je prihvatljiv.

4.2.3.2. Vrste prijenosa digitalnih signala

Dvije su osnovne vrste prijenosa digitalnih podataka.

1. Paralelni prijenos gdje svaki bit digitalne riječi ima poseban prijenosni vod. Ako se podatak sastoji od 8 bitova, onda mora biti 8 vodova. Paralelni prijenos je brz, ali je skup zbog broja vodova. Primjenjuje se za male udaljenosti (do 10 ili 20 m). Za velike udaljenosti je neprihvatljiv.
2. Serijski prijenos znači da se podaci prenose jednim vodom na serijski način (jedan iza drugoga - sukcesivno). Za dupleksni prijenos na serijski način trebaju tri voda: po jedan za svaki smjer, a treći vod je masa. Vidimo da je serijski prijenos sporiji i jeftiniji od paralelnog. Za daljinski rad redovito se podaci prenose na serijski način u duplesnoj vezi.

Serijski prijenos podataka se obavlja na dva načina:

- asinkrono,
- sinkrono.

Kod asinkronog prijenosa se, na početku prijenosa nekog podatka, nalazi startni ili početni bit kojim se prijamnik obavještava da nekoliko slijedećih bitova predstavlja podatke. Start bit sinkronizira rad predajnika i prijarnika. Stop bit označava kraj prenijetog podatka. Djelotvornost prijenosa je slaba. Asinkroni prijenos je prikladan za male brzine prijenosa i onda kada je nailazak podataka slučajan, a to je tipično za rad u stvarnom vremenu (on-line). Sklopovi za asinkroni serijski prijenos se nazivaju UART (universal asynchronous receiver transmitter - opći asinkroni primopredajnik).

I u sinkronom prijenosu podaci se prenose serijski, ali ne znak po znak, već velike skupine (blokovi) podataka. Sinkronizacijski signali se šalju povremeno, a ne stalno. Zahtjevi za usklađivanjem rada prijarnika i predajnika su stroži nego kod asinkronog prijenosa. Ako prijarnik pogriješi u određivanju samo jednog bita, cijela poruka je pogrešno prenijeta. Zato se isti generator taktih signala i sinkronizacije koristi i za prijarnik i za predajnik. To zahtijeva poseban vod za sinkronizaciju. Sinkroni prijenos je prikladan za off-line obradu podataka gdje se prenose veliki blokovi podataka odjednom. Sklopovi za serijski sinkroni prijenos se zovu USRT (universal synchronous receiver transmitter). Naziv univerzalni upućuje da se radi o komponentama opće namjene (za bilo kakva povezivanja). Upisivanjem binarnih znakova u upravljačke registre određuje se ponašanje međusklopa (LSI čipa).

Serijski prijenos je prikladan za neposredni prijenos podataka do 100 metara. Za veće udaljenosti nužni su modemi. Tada nema ograničenja u pogledu udaljenosti. Modemi pretvaraju digitalne signale u analogne uz frekvencijsku modulaciju. Postoji više standarda velikih proizvođača.

Modem je kratica naziva modulator-demodulator. UART najprije pretvori paralelnu digitalnu riječ u serijsku, a onda je modem frekvencijski modulira. Tako frekvencija 1270 Hz može značiti logičku jedinicu, a frekvencija 1070 Hz logičku nulu. Prijarni modem demodulira različite frekvencije u serijsku digitalnu riječ koja se opet pretvara u paralelni zapis. Ako se koriste telefonski vodovi, treba znati da je njihov propusni opseg od 300 Hz do 3300 Hz.

Na prikazani način podaci s čitave Zemlje mogu se unositi u neki sustav u stvarnom vremenu (on-line). To se već primjenjuje u meteorologiji, vojsci i kod rezervacije avionskih karata.

Za povezivanje na serijski način razvijeni su tehnički standardi: RS-232B i RS232C (stari), to RS-422A i RS-423A (novija rješenja). Teško je uvesti neki novi jedinstveni standard.

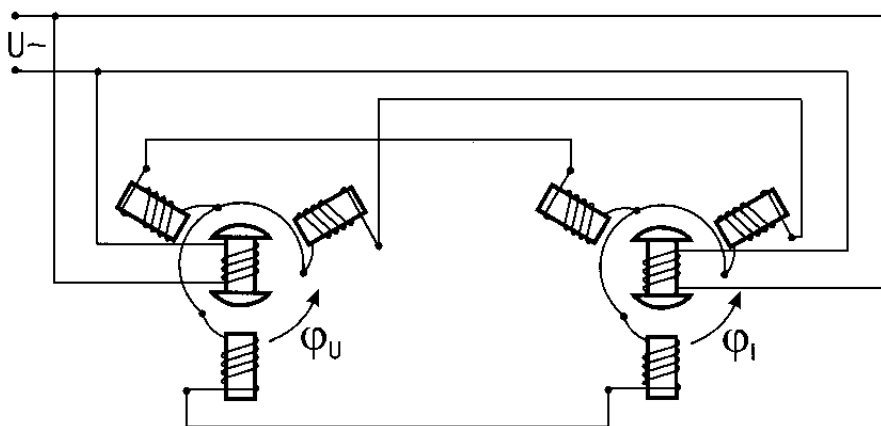
4.3. Primjer analognog daljinskog mjerenja

Ima puno primjera analognog prijenosa mjernih podataka. Obradujemo jedan stariji primjer induktivnog daljinskog mjernog uređaja za mjerenje kutnog zakreta. Naziva se i selsin.

I prijamnik i predajnik su dva jednaka električna rotacijska izmjenična stroja. Na statorima imaju po tri namota, geometrijski pomaknuta za 120° i spojena u zvijezdu. Pomoću tri voda međusobno su spojeni namoti oba mala stroja. Obje armature (rotorski strujni krugovi) se napajaju iz istog izmjeničnog izvora.

Ako je kutni položaj armatura jednak, onda je to stanje ravnoteže. U namotima oba statora induciraju se naponi jednakog iznosa i suprotnog polariteta. Oni se ponište pa kroz spojne vodove ne teče struja.

Ako se u predajniku rotor zakrene za kut (φ_u), onda više nema ravnoteže. Od predajnika prema prijamniku poteče struja. U prijamniku se pojavi zakretni moment koji zakrete rotor sve dok se i on ne zakrene za kut ($\varphi_i = \varphi_u$). Tako nastaje novo stanje ravnoteže i struje u spojnim vodovima među strojevima prestanu teći. Postiže se kutni zakret od 0° do 360°



Sl.4.15. Električna shema selsina

Selsin radi na automatski način. Signali se ovako prenose na manje udaljenosti. Na osovinu prijamnika se spoji analogni pokazni instrument. Selsini su imali veliku primjenu u zrakoplovima gdje je izmjenična mreža od 400 Hz i napon od 115 V.

5. Regulacijska pojačala i izvršni slogovi

Izlazni signal iz regulatora je energetski slab i nema snage za odgovarajuće djelovanje na većinu objekata regulacije. Zato ga treba pojačati. Ponekad i signal povratnoj vezi treba naponski ili strujno pojačati. Pojačala snage su uređaji u kojima slabi ulazni signal upravlja energetskim tijekom iz pomoćnog izvora energije. Razvijen je veliki broj raznih vrsta pojačala u strojarstvu i elektrotehnici.

Pojačala u strojarstvu mogu biti:

- mehanička,
- pneumatska,
- hidraulička.

Pojačala u elektrotehnici mogu biti:

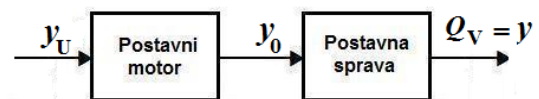
- elektromehanička ili strojna,
- magnetska,
- elektronička.

Strojarske izvedbe pojačala ovdje nećemo razmatrati.

Od elektrotehničkih pojačala nama su interesantna samo elektronička, budući da su pojavom tranzistora i tiristora elektromehanička i magnetska pojačala izgubila na značenju i već dugo se ne koriste.

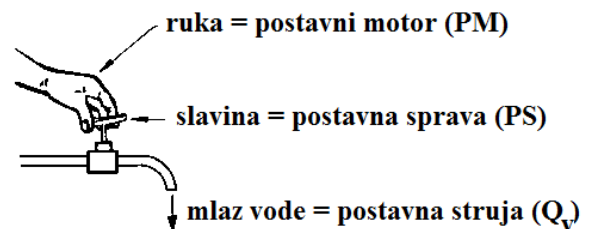
Dakle u suvremenoj tehnici su najvažnija elektronička pojačala. To su poluvodički sklopovi bez pokretnih dijelova. Izvode se s raznim vrstama tranzistora i tiristora za jako veliki raspon koeficijenata pojačanja i izlaznih snaga. Od pojačala koja se koriste u automatici traži se velika točnost i velika brzina odziva (mala vremenska konstanta), jer točnost najslabijeg člana automatskog sustava određuje ukupnu točnost, a član s najslabijom dinamikom određuje kvalitetu prijelazne pojave. Suvremena elektronička pojačala mogu zadovoljiti i najstrože zahtjeve.

Ranije smo vidjeli da jedan od dijelova regulacijskog kruga je i izvršni slog. Izvršni slog čine postavni motor i postavna sprava (sl.5.1.). Na blokovskom prikazu načelnoga djelovanja postavnog motora na postavnu spravu i njihov rezultat postavna struja, označi njihovim ulaznim i izlaznim signalima (y_u , y_o i Q_v), sl.5.1.



Sl.5.1. Blokovski prikaz izvršnog sloga

Najjednostavniji primjer izvršnog dijela ručno vodenoga regulacijskog kruga, odnosno kruga upravljanja mlazom vode iz slavine, prikazan je slikom 5.2. Ovdje je čovječja ruka postavni motor (PM), postavna ili izvršna sprava (PS) je ventil, odnosno slavina u dolaznom cjevovodu, a postavna struja ili vodeni proces ukupna je protjecajna količina vode (Q_v).



Sl.5.2. Jednostavna izvedba izvršnog sloga

5.1. Izvršni ili postavni motori

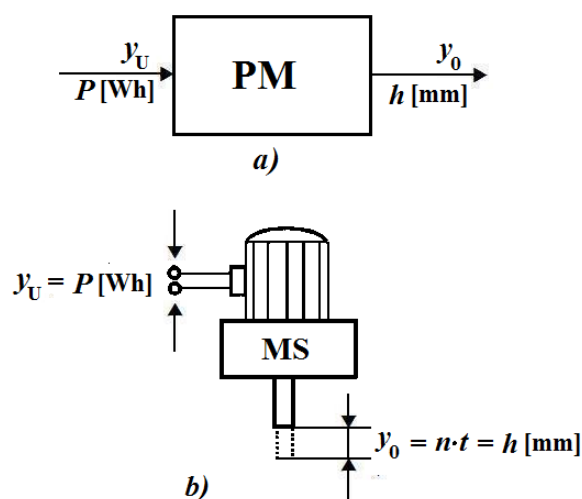
U praktičnim primjenama postoji više osnovnih vrsta postavnih motora koje se najčešće primjenjuju u postupcima automatskog reguliranja i ručnog upravljanja. Ovisno o vrsti pogonske energije možemo ih podijeliti na:

- pneumatski postavni motori,
- hidraulički postavni motori,
- električni postavni motori i električni magneti sklopnika i releja,
- kombinirani, elektrohidraulički ili elektropneumatski postavni motori.

Postavni su motori izvršni dijelovi regulacijskih krugova, koji izlaznu veličinu regulatora, dovoljno snažnu i prikladno formiranu, pretvaraju u mehaničku snagu i rad za pokretanje postavnih sprava.

Na sl.5.3.a. pokazan je blokovski prikaz električnog postavnog motora, a na sl.5.3.b. električni postavni motor koji električnu energiju pretvara u mehanički zakretni moment, snagu i rad, odnosno u vrtnju njegove osovine.

U pokazanom primjeru postavnog motora ulazna je veličina električna energija, $y_u = P \text{ (Wh)}$, a izlazna veličina ukupan napravljeni broj okretaja osovine, odnosno izvedeni pomak izvršnog dijela postavnog motora $y_o = n \cdot t = h \text{ (mm)}$. Okretanja izvršnog dijela, odnosno osovine, postavnog motora prenosi se preko mehaničkoga prijenosnog sloga (MS) koji kružno gibanje osovine motora pretvara u pravocrtno gibanje prijenosnog sloga dalje na postavnu spravu i njezin izvršni dio.



Sl.5.3. Blokovski prikaz i električna izvedba postavnog motora

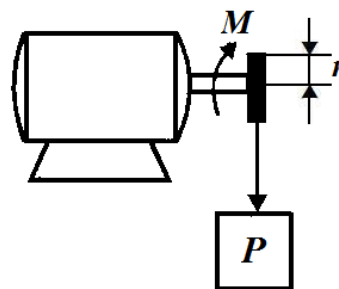
Glavna karakteristična veličina postavnih motora (sl. 5.4.) njihova je mehanička snaga, odnosno njihov zakretni moment (M) kojim motor može djelovati u pogonu. Ovaj je moment određen umnoškom sile ili tereta s kojim djeluje osovina postavnog motora i kraka sile, odnosno:

$$M = P \cdot r \quad (\text{Nm})$$

gdje su:

P - sila ili teret (N), i

r - krak sile ili tereta (m), koji pokreće osovina motora.



Sl.5.4. Moment postavnog motora

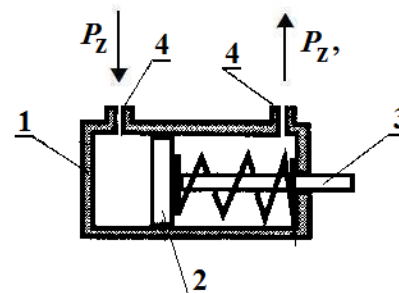
5.1.1. Pneumatski postavni motori

Pneumatski postavni motori imaju jednostavne mehaničke izvedbe. Pogonska im je materija komprimirani zrak, pogodan za široku primjenu u svim vrstama industrijskih pogona. Takvi su motori vrlo prikladni za primjenu u pogonima kemijske i procesne industrije, u kojima postoje opasnosti od eksplozija plinskih smjesa ili drugih zapaljivih i eksplozivnih tvari. U njima se uporabljeni komprimirani zrak lako ispušta u okoliš, i nije mu potreban povratni vod. Općenito uzevši, vrlo povoljne karakteristike rada takvih motora umanjuju samo kompresibilnost i temperaturna ovisnost tlaka zraka, koje uzrokuju vremenska zadržavanja izvršnih signala, i odgovarajuće pogreške reguliranja.

Pneumatski se postavni motori izrađuju u nekoliko osnovnih izvedbi, a njihov princip rada opisat ćemo na primjeru rada pneumatskog postavnog motora s cilindrom i stapom.

Glavni dijelovi tih motora (sl. 5.5). jesu osnovno kućište ili cilindar (1) i pokretni dio postavnog motora ili stap (2) s njegovom izvršnom polugom (3).

Kod ovog tipa motora pomak stapa izvodi struja tlačnoga zraka (P_z) koja se dovodi samo s jedne, ili s obje strane stapa (4) u kućištu. Ako tlak zraka (P_z) djeluje samo na jednu stranu stapa, onda ravnotežu radnom tlaku drži samo opruga (5), koja stap, njegovu izvršnu polugu i izvršni dio postavne sprave, uvijek vraća u njihov početni položaj. U izvedbama s obostranim dovodima tlačnoga zraka, pomak stapa i izvršnog dijela postavnog motora izvodi djelatna razlika tlaka $P_D = P_z - P_z'$ u radnim dijelovima komora.



Sl.5.5. Pneumatski postavni motor

Osnovni nedostatak postavnih motora s jednosmjernim djelovanjem u usporedbi s postavnim motorima s dvosmjernim jest u ograničenosti hoda stapa samo na onaj ukupni pomak koji određuje povratna opruga.

Kod pneumatskih postavnih motora pravocrtne se pomaci izvršnih dijelova, preko prikladnih prijenosnih mehanizama mogu pretvarati i u kružne ili kutne pomake.

5.1.2. Hidraulički postavni motori

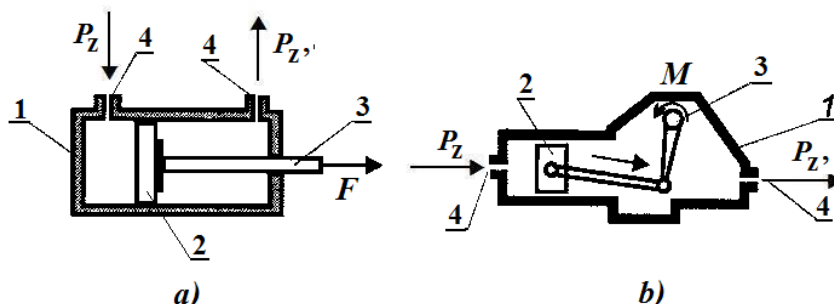
Hidraulički postavni motori upotrebljavaju se za one postavne sprave za čije su pokretanje potrebne najveća snaga i energija. To su najčešće zaklopke, zasuni, ventili i zatvarači koji djeluju pod višim ili visokim tlakovima protjecanih medija, i u cjevovodima koji imaju velike dimenzije i teško pokretne izlazne i izvršne mehanizme. Ovi se postavni motori često upotrebljavaju i u regulacijskim krugovima sa snažnim elektrohidrauličkim izvršnim slogovima, kojima se obično može i neposredno i ručno upravljati.

Glavna osobina hidrauličkih postavnih motora jest velika snaga, robusnost i jednostavnost njihovih izvedbi, jednostavna načela djelovanja, i veliki pomaci izvršnih dijelova, kojima se mogu izvoditi velika linijska gibanja izvršnih dijelova i najsnažnijih postavnih sprava. Takvim se motorima pokreću zaklopke i zasuni u velikim cjevovodima, regulira snaga hidrogeneratora, pokreću segmenti ustavnih dijelova na branama hidroelektrana i dr.

Postoji nekoliko osnovnih izvedbi hidrauličkih postavnih motora. Princip njihova rada objasniti ćemo na hidrauličnom postavnom motoru s cilindrom i stapom. I ovi postavni motori, poput pneumatskih, djeluju na osnovi sila tlačnih kapljevina, nastalih na razlikama tlakova (P_z i P_z') u tlačnim komorama, i koje uzrokuju gibanja izvršnih dijelova postavnog motora (sl. 5.6.a.). Kod tih se motora tlačna kapljevina nikada ne ispušta u okolinu, nego stalno cirkulira u zatvorenom sustavu s tlačnim crpkama.

I takvi se postavni motori, slično pneumatskima, sastoje od kućišta (1), pomičnog stapa (2) s izvršnom osovinom (3), te dovodnih i odvodnih priključaka tlačne kapljevine (4).

Razlika tlaka tlačnih kapljevina na stranama pomičnog stapa ovisna je o vrijednosti postavne veličine, pa se stap i osovina gibaju uvijek u onom smjeru koji im zadaju vrijednost i smjer postavne veličine. Ako je tlak s lijeve



Sl. 5.6. Hidraulički postavni motor s pravocrtnim a) i kutnim pomakom b)

strane stapa veći slap i osovina pomicat će se udesno, a tlačna kapljevina iz desne strane cilindra otjecat će natrag u rezervoar i tlačnu crpku. U drugom će smjeru gibanja stapa i strujanja tlačne kapljevine biti suprotnoga smjera.

Za kružno pokretanje postavnih sprava primjenjuju se hidraulički postavni motori s cilindrom i polužnim prijenosom (sl. 5.6..b.). I ovakav se motor sastoji od kućišta (1), stapa (2), prijenosnog sustava (3) i dovodnih, odnosno odvodnih priključaka za ulaz i izlaz tlačne tekućine (4).

I u ovih postavnih motora tlačna kapljevina djeluje s jedne ili obje strana stapa, a gibanje izvršnog dijela motora, izazvano razlikom tlaka kapljevine, zakreće osovinu servomotora preko polužnoga sloga, a preko njega i osovinu postavne sprave, s određenim momentom sile (M). Ovakvi, najčešće snažni, postavni motori obično se rabe za pokretanje velikih zaklopki u cjevovodima kroz koje protječu velike količine plinova ili kapljevina.

5.1.3. Električni postavni motori

Električni postavni motori rabe za pogon različite vrste električne energije. Stoga postoji i više vrsta električnih postavnih motora. To su prije svega dvije osnovne vrste elektromotora, koji se pokreću s pomoću istosmjernje, odnosno izmjenične struje. Najčešće su to:

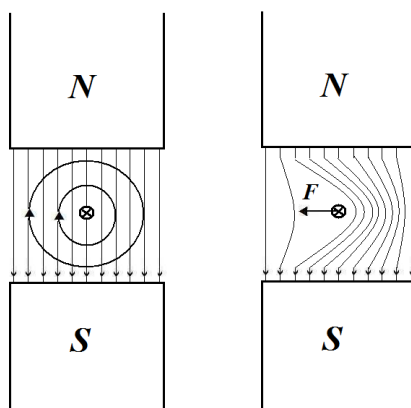
- istosmjerni kolektorski motori,
- izmjenični asinkroni motori,
- izmjenični sinkroni motori ili
- električne sklopke i elektromagneti.

Pokretanje elektromagneta u sustavima s kontinuiranim reguliranjem vrlo je složeno, pa se ovakvi „motori“ gotovo isključivo rabe za pokretanje elektromagnetskih ventila, i kao elektromagneti električnih sklopki u izlaznim slogovima regulacijskih sustava. Primjena električnih postavnih motora u suvremenim je sustavima automatizacije sve češća, a vrste motora određuju se na osnovi potrebnih načina, brzina i snaga djelovanja pokretanih postavnih sprava.

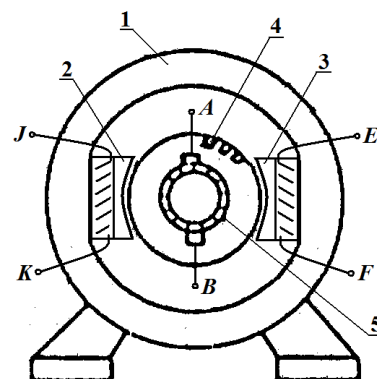
5.1.3.1. Istosmjerni kolektorski motori

Načelo djelovanja istosmjernih električnih motora (sl.5.10.) zasniva se na djelovanju elektromotornih sila (F) na vodiče, koji se nalaze u magnetskom polju i kroz koje protječe struja (I). Pri naznačenom smjeru struje (po "pravilu lijevo ruke") sa lijeve strane vodiča dolazi do poništavanja, a sa desne strane do zbrajanja djelovanja magnetskih sitnica polja magneta i polja vodiča. Tako na lijevoj strani vodiča nastaje slabije, a na desnoj jače magnetno polje. To stvara elektromotornu silu (F) koja pokreće vodič. Ovo načelo djelovanja koristi se na sličan način i kod izmjeničnih električnih motora.

Na sl.5.11. pokazan je pojednostavljeno poprečni presjek istosmjernog motora koji se sastoji od statora (1) sa magnetskim polovima statorskim namotima (2 i 3), te rotora sa utorima i rotorskim namotima (4) i kolektorom (5). Stator je stabilni, nepokretni dio, a rotor pokretni, rotirajući dio motora. Stator i rotor su međusobno mehanički i električki usklađeni, a rotor je s ležajevima u poklopcima motora postavljen tako da se može



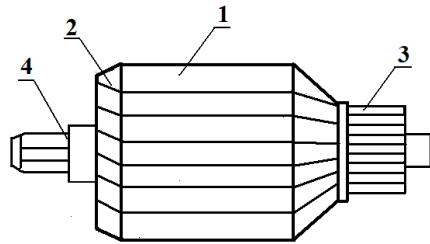
Sl.4.10. Načelo djelovanje električnog motora



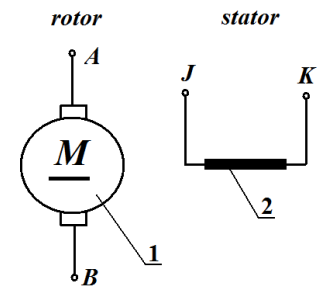
Sl.5.11. Poprečni presjek motora

slobodno okretati.

Četkice motora naliježu na kolektor i njihovi izvodi (A i B) se serijski ili paralelno spajaju sa namotajima statora (I, K i E, F). Četkice se uvijek postavljaju u takozvane neutralne zone, u kojima je iskrenje na četkicama najmanje.



Sl.5.12. Načelna izvedba rotora



Sl.5.13. simboličan prikaz motora

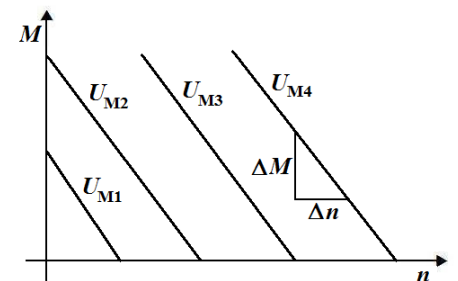
Načelni oblik izvedbe rotora istosmjernog motora pokazan je na sl.5.12. Rotor se sastoji od cilindrične jezgre (1) sa utorima i namotima (2), izoliranim i spojenim na kolektor (3). Cilindrična jezgra; namoti i kolektor rotora učvršćeni su na osovini (4). Pogonski dio osovine rotora izveden je sa utorom, i na taj dio se učvršćuje pogonska remenica, spojka, zupčanik itd, preko kojih motor pokreće izvršni organ.

Simboličan prikaz istosmjernog električnog motora, odnosno njegova električna shema, pokazana je na sl.5.13, gdje je simbol motora (1) pokazan samo sa izvodima rotora (A,B) i jednim namotom (2) statora(J,K).

Uzbuda istosmjernih električnih motora može biti elektromagnetska ili permanentno-magnetska. Kod istosmjernih motora u automatici gotovo redovito se primjenjuju permanentni magneti, jer tada nije potrebno napajanje uzbude, nema zagrijavanja uzbudnih namota (oni ne postoje), a mehanička karakteristika (ovisnost brzine vrtnje a momentu) je linearnija (što je poželjno). Može se smatrati da je brzina vrtnje linearno ovisna o priključenom armaturnom naponu.

Mehanička karakteristika odnosno ovisnosti momenata motora o broju okretaja rotora i prijelazne karakteristika spadaju među najvažnije karakteristike kotora.

Karakteristike momenata motora $M = f(n)$ prikazuju statičku ovisnost momenta o broju okretaja uz konstantne napone napajanja (U_{M1} , U_{M2} , U_{M3} ...). Iz ovih statičkih karakteristika (sl.5.15.) se vidi da se pomoću stupnjevutih promjena napona rotora, odnosno, kod motora ma stranom uzbudom, gdje mu napajanja rotora i statora odvojeni, mijenjanjem napona napajanja rotora mogu postići velika područja reguliranja broja okretaja i momenta motora. Promjenom napona rotora se tako statičke karakteristike motora samo međusobno paralelno pomiču, i na njima se postižu skoro linearne regulacije odnosa $\Delta M / \Delta n$. Kod jednakih napona napajanja $U_M = \text{konst.}$ porastom broja okretaja, moment motora linearno pada, pa je regulacija kod ovakvih motora dosta kvalitetna i jednostavna. Mogu se postići odnosi brojeva okretaja u rasponu od 1:100, a promjene smjera vrtnje izvode se promjenom smjera struje napajanja rotora ili smjera struje uzbude statora.



Sl.5.15. Statička karakteristika motora

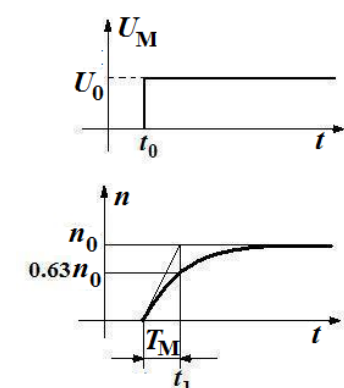
Veliku važnost imaju i dinamičke karakteristike motora, odnosno njihove prijelazne karakteristike. Ove karakteristike su pokazane na sl.5.16. Vidi me da istosmjerni motori imaju prijelazne karakteristike prvoga reda i da se kod njih promjena broja okretaja, uz skokovitu promjenu napona napajanja, odvijaju eksponencijalno.

Elektromehanička vremenska konstanta motora (T_M), uglavnom, ovisi o dimenzijama i tromosti rotora.

Tromosti rotora uglavnom ovisi o dimenzijama i izvedbi rotora.

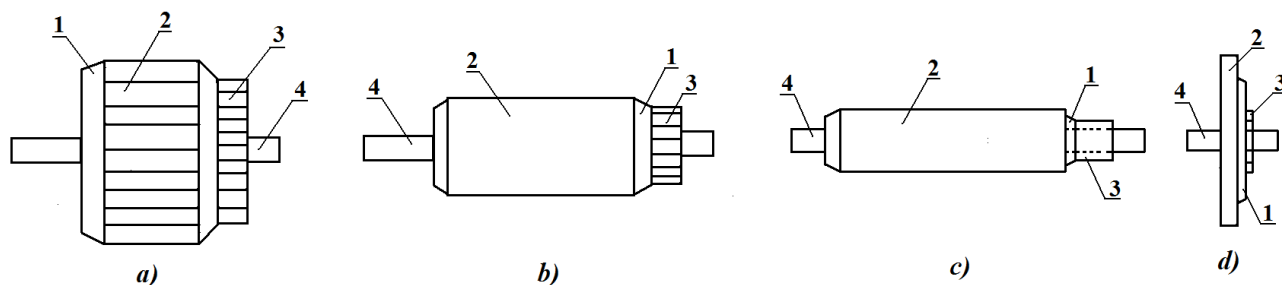
Različite izvedbe rotora istosmjernih motora pokazane su na sl.5.17.

ovakvih motora dosta kvalitetna i



Sl.5.16. Prijelazna karakteristika motora

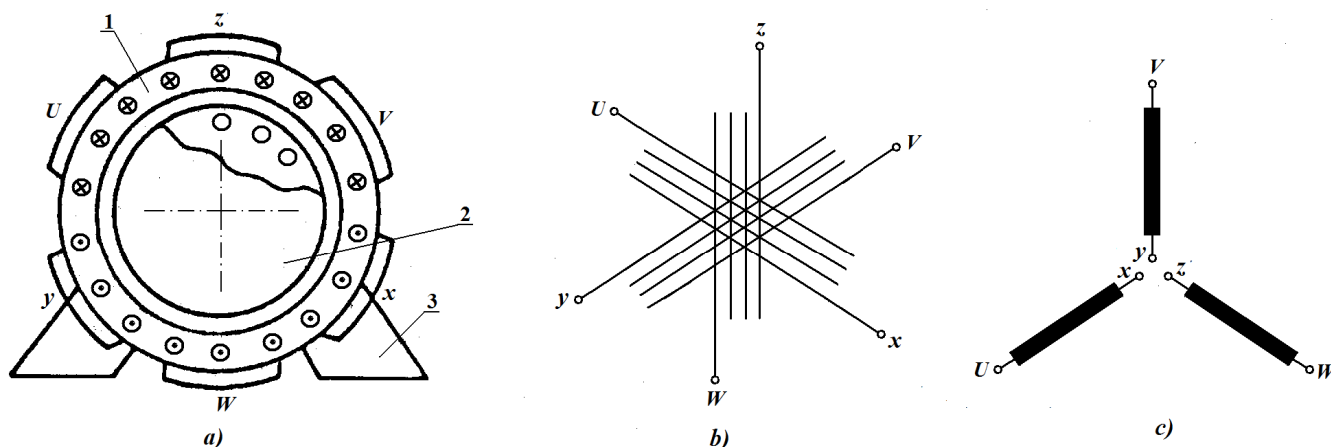
Na sl.5.17.a. pokazana je forma rotora "standardnih" uobičajenih izvedbi kod kojih prijelazni proces nije od velike važnosti, nego ekonomičan odnos dužine i promjera rotora (l/d). Što je taj odnos veći, rotor ima manji moment tromosti. Na sl.5.17.b. pokazan je rotor koji ima relativno mali promjer i veću dužinu magneta. Takav rotor ima manji moment tromosti, brže se pokreće, pa se, na primjer, takva forma motora veoma često koristi u električkim pokretačima motora sa unutrašnjim sagorijevanjem. Primjer izvedbe veoma tankog i dugačkog rotora pokazan je na sl.5.17.c.. Ovakav motor ima veoma mali moment tromosti i veoma malo vrijeme ubrzanja rotora. Mala mehanička tromost može se postići i s izvedbom rotora u obliku tanke ploče (sl.5.17.d.) izrađene od vodljivog materijala. Mehanička tromost rotora motora mora biti usklađena s tromošću pokretanog dijela vezanog na osovinu rotora, kako i se maksimalno iskoristila pogonska karakteristika motora.



Sl.5.17. Osnovne vrste izvedbi rotora istosmjernih motora

5.1.3.2. Trofazni izmjenični asinkroni motori

Najjednostavnije izvedbe, pogodne za elektromotorne pogone u automatici, i jednostavna prespajanja pri promjenama smjera vrtnje, to veliki stupanj iskoristivosti i pouzdanosti u radu, imaju izmjenični trofazni asinkroni motori. U usporedbi s istosmjernim motorima, izmjenični motori imaju manje dimenzije, jednostavnijih su izvedbi a imaju manje težine kod istih nazivnih snaga. Od svih vrsta izmjeničnih motora u industriji se najviše upotrebljavaju trofazni asinkroni motori. Jednostavan prikaz izvedbe i električka shema trofaznih asinkronih motora prikazani su na sl.5.20.



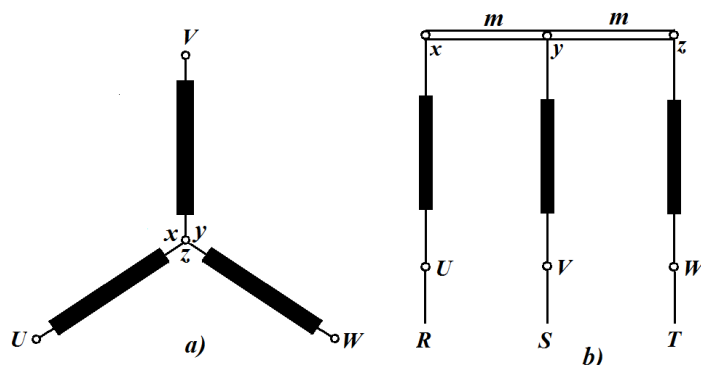
Sl.5.20. Izvedba i shema trofaznih asinkronih motora

Motor se sastoji od statora s namotajima (1) i rotora (2) s kratkospojenim otvorenim namotajima. Stator i rotor su smješteni u kućište motora (3) tako da se rotor u statoru može slobodno okretati. Stator i rotor motora namatani su trofazno, s rasporedom namota na dva, četiri, šest ili više polova. Fazni namoti statora i rotora postavljaju se u određenom međusobnom električnom i geometrijskom pomaku po obodu statora i rotora.

Počeci faznih namota označavaju se velikim slovima abecede U, V, W, a njihovi završetci malim slovima x, y, z. Shematski pojednostavnjeni prikaz međusobnog smještaja namotaja statora trofaznog motora pokazan je na sl.5.20.b. Ovakav smještaj odgovara trofaznom asinkronom dvopolnom motoru s električnim i geometrijskim pomakom između faza od 120° .

Uopćena električna shema namota trofaznog asinkronog motora pokazana je na sl.5.20.c, s naznačenim ulaznim i izlaznim stezaljkama faznih namota.

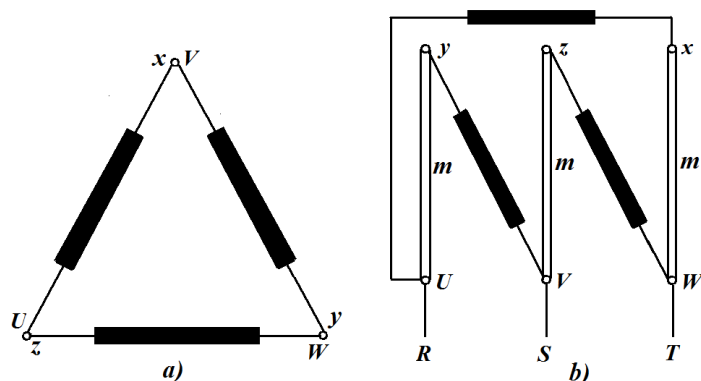
Fazni namoti trofaznih motora mogu se spajati u "zvijezdu" ili "trokut". Ovi spojevi su pokazani na sl.5.21.



Sl.5.21. Spajanje trofaznog motora u "zvijezdu"

Spoj sl.5.21.a, je spoj u zvijezdu kod kojega se na ulazne priključnice faznih namota dovode fazni naponi (R,S,T), a izlazne se priključnice međusobno kratko spajaju. Takav spoj može se izvesti i na samim priključnicama motora, kako je to prikazano na sl.5.21.b.

Spoj u trokut je drugačiji, i on zapravo predstavlja zatvoreni serijski spoj svih faznih namota motora (spojevi x-V, y-W i z-U). Ovaj je spoj simbolički prikazan na sl.5.22.a. Raspored spojeva na stezaljkama motora, za spoj motora u "trokut", pokazan je na sl.5.22.b.



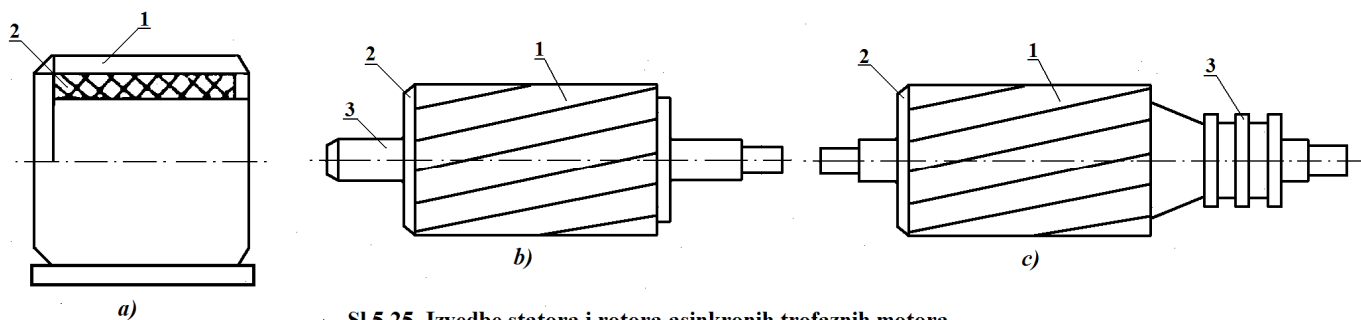
Sl.5.22. Spajanje trofaznog motora u "trokut"

Ovakav raspored je univerzalan i primjenjuje se na stezaljkama svih trofaznih motora, koji nemaju mogućnost promjene broja polova. Kod prikazanog rasporeda priključaka, namota lako se ostvaruju spojevi motora u trokut i u zvijezdu. Kod spoja u zvijezdu kratkospojni mostovi (m) postavljaju se vodoravno na stezaljke x, y, z, a kod spoja u trokut okomito na stezaljke U-y, V-z, W-x.

Rotori asinkronih trofaznih motora izrađuju se u dvjema osnovnim izvedbama:

- kao rotor s kratkospojenim i
- rotor s otvorenim namotajima i kliznim kolutima.

Prikazi ovih izvedbi rotora trofaznih motora pokazani su na sl.5.25.



Sl.5.25. Izvedbe statora i rotora asinkronih trofaznih motora

U kućište motora (1) s namotajem (2), prema sl.5.25.a, ugrađuju se rotor s kratkospojnim ili krletkastim namotajima (sl.5.25.b), ili otvorenim namotajima s kliznim kolutovima (sl.5.25.c).

Kratkospojeni namotaji ugrađuju se neizolirani u utore rotora (1) i kratko spajaju prstenovima (2). Paket

rotora s lameliranom jezgrom i namotajima čvrsto se navlači na osovinu rotora (3).

Rotori s otvorenim namotajima imaju namotaje izolirane i uložene u kanale rotora (1). Namotaji (2) su prikladno formirani i međusobno učvršćeni kako ih centrifugale sile ne bi oštetile. Namotaji rotora izvedeni su trofazno, a slobodni krajevi su im spojeni na klizne kolute (3). S kliznih koluta se ovi izvodi spajaju na priključnice rotora motora preko grafitnih četkica. Uz klizne prstenove obično postoje i pomični prsteni za kratko spajanje izvoda rotora. Preko spojeva sa kliznim prstenima može se izvoditi i fina regulacija brzine vrtnje trofaznog asinkronog motora.

5.1.3.3. Izmjenični sinkroni motori

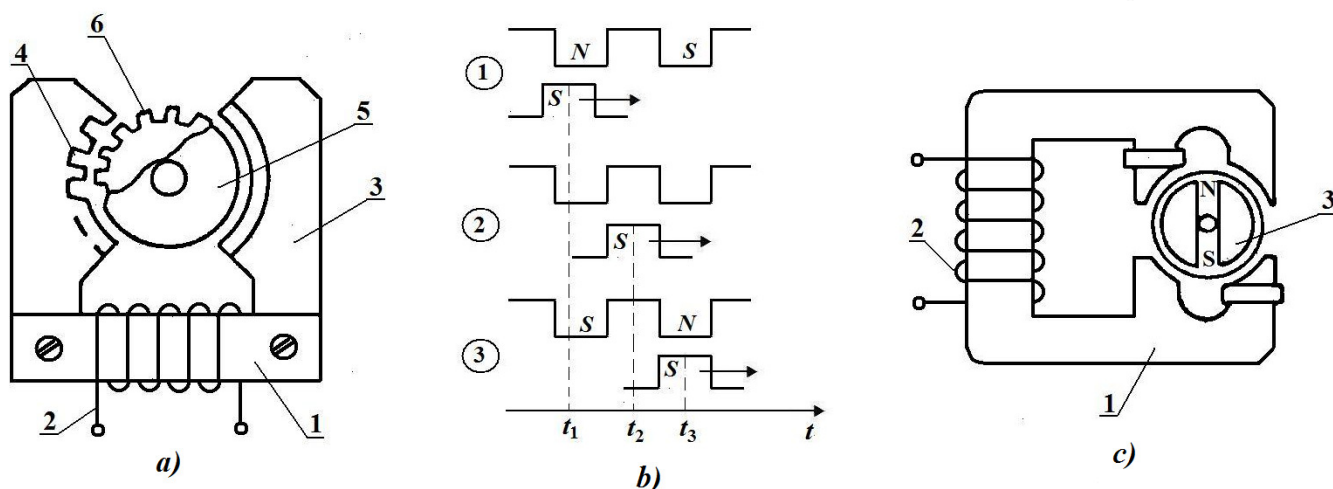
Sinkroni motori su posebna vrsta motora izmjenične struje s kojima se postiže broj okretaja sinkron i teoretski jednak broju okretaja magnetskog polja statora. Sinkroni motori ne razlikuju se od sinkronih generatora i svaki sinkroni motor može raditi kao sinkroni generator električne struje. Razlikuju se sporohodni sinkroni motori s istaknutim polovima i brzohodni motori s valjkastim rotorima i u njim uložnim namotima. Magnetski polovi velikih sinkronih motora su elektromagneti, a za male motore koriste se izvedbe rotora s permanentnim magnetima. Elektromagnetski polovi velikih sinkronih motora i generatora napajaju se iz pomoćnih izvora istosmjerne struje, ili takozvanih "budilica", koje se kao generatori istosmjerne struje mogu nalaziti na samoj osovinu motora.

Ovi motori se pri puštanju u pogon moraju dovesti na sinkroni broj okretaja, pa tek onda priključiti na mrežu i pustiti u samostalan rad. To se može izvesti pomoćnim pogonskim strojevima; motorima s unutrašnjim sagorijevanjem, elektromotorima itd. Pokretanje većih sinkronih motora najčešće se izvodi pomoću posebnih (asinkronih) namota na samom rotoru, sinkronog motora. Tako se, uz isključenu uzbudu sinkronog motora, motor dovede na broj okretaja približan sinkronom. Potom se uključi uzbuda motora, i on dalje nastavi raditi kao sinkroni motor.

Mali sinkroni motori

Veliki sinkroni motori se u automatici manje koriste, ali je primjena malih sinkronih motora veoma velika. Načela djelovanja i primjeri izvedbi ovih motora pokazani su na sl.5.30.

Na slici sl.5.30.a, pojednostavnjeno je pokazana izvedba jedne vrste malih sinkronih motora. Ovi se motori sastoje od nekoliko osnovnih dijelova; magnetskog jarma (1) s namotom od tanke bakrene žice s puno zavoja (2), glavnih polnih nastavaka (3) sa 10-12 malih polnih nastavaka na unutrašnjem obodu (4). Rotor (5) ima 24-40 polnih nastavaka (6). Podjela oboda rotora s nastavcima izvodi se tako, da se postigne



Sl.5.30. Mali sinkroni motor

potpuno poklapanje polova rotora i statorskih polnih nastavaka.

Ako se na uzбудni namotaj (2) uključi napon pri mirnom rotoru, magnetski polovi rotora i statora se međusobno privuku, pa rotor dalje miruje. Za stalno okretanje rotora mora se postići sinkroni broj okretaja na poseban način. Poslije toga rotacija se odvija sinkrono s frekvencijom mreže. Tok rotacije može se vidjeti iz sl.5.30.b. Na primjer, u trenutku (t_1) je međusobni položaj polova statora i rotora kao na prvoj slici. U tom slučaju polni nastavak statora (N) privlači nastavak rotora (S), i rotor se pokreće. U drugom trenutku (t_2) rotor se zbog masa i tromosti giba dalje, a u trećem trenutku (t_3) zbog promjene smjera struje isti nastavak rotora privlači se sa slijedećim nastavkom statora i tako rotacija teče dalje. Tako se za vrijeme svake poluperiode rotor zakrene po jedan korak, pa je broj okretaja (n) ovih motora određen izrazom:

$$n = (120 \cdot f) / Z \quad (1/\text{min})$$

gdje su: f - frekvencija napona napajanja (Hz) i Z - broj polnih nastavaka rotora

Za miran hod motora potrebna je određena masa rotora.

Još, jednostavnija izvedba ovakvih motora pokazana je na sl.5.30.c. Ovdje se u stator običnog dvopolnog asinkronog motora (1), sa uzbudnom zavojnicom (2) i kratkospojnim zavojnicama pomoćnih polova, stavlja rotor s permanentnim magnetom. Poteškoća u radu ovakvih motora je veliki broj okretaja i nepogodno, praktički trenutno, postizanje sinkrone brzine vrtnje.

Mali sinkroni motori koriste se u elektromehaničkim uređajima čiji pogoni moraju biti vremenski točno usklađeni. To su, na primjer, električni satni mehanizmi, pogonski mehanizmi elektromehaničkih registracijskih uređaja, vremenski integratori količina (tekućina, plinova itd).

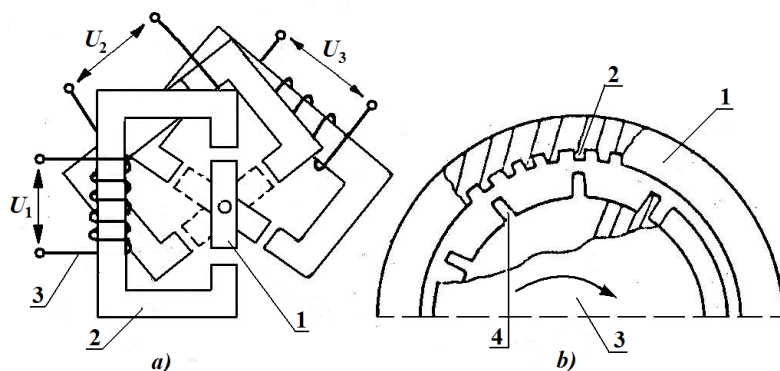
5.1.3.4. Koračni motori

Ranije nabrojane vrste motora koriste se u elektroautomatici na mnogo raznovrsnih načina, i za sve ove motore karakterističan je isti način rada: svi oni rade s kontinuiranim pomakom, odnosno, sa stalnom brzinom vrtnje. Samo mali sinkroni motori, prema sl.5.35, rade slično jednoj vrsti motora koji se nazivaju koračni motori. Taj naziv dobili su na temelju činjenice, da se njihovi rotori stvarno kreću "korak po korak", brže i sporije, ovisno o brzini upravljačkih impulsa.

Najveća primjena koračnih motora je u pokretanju radnih stolova, alatnih i sličnih proizvodnih strojeva i uređaja. Postoje dvije osnovne vrste ovih motora:

- motori s rotirajućim pomakom i
- motori s linijskim pomakom.

Na slikama sl.5.35.a i b pokazane su načelne izvedbe koračnih motora sa rotirajućim pomakima. Slika sl.5.35.a daje pojednostavljen prikaz nastajanja rotirajućih koraka rotora (1) postavljenog između polova sekcija statora (2). Sekcije statora su jednake i međusobno pomaknute za određene, jednake kutove. Svaka sekcija statora ima svoj poseban namotaj (3). Sekcije se, u koracima, jedna za drugom priključuju na izvore napona U_1 , U_2 , U_3 ..., pa se zbog toga dvopolni rotor, slijedeći magnetsko polje statora, pomiče također u koracima. Redoslijed uključivanja sekcija statora određuje i smjer okretanja rotora, pa se tako dobiva i smjer gibanja rotora koračnog motora. Napajanje sekcija statora izvodi se kontrolirano, iz posebnih izvora impulsnih pogonskih signala. Upravljanje signalima izvodi se pomoću posebnih elektroničkih sklopova s brojilima. Prikaz praktičkih izvedbi paketa statora i rotora pokazan je i na sl.5.35.b. Stator (1) uvijek ima veći broj polova (2) u grupama (1,2,3,4...), a rotor (3) ima



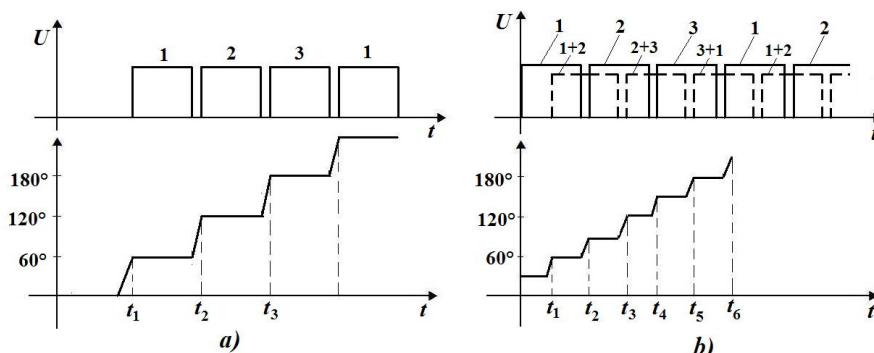
Sl.5.35. Koračni motor s rotorom

Redoslijed uključivanja sekcija statora određuje i smjer okretanja rotora, pa se tako dobiva i smjer gibanja rotora koračnog motora. Napajanje sekcija statora izvodi se kontrolirano, iz posebnih izvora impulsnih pogonskih signala. Upravljanje signalima izvodi se pomoću posebnih elektroničkih sklopova s brojilima. Prikaz praktičkih izvedbi paketa statora i rotora pokazan je i na sl.5.35.b. Stator (1) uvijek ima veći broj polova (2) u grupama (1,2,3,4...), a rotor (3) ima

toliko polova (4) koliko na statoru ima njihovih grupa. Svaki magnetski pol statora ima svoj poseban namotaj.

Gibanje koračnih motora s rotirajućim pomakom grafički je prikazano dijagramom na sl.5.36. Na sl.5.36.a, pokazan je pogon motora kod kojeg je uvijek uključen namotaj samo jednog pola, i kad u grupi statorskih polova ima po tri pola (1,2,3). Redoslijed uključivanja uzбудnih napona (U_1 , U_2 , U_3) jednak je redoslijedu polova. Prema prikazanom primjeru svaki naponski impuls $U_1 - U_2 - U_3$ zakrene rotor za po 60° , pa se nakon tri impulsa zaredom rotor zakrene za ukupno 180° .

Primjer zajedničkih i prijelaznih djelovanja po dva impulsa istovremeno rezultira "usitnjenim" koracima, jer se rotor giba za po pola koraka (1,1+2, 2, 2+3, 3, 3+1). Korak rotora je "finiji", pa on u tom slučaju sa dvostrukim brojem polukoraka prede isti zakretni kut od 180° (sl.5.36.b).



Sl.5.36. Dijagram djelovanja koračnog motora

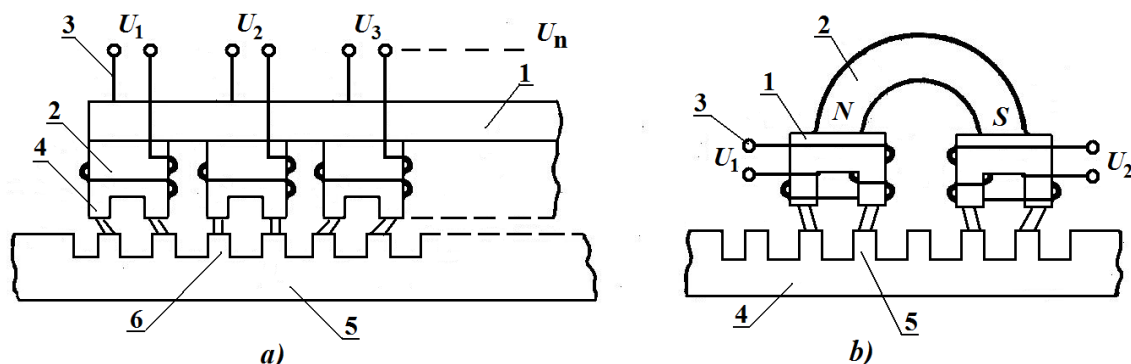
Prvi način upravljanja naziva se jednostruko, a drugi dvostruko upravljanje koračnim motorom.

Koračni motori s linijskim pomakom

Osim motora s rotirajućim pomakom, koriste se i motori s linijskim pomakom. Primjeri izvedbi i djelovanje ovakvih motora prikazani su shematski na sl.5.37.

Kod ovih motora "stator" (1) ima niz polnih nastavaka (2) s posebnim namotajima (3). Polni nastavci imaju po dva izdanka (4). Pokretni dio motora (5) ima veći broj polnih nastavaka i razmak među njima je manji nego između izdanaka statora (6). Time je omogućeno da postupno uključivanje namotaja statora i njihovo napajanje uzbudnim naponima (U_1 , U_2 , $U_3 \dots U_n$) daje približno koračni hod pokretnog dijela motora. Promjena smjera gibanja pokretnog dijela izvodi se promjenom redoslijeda napajanja uzbudnih svitaka.

Nešto drugačija izvedba linijskog koračnog motora pokazana je na sl.5.37.b. Ovdje su polni nastavci (1) izvedeni na nastavcima permanentnih magneta (2). Na polne nastavke su stavljeni upravljački namotaji (3). Ovi namotaji izvedeni su tako da na izdancima polnih nastavaka, ovisno o redoslijedu upakčanja svitaka sa N i S pol magneta, uvijek stvaraju takve, rezultirajući, magnetske sile, da se pomični dio magneta (4) s nastavcima (5) pomiče lijevo ili desno.



Sl.5.37. Koračni motor s linijskim pomakom

5.2. Izvršne ili postavne sprave

Izvršne ili postavne sprave služe za postavljanje zadanih vrijednosti ulaznih postavnih veličina reguliranih procesa. Ima mnogo vrsta i praktičnih izvedbi postavnih sprava. To su:

- ventili
- zaklopke
- zasuni
- mehanički postavni sklopovi
- električni i elektromagnetski
- elektronički postavni sklopovi i dr.

Postavne su sprave izvršne jedinice sustava vođenja i ujedno ulazne jedinice vođenih procesa i procesnih dijelova postrojenja. Na njima se "susreću" izlazni slogovi sustava vođenja s ulaznim slogovima procesa i postrojenja.

Mehanički ventili, zaklopke i zasuni izrađuju se u različitim izvedbama, kao regulacijske, automatski vođene izvršne ili postavne sprave ili kao postavne sprave za jednostavna daljinska ili lokalna upravljanja i opću namjenu.

Postavne sprave mogu biti i elektromehaničke, elektromagnetske ili elektroničke. Preklopni kontakti releja, sklopnika, graničnih preklopki i ostalih vrsta preklopnika također su česte elektromehaničke postavne sprave. I elektroničke, "beskontaktna", tranzistorske i tiristorske sklopke vrste su električkih postavnih sprava, koji se zovu elektronički ventili.

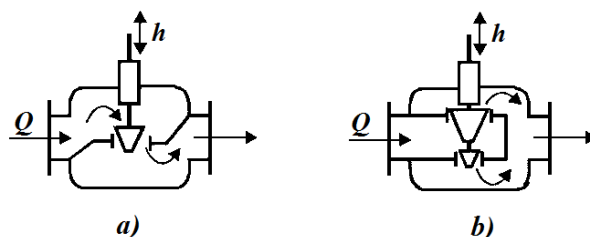
Među kombinirane elektromehaničke i elektromagnetske postavne sprave pripadaju i izvršni dijelovi solenoida (solenoidi su elektromagneti s pomičnim jezgama, koji se upotrebljavaju za pretvaranje električne struje u mehanički pomak), magnetskih spojki i magnetskih kočnica. Postavnim spravama pripadaju izvršni dijelovi magnetskih pojačala i uzbudni namoti krugova za reguliranje struja, napona i snage električnih strojeva i elektromagneta. Ovakve izvršne sprave rabe se vrlo često u reguliranju brzine vrtnje i snage velikih pogonskih motora, snage električnih generatora i dr.

5.2.1. Regulacijski ventili

Regulacijski ventili, ali i sve ostale vrste sličnih postavnih sprava kojima se reguliraju protoci plinova i kapljevina imaju velik utjecaj i na ukupne, statičke i dinamičke karakteristike reguliranih procesa. Točnim izborom ventila i zaklopki, odnosno određivanjem njihovih točnih statičkih i dinamičkih karakteristika, može se bitno utjecati i na točnost automatskog vođenja procesa.

Spomenute vrste ventila i zaklopki izvode se u mnogo različitih izvedbi. Njihove statičke i dinamičke karakteristike mogu biti linearne ili nelinearne, ovisno o svrsi za koju se primjenjuju. Oblici statičkih karakteristika dobivaju se prikladnim oblikovanjem njihovih dosjednih dijelova, odnosno pladnjeva i sjedika ventila i zaklopki.

Primjeri praktičnih izvedbi regulacijskih ventila prikazani su na sl.5.40. Oblici praktičnih izvedbi ventila i zaklopki ovise o namjeni i radnim uvjetima u kojima se oni djelovati (tlak, temperatura, količina, kemijska agresivnost protočne tvari i dr.).



Sl.5.40. Jednosjedni i dvosjedni regulacijski ventili

Primjerice, jednosjedni ventili primjenjuju se pri

malim padovima tlaka na ventilu (sl. 5.40.a). Za više razlike tlaka pogodniji su dvosjedni ventili zato što tlak na gornji i donji dio pladnjeva djeluje suprotno, pa se sile na njima međusobno poništavaju. Pokretanje takvih ventila je lakše i njihovim su postavnim motorima potrebne manje pogonske snage. Načelni oblik i izvedba dvosjednog regulacijskog ventila prikazan je na sl.5.40.b.

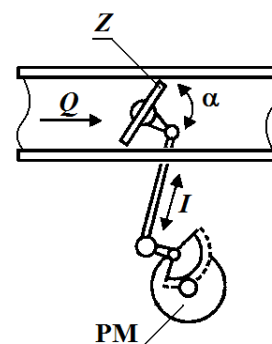
5.2.2. Zasuni

Zasuni su posebna vrsta postavnih sprava. Od regulacijskih ventila razlikuju se izvedbama pokretnih dijelova. Izvode se kao skošene ploče koje u dosjedni dio ulaze kao pomični zasloni. Njihove su statičke karakteristike izrazito nelinearne i neprikladne za primjenu u krugovima automatskog reguliranja. Nedostatak im je i to što se teško pokreću pod visokim tlakovima protočnih tvari. Najčešće se upotrebljavaju u otvorenim krugovima vođenja ili daljinskog upravljanja.

5.2.3. Regulacijske zaklopke

Česta je uporaba zaklopki u krugovima reguliranja i upravljanja protokom plinova i tekućina. Izvedbe su im najčešće jednostavne (sl. 5.45.), pa se lako prilagođavaju kružnim i drugačije profiliranim oblicima cijevi u kojima reguliraju protoke kapljevina, zraka ili plinova.

Pojednostavljeni prikaz načelne izvedbe zaklopke s izvršnim kinematičkim polužjem vidi se na sl.5.45. Njima se kutna pogonska zakretanja (α) s prijenosnih mehanizama postavnih motora (PM), prenose na zaklopke (Z). To se polužje izrađuje take da se omogući optimalno ugađanje duljina zakretnih krakova i poluga postavnih motora i zaklopki (I). Tako se rabe optimalna područja statičkih karakteristika polužja i karakteristika zaklopki, a dodatnim lineariziranjem njihovih optimalnih dijelova postiže se i lakši i točniji prijenos pomaka i sila s postavnih motora.

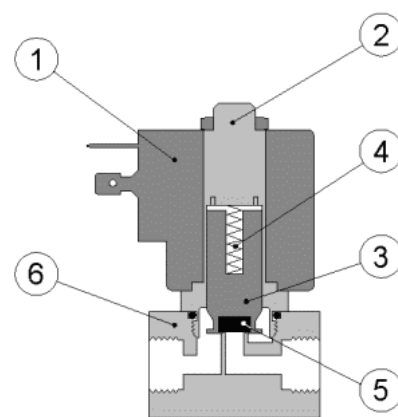


Sl.5.45. Polužni izvršni slog i zaklopka

5.2.4. Elektromagnetski ventili

Elektromagnetski ventil služi za daljinsko uspostavljanje i prekidanje protoka radnog medija električnim putem. Ugrađuje se u cjevovode instalacija na mjestima gdje to zahtijeva tehnološki proces. Osnovni dijelovi elektromagnetskog ventila (sl.5.50.) su:

- svitak elektromagneta (1),
- jezgro elektromagneta ili klip (2),
- osovina (3),
- opruga (4),
- brtva (5) i
- kućište (6).



Sl.5.50. Elektromagnetski ventil

Vrste elektromagnetskih ventila

Prema izvedbi, ventili su:

- dvoputni (jedan ulaz, jedan izlaz) - označuju se s 2/2 ili
- troputni (jedan ulaz, jedan izlaz, jedan izlaz za rasterećenje) - označuju se s 3/2.

Prema funkciji, razlikujemo dvije vrste elektromagnetskih ventila:

- NC - normalno zatvoren, tj. bez napona zatvoren - pod naponom otvoren i
- NO - normalno otvoren, tj. bez napona otvoren - pod naponom zatvoren.

Prema načinu djelovanja, ventili mogu biti:

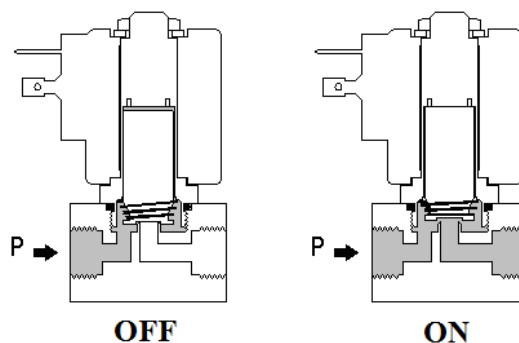
- s izravnim ili kombiniranim djelovanjem koji za svoj rad ne trebaju razliku tlaka između ulaza i izlaza ventila i
- servo ventili koji za svoj rad trebaju određenu razliku tlaka između ulaza i izlaza.

Na sl. 5.51. prikazan je način djelovanja ventila 2/2. 2/2 ventil ima ulazni i izlazni priključak u kućištu.

Ako je normalno zatvoren (2/2 NC), protok medija kroz ventil onemogućen je brtvom. Kada elektromagnet dobije napon, brtva otvori protok medija kroz ventil.

Ako je normalno otvoren (2/2 NO), protok medija kroz ventil je otvoren. Kada elektromagnet dobije napon, brtva onemoguća protok medija kroz ventil.

U oba slučaja djelovanjem magnetskog polja posredstvom jezgre elektromagneta preko osovine ostvaruje se pritisak na brtvu.



Sl.5.51. Djelovanje elektromagnetskog ventila