

Pogonski sistemi

Aktuatori

U ovom dijelu razmotrićemo pogonske sisteme robota. Prvo ćemo dati opšti pregled i karakteristike ranijih i savremenih pogonskih sistema kao i pogled na njihov budući razvoj. Ovu cjelinu obrađujemo odmah nakon kinematike jer su aktuatori značajni elementi pri kompletnoj dinamičkoj analizi industrijskih robota.

STANJE I PERSPEKTIVE RAZVOJA

U prethodnim djelovima više puta smo spominjali proste industrijske manipulatore kao preteču industrijskih robota. Takvi manipulatori obično su imali pneumatski pogon. Zglobove manipulatora pokretali su cilindri na bazi komprimovanog vazduha. Takav pogon omogućavao je pouzdan i veoma brz rad uređaja. Bez obzira na te kvalitete pneumatski pogon se vrlo rijetko sreće kod savremenih robota. Problem je u tome što se takav pogon teško reguliše, odnosno teško je ostvariti kretanje po zadatom zakonu. Ranije smo rekli da manipulatori za opsluživanje mašina nijesu ostvarivali neko zadato kretanje već su samo pomjerali hvataljku iz jedne tačke u drugu. Za zaustavljanje su korišćeni mehanički graničnici pa se nije postavljao složeniji problem regulacije. Pneumatski pogon pokrene zglob, a zglob se zaustavlja udarom u graničnik. Ovaj vrlo prost način pogona nije mogao zadovoljiti sve veće zahtjeve, pa se, bez obzira na usavršavanje, pneumatski pogon izbacivao iz upotrebe u robotici. Ipak, treba reći da je u poslednje vrijeme razvijen uspješan pneumatski servo-sistem koji bi mogao zadovoljiti složene zahtjeve koji se postavljaju pred savremene robote.

Jedan od prvih, a još uvek jednako aktuelnih pogonskih sistema u robotici je hidraulični pogon. U cilindru se nalazi ulje pod pritiskom. Pritisak, posredstvom klipa, pokreće zglobov robota. Regulacija kretanja ostvaruje se regulacijom pritiska u cilindru i protoka ulja kroz cilindar. Napajanje cilindra uljem i regulacija protoka vrši se pomoću uređaja koji se naziva servorazvodnik. Kako se u sklopu servorazvodnika nalazi i elektromotor koji pokreće klip razvodnika, to obično govorimo o elektrohidrauličnom pogonu.

Prednosti hidrauličnog pogona su znatne. Prije svega, moguće je ostvariti visoke pritiske u cilindrima, pa time i veoma velike sile u zglobovima robota. Dovoljno je sjetiti se bagera kašikara čija "ruka" se pokreće hidrauličnim pogonom. Zahvaljujući toj mogućnosti postizanja velikih sila roboti sa hidrauličnim pogonima nemaju reduktore što znatno pojednostavljuje konstrukciju. Treba još reći da je hidraulični pogon jednako pogodan i za translatorna i za rotaciona pomjeranja. Najveće prednosti hidraulični pogon iskazuje u primjeni kod teških robota. Ovi roboti, namenjeni manipulisanju sa većim teretima (od 100kg pa i više), moraju ostvariti velike pogonske sile i momente u svojim zglobovima. Hidraulični pogon, za razliku od drugih, vrlo lako ostvaruje takve sile. Pored toga, robot nema reduktor, a nije potrebna ni kompenzacija statičkog opterećenja.

Prvi robot Unimate imao je hidraulični pogon i u toj fazi razvoja robotike dominirao je ovaj oblik pogona. Hidraulični pogon omogućuje uspostavljanje veće tačnosti upravljanja zglobnom strukturom zahvaljujući servoventilima (razvodnicima) koji omogućavaju uspostavljanje proporcionalnosti između protoka ulja i upravljačke strukture.

Uz sav opisani značaj koji posjeduje hidraulični pogon, u posljednje vrijeme se uočava tendencija prelaska na električni pogon robota. Ranije je električni pogon korišćen za lake i srednje robote, a danas se i teški roboti sve više projektuju kao električni. Njihova široka upotreba posledica je najprije činjenice da je njihova regulacija relativno jednostavna, a zatim i nekih nedostataka hidrauličnih pogonskih sistema. Hidraulični pogon ima ograničenu maksimalnu brzinu klipa u cilindru, pa je otuda ograničena i brzina robota, a takođe uvijek prisutan problem curenja ulja.

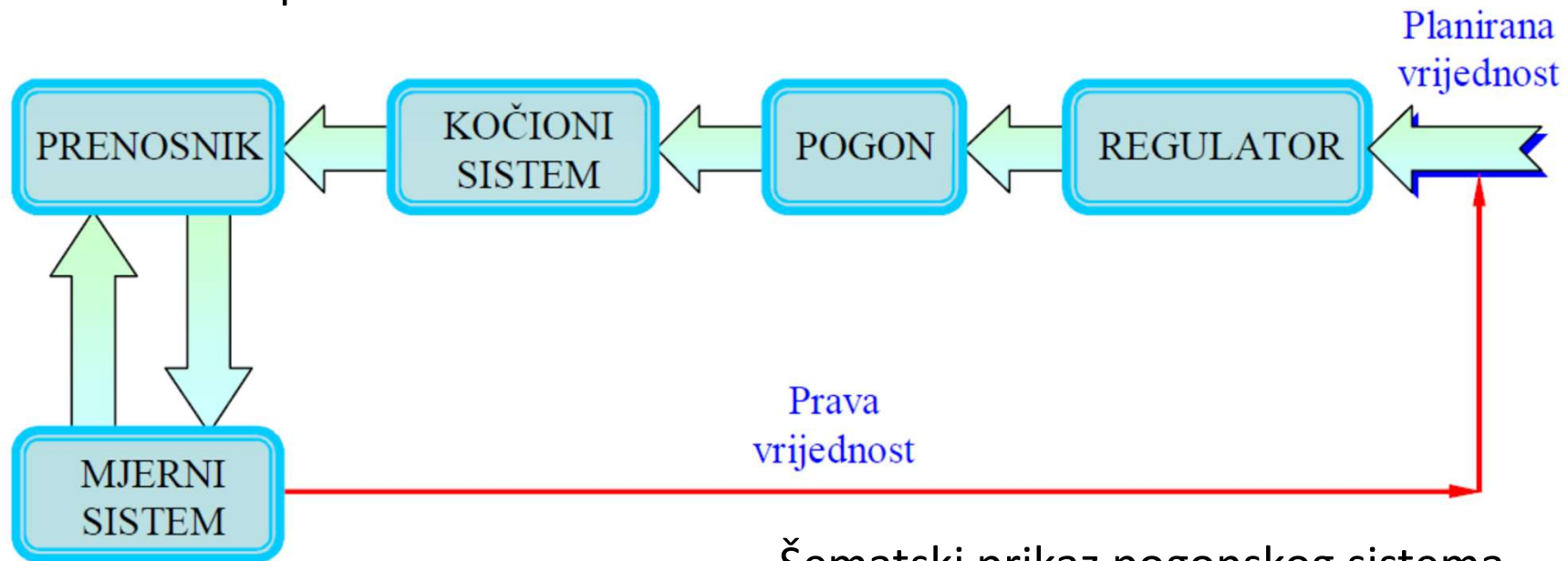
Hidraulični pogoni se još uvijek koriste kad su u pitanju nosivosti veće od 100kg. Za područje nosivosti 1 – 100kg koriste se električni pogoni, dok se za manje mase 0,2 - 15kg koriste pneumatski pogoni.

Poređenje pogonskih sistema s obzirom na tačnost pozicioniranja, nosivost i brzinu dato je u Tabeli

VRSTA POGONA	NOSIVOST (<i>kg</i>)	TAČNOST POZICIONIRANJA (<i>mm</i>)	BRZINA (<i>m/s</i>)
PNEUMATSKI	0,2 – 15	$\pm 0,1 - 1,0$	0,3 – 1,0
HIDRAULIČNI	40 – 500	$\pm 0,1 - 2,0$	0,75 – 5,0
ELEKTRIČNI	1 - 100	$\pm 0,02 - 1$	0,5 - 10

Pogoni robota imaju zadatak da postignu zadatu putanju, te pozicioniraju i orijentiršu završni uređaj. Najvažniji zahtjevi koje moraju zadovoljavati pogoni su:

- mala težina i zapremina motora,
- veći obrtni momenti,
- veće područje ugaonog zakretanja,
- veća tačnost pozicioniranja,
- velika pouzdanost itd.



Šematski prikaz pogonskog sistema

Uz konstataciju da se sve više koristi električni pogon robota treba ukazati i na niz problema koje takav pogon donosi.

Današnji motori za jednosmernu struju još uvek imaju prilično velike brzine obrtanja (na primjer 3000-4000 obrtaja u minuti), a ostvaruju relativno male pogonske momente (na primer do 20 Nm).

Zato su neophodni reduktori koji će smanjiti brzinu i povećati momenat. Prenosni odnosi reduktora moraju nekada biti prilično veliki (i do 300 puta). Pošto je trenje u reduktoru uvijek prisutno, gubi se dobar dio snage (kod dobrih reduktora do 15%), pa je to jedna od nepogodnosti ovakvog pogona.

Sledeći problem je mesto postavljanja elektromotora. Da bi se postigla bolja statička uravnoteženost robota motori se često postavljaju tako da su udaljeni od zglobova koje pokreću. Zato je potrebno projektovati mehanizam kojim će se pogon prenijeti od motora do zgloba. Takav mehanizam ne samo da usložnjava konstrukciju robota već donosi i neke druge probleme kao što je, na primjer, problem elastičnih deformacija i oscilacija u prenosnom mehanizmu.

Poseban nedostatak elektromotora jednosmerne struje je postojanje komutatora sa četkicama. Kod takve komutacije javlja se varničenje, smanjuje se dozvoljena brzina obrtanja, a dopunska nepogodnost nastaje zbog trošenja četkica. Ovi problemi, međutim, rešavaju se razvojem motora bez četkica (engl. brushless motors) tj. motora sa elektronskom komutacijom. Kod manjih robota sreću se često i koračni elektro motori (engl. stepping motors), veoma pogodni za povezivanje sa računarom. Međutim, budući da rade u otvorenoj sprezi, još uvek nije razriješeno pitanje njihove potpune pouzdanosti u smislu preciznog pozicioniranja pogotovo u radu sa većim teretima.

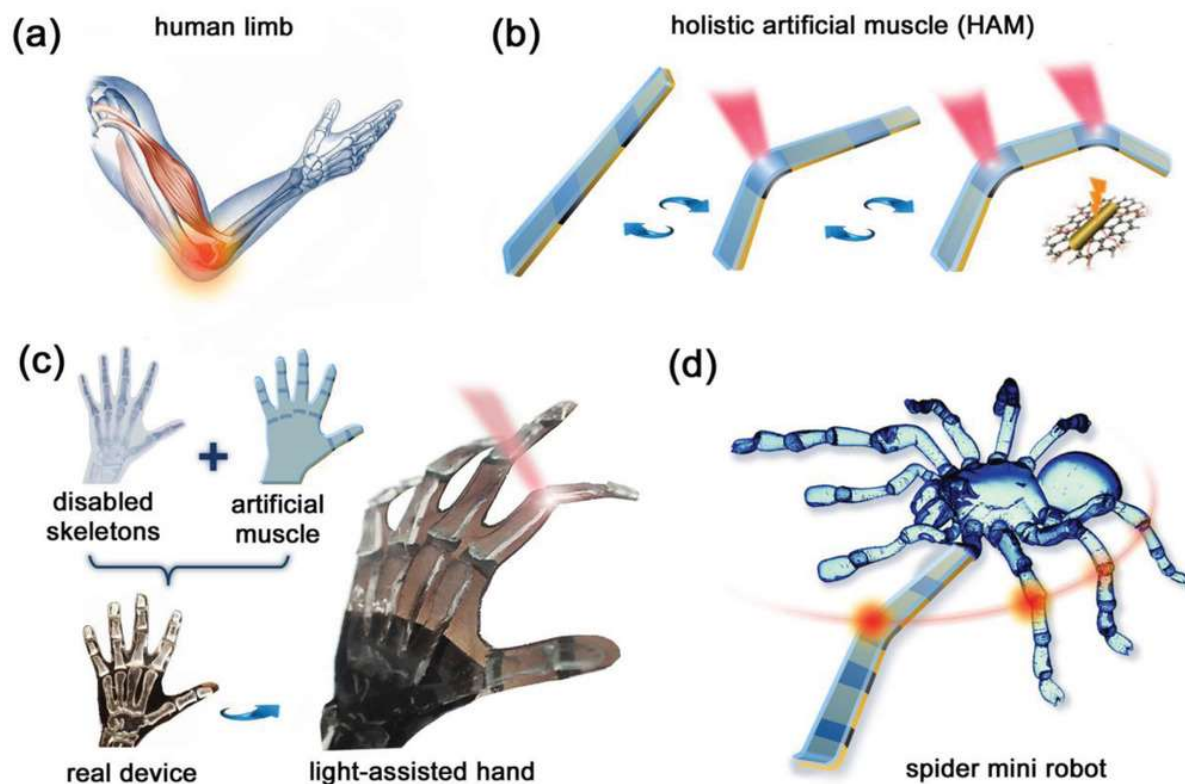
Ukažimo sada i na neke nove mogućnosti električnog pogona. Neke su već u potrebi, a neke su stvar blize ili dalje budućnosti. Kako je jedan od glavnih nedostataka elektromotora njihov mali pogonski momenat, a ovaj zavisi od magnetnog polja u motoru, to je usavršavanje usmjereno ka razvoju snažnih stalnih magneta čije bi snažno polje omogućilo veći pogonski momenat. Tako se već uveliko proizvode motori sa samarijumom-kobalt magnetima koji su omogućili znatno povećanje pogonskog momenta pri istim dimenzijama motora. To je ipak samo kvantitativni napredak. Nešto kvalitativno novo predstavljaju takozvani motori za direktni pogon. Često se koristi engleski termin direkt drajv (direct drive).

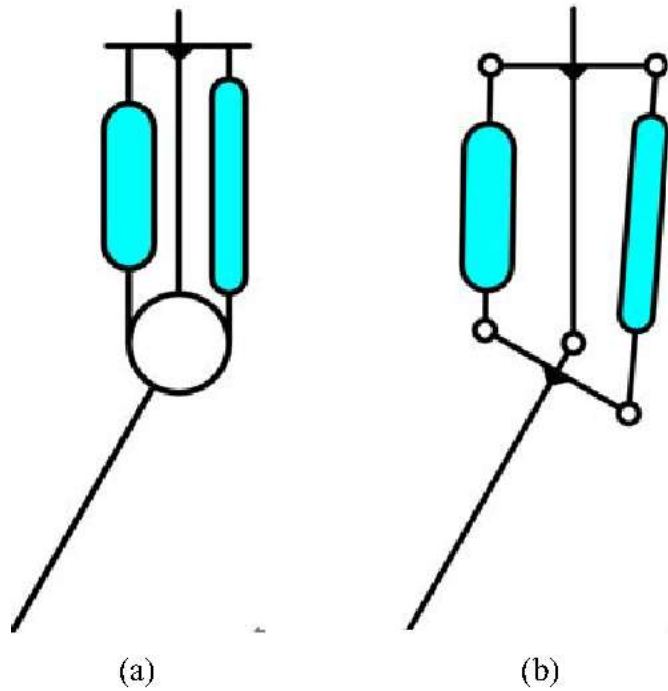
Ovi motori, zahvaljujući izuzetno snažnim magnetima i specifičnoj konstrukciji, ostvaruju izuzetno velike pogonske momente, pa više nema potrebe za reduktorom. Takvi motori postavljaju se direktno u zglobove i nema posebnog prenosnog mehanizma.

Još jedna novost u pogonu robota je upotreba motora za naizmjeničnu struju. U robotici se pojavljuju tek od skora prvenstveno zbog toga što je regulacija ovih motora, a to znači i upravljanje robotom složenije.

Par riječi o nekim idejama koje predstavljaju dalju budućnost u oblasti pogona robota. Već smo ranije, govoreći o razvoju robota, uočili da je jedan od osnovnih pravaca njihovog daljeg usavršavanja težnja ka sve većoj univerzalnosti u smislu mogućnosti kretanja. Cilj u dalekoj perspektivi je postizanje pokretljivosti koja bi bila ravna čovjekovoj. Otuda sve veća sličnost robota sa čovjekom, odnosno sa nekim djelovima čovjekovog tijela (na primjer ruka robota) ili pak sličnost sa životinjama (četvoronožne i šestonožne mašine). Zato je prirodna težnja da se dođe do pogonskog sistema koji bi nalikovao mišićima i stoga bio najprikladniji za ovakve konstrukcije. Mišići čovjeka i životinja sastoje se od mišićnih vlakana sposobnih za kontrakciju.

Kontrakcijom mišića ostvaruju se sile koje pokreću tijelo. Ako bismo željeli da ostvarimo vještački pogon sa istim osobinama, odnosno vještački mišić, neophodno je prvo konstruisati jedan tanki izduženi mehanički element sposoban za kontrakciju, dakle vještačko mišićno vlakno. Takvi elementi slagali bi se u snopove i na taj način formirali mišiće.





(a) (b)
 Fig. 2. Joint drive mechanisms

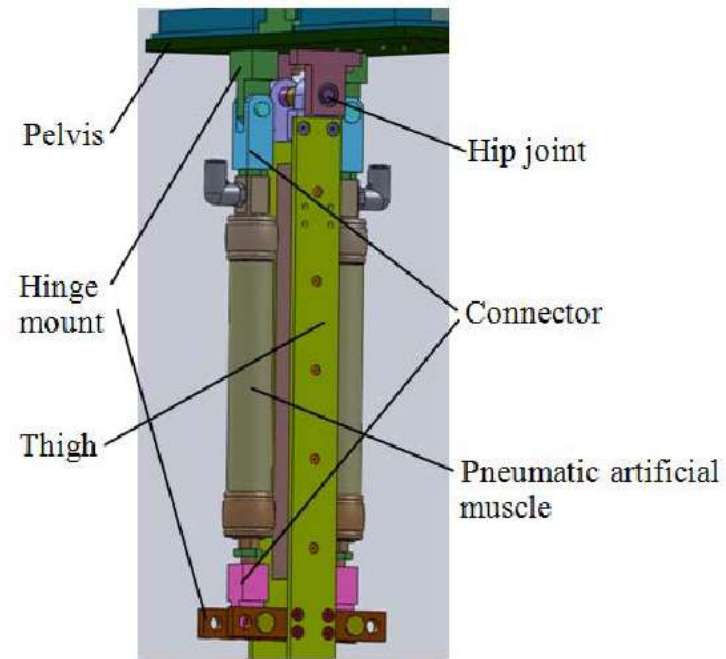
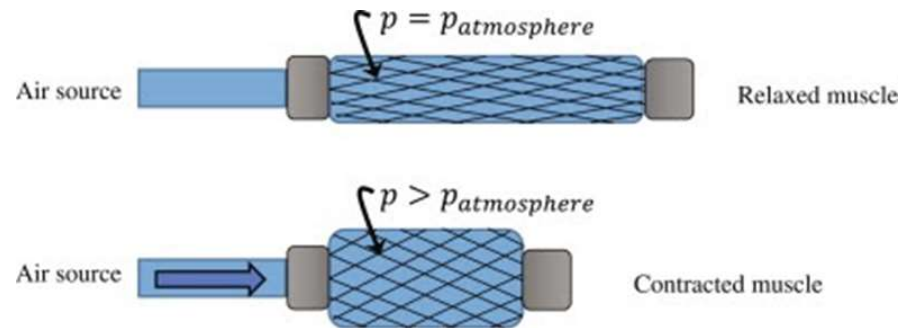


Fig. 3. Structure of joint drive mechanisms.





McKibben muscle



Pleated muscle by Vrije University of Brussel



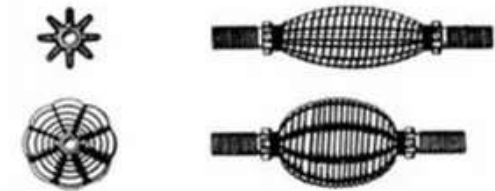
'Rubbertuator' by Bridgestone Company



Kukolj muscle



Air muscle by Shadow Robot Company



Yarlott muscle



PAM Actuator by FESTO

Ovdje možemo povući paralelu između vještačke inteligencije i vještačkog kretanja. Vještačka inteligencija podrazumijeva niz metoda kojima se formiraju računarski programi koji su sposobni za određene inteligentne postupke. U pitanju je, na primjer, mogućnost učenja, sticanja iskustva i na bazi toga donošenja logičnih i inteligentnih odluka. Zatim, tu su metode prepoznavanja oblika, analize i sinteze govora, itd. Da bi se realizovali svi ovi algoritmi, neophodno je raspolagati digitalnim računarom i on, zajedno sa svim programima, formira elektronski mozak. Osnovni sastavni deo ovakvog mozga je tranzistor, odnosno u novije vrijeme kompletna složena tranzistorska kola integrisana u minijaturne čipove.

Vratimo se sada vještačkom kretanju. Da bi postigli kretanje koje vjerno odgovara kretanju čovjeka ili životinje opet je neophodno raspolagati jednim osnovnim elementom. To bi se moglo nazvati mehaničkim ekvivalentnom tranzistora i u stvari je vještačko mišićno vlakno. Kako smo rekli, to je mehanički element sposoban za kontrakciju. Integrisanom elektronskom kolu odgovarao bi snop vlakana, dakle mišić. Ova analogija je i strukturna i funkcionalna. Naime, oba ova sklopa sastoje se od osnovnih elemenata koji djeluju kao jedna funkcionalna celina.



Fig. 4. Biped robot.

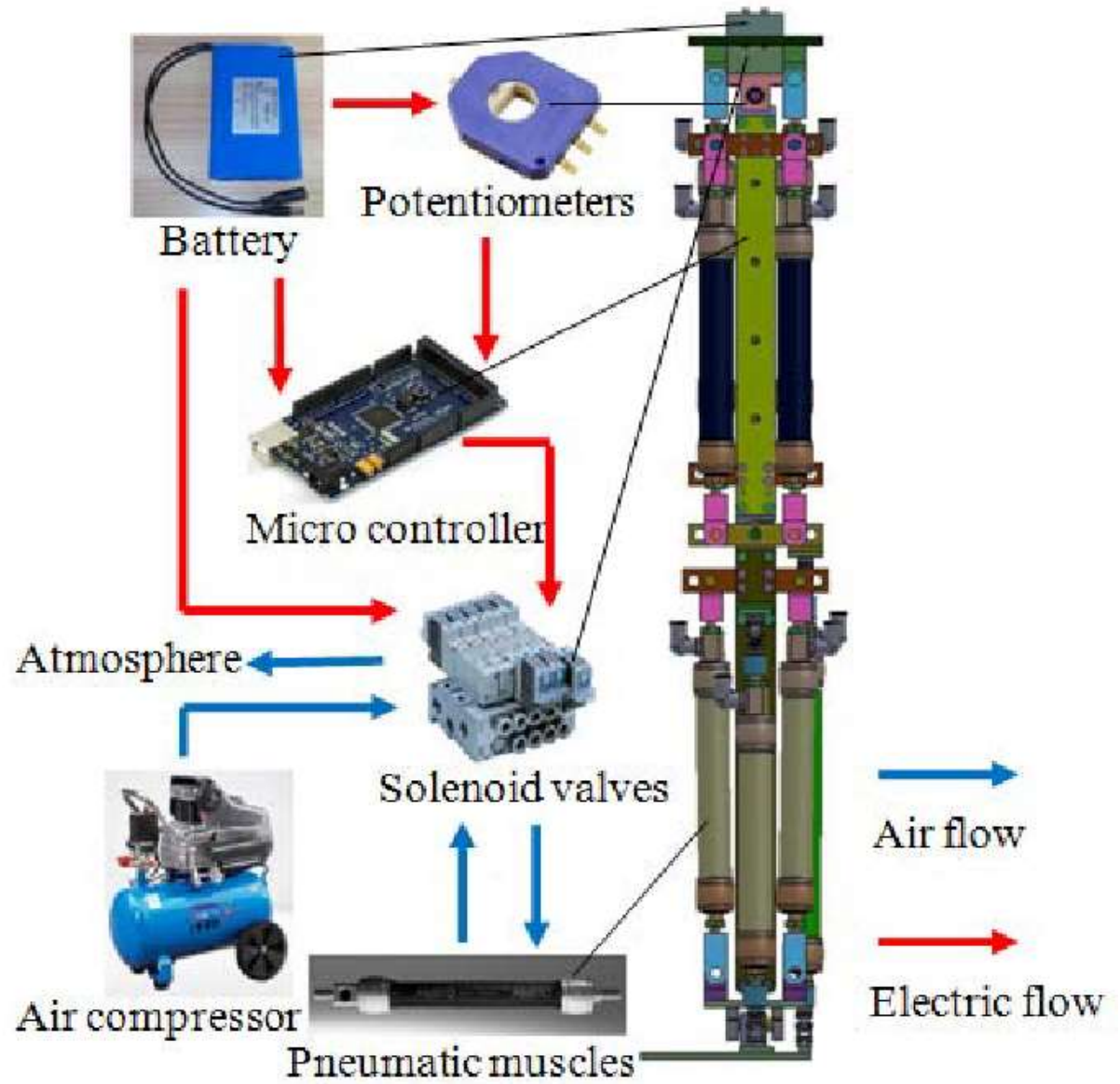
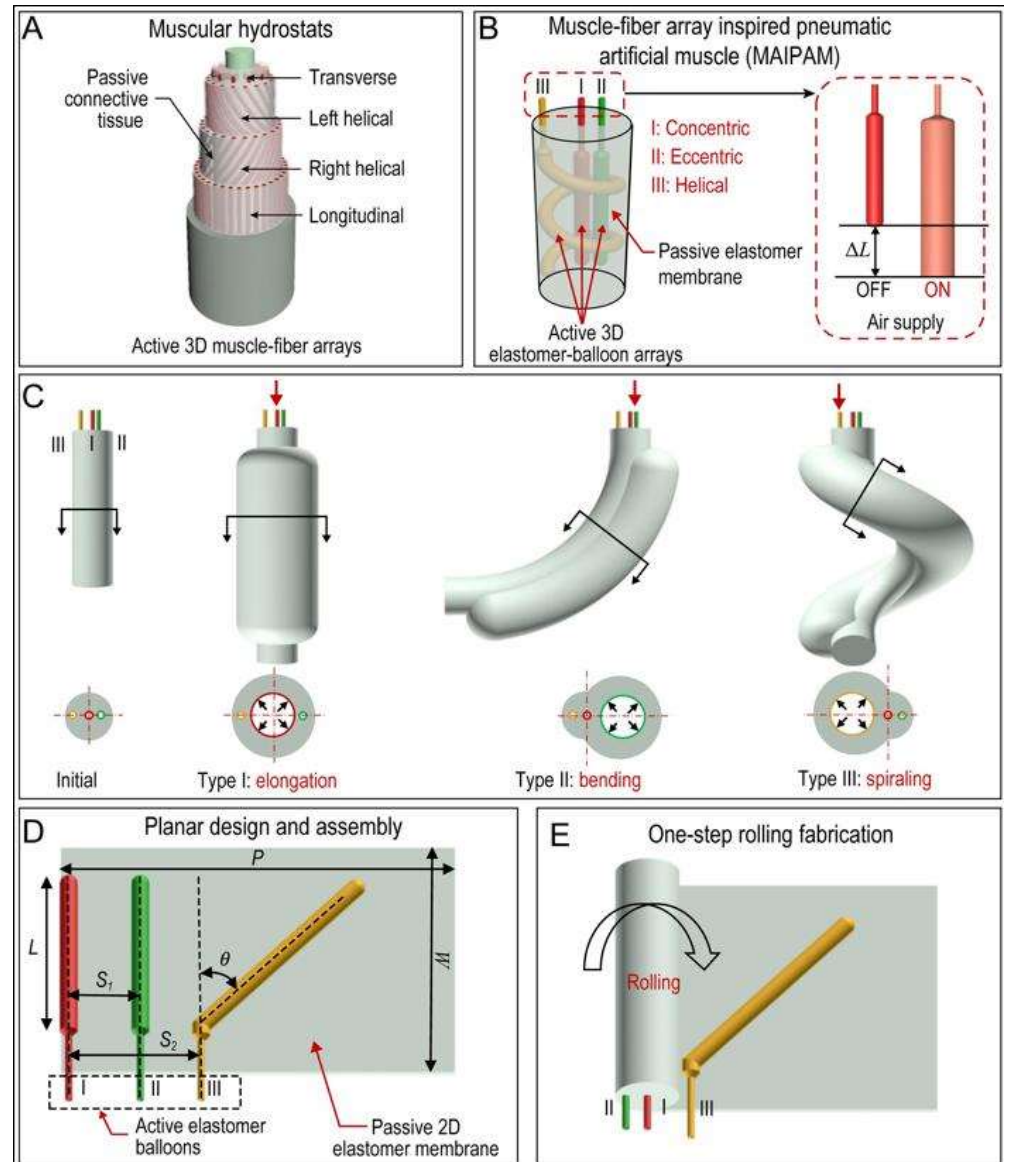
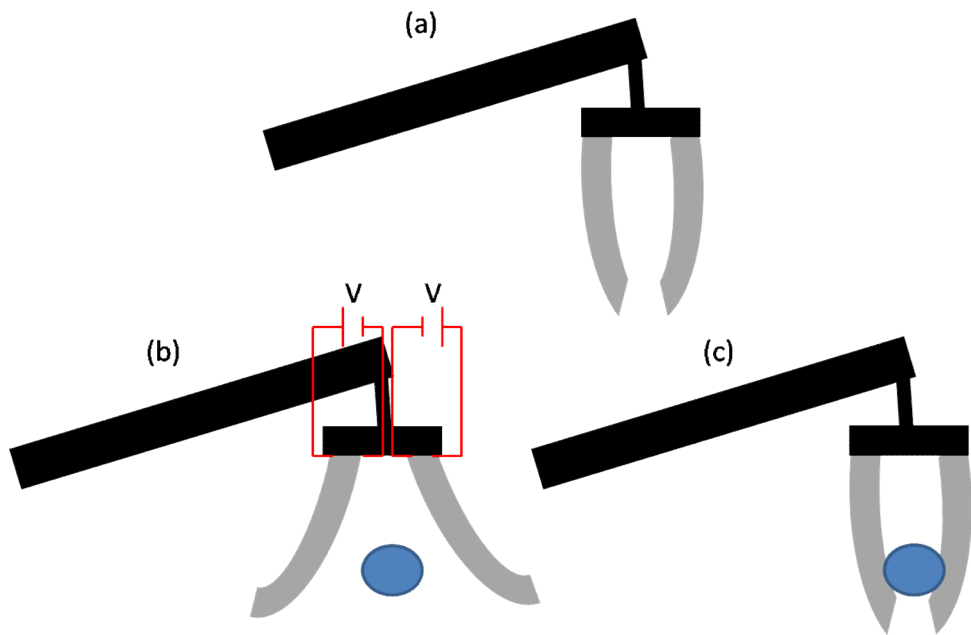
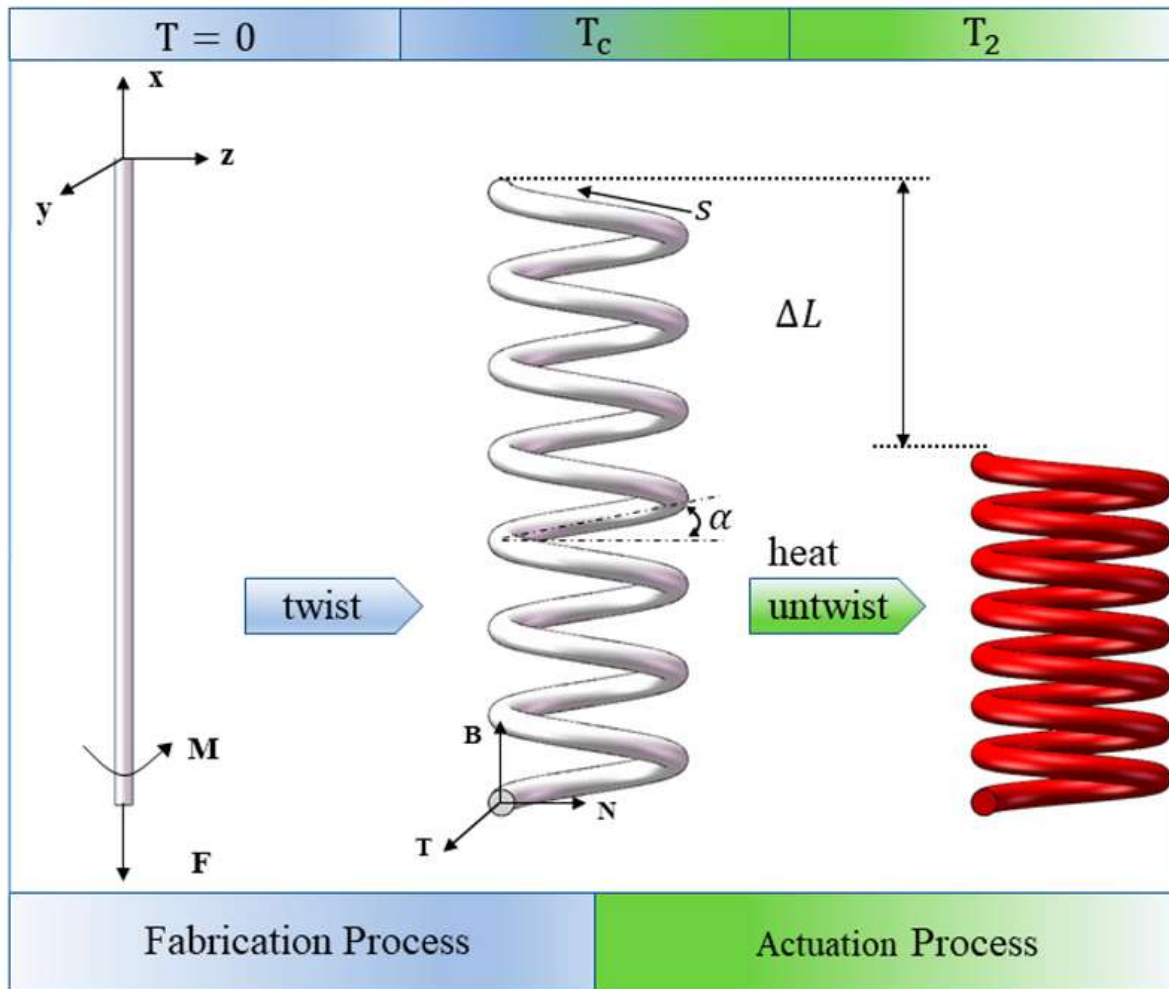
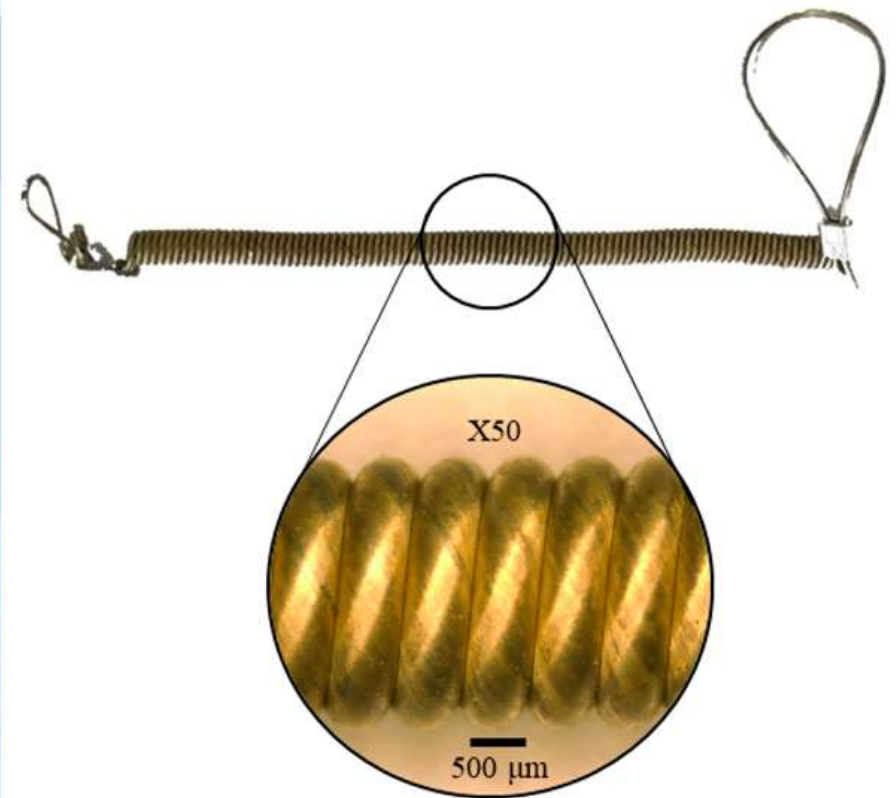


Fig. 5. System of the biped robot.





(a)



(b)

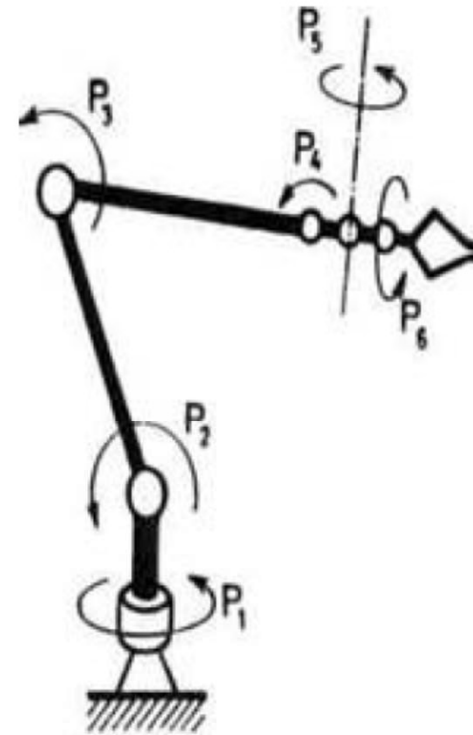
mišić upletenog i namotanog polimera (TCP).

Krutost naspram elastičnosti

Krutost je otpor materijala na deformaciju. To može biti krutost grede protiv savijanja pod opterećenjem, otpor gasa protiv kompresije u cilindru pod opterećenjem ili otpor vina na kompresiju u boci tokom začepjenja. „Tvrđi“ sistem zahtijeva veće opterećenje da bi se deformisao. Suprotno tome, elastičniji sistem zahtijeva manje opterećenje da bi se deformisao. Krutost je direktno povezana sa modulom elastičnosti materijala. Modul elastičnosti fluida može biti oko $1 - 10^6$ psi, što je veoma visoko. Kao rezultat toga, hidraulični sistemi su veoma kruti i neusaglašeni. Nasuprot tome, pošto je vazduh kompresibilan, pneumatski sistemi su kompatibilni. Kruti sistemi imaju brži odgovor na promenljiva opterećenja i pritiske i precizniji su. Očigledno, ako je sistem elastičan, može se lako deformisati (ili komprimovati) pod promjenama opterećenja ili promjenama pogonske sile; shodno tome, netačno. Slično, ako se mala pokretačka sila primijeni na hidraulični ram, zbog njegove krutosti, on reaguje brže i tačnije od pneumatskog sistema koji se deformiše pod opterećenjem. Pored toga, kruti sistem je otporan na deformaciju pod opterećenjem i stoga preciznije drži svoju poziciju. Sada razmotrite robota koji se koristi za umetanje IC čipa u ploču. Ako sistem nije dovoljno krut, neće moći da gurne čip u ploču jer se aktuator može deformisati pod uticajem sile otpora. S druge strane, ako dio i rupe nijesu savršeno poravnati, krut sistem se ne deformiše dovoljno da spriječi oštećenje robota ili dijela, dok elastični sistem omogućava sprečavanje oštećenja. Dakle, iako krutost uzrokuje sistem koji bolje reaguje i precizniji je, ona takođe stvara opasnost ako sve stvari nisu uvek savršene. Shodno tome, potrebna je radna ravnoteža između ove dvije konkurentne karakteristike.

U nastavku razmotrićemo najvažnije tipove pogonskih sistema u robotici. To su: različite vrste elektromotora, hidraulični pogon i pneumatski pogon. Posebnu pažnju obratićemo na mjesto postavljanja motora i na način prenosa pogonskog momenta. Konačno, razmotrićemo i mogućnost kompenzacije statičkog opterećenja.

Pogonski motori robota deluju većinom u zglobovima mehanizma izazivajući pomjeranja u zglobovima. Tako, pokrećući zglobove motori pokreću cio robot. Na slici 3.1 shematski je prikazan lanac jednog robota i dejstvo pogonskih momenata označenih sa P_1, P_2, \dots, P_n . Kao što se vidi, svaki motor pokreće jedan zglob.



Sl. 3.1. Shema lanaca i shema dejstva pogona

PNEUMATSKI POGON

To je jedan od najstarijih načina pokretanja robota. Pneumatski pogon zasniva se na pokretanju klipa u cilindru pomoću pritiska komprimovanog vazduha. Dakle, način rada je unekoliko sličan hidrauličnom pogonu ali uz bitnu napomenu - vazduh je, za razliku od ulja, stišljiv. Još treba naglasiti da pneumatski pogon radi sa znatno nižim pritiscima nego hidraulični.

Ovakav tip pogona ima svoje prednosti, ali i nedostatke.

Prednosti pneumatskog pogona su:

- relativno jeftin,
- jednostavna gradnja,
- brzo vrijeme reakcije,
- mogu ostvariti pravolinijska i obrtna kretanja,
- otporni su na preopterećenje, zapaljivost, visoke temperature, zračenje i elektromagnetne smetnje.

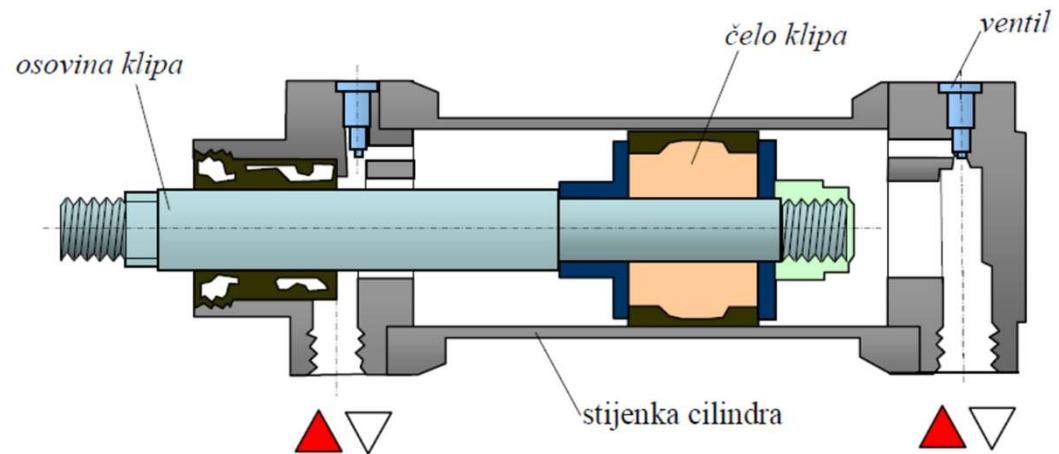
Nedostaci pneumatskog pogona su:

- buka pri radu,
- nekontrolisana brzina kretanja,
- pogon od tačke do tačke,
- loše pozicioniranje,
- potreba za sušenjem, čišćenjem i podmazivanjem,
- manja sposobnost nošenja velikih tereta,
- kraći radni vijek.

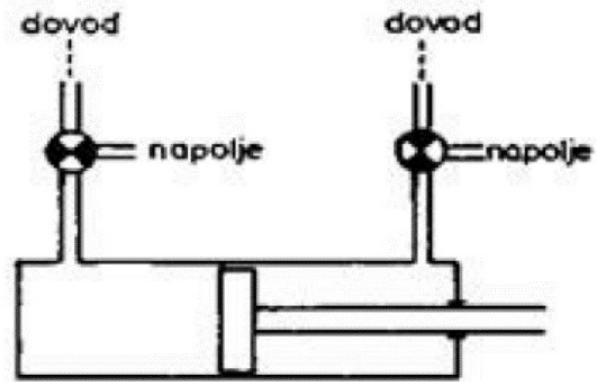
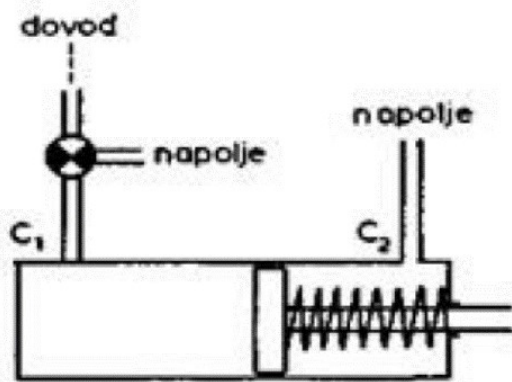
Za zaustavljanje robota i definisanje njegovog kretanja koriste se mehanički graničnici.

Pneumatski sistem se sastoji od slijedećih komponenata:

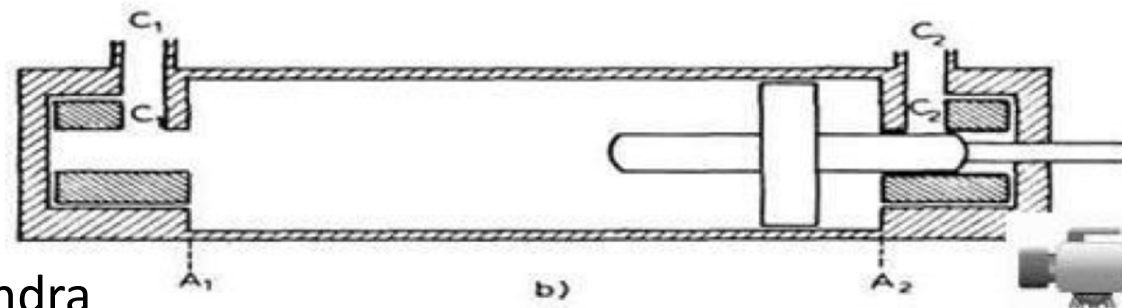
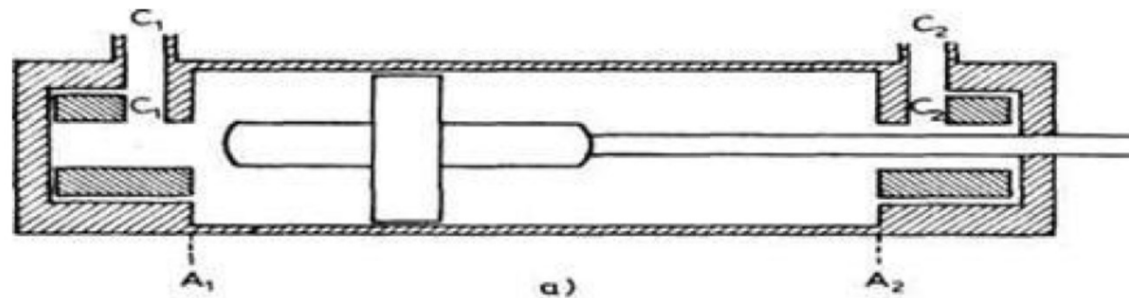
- klip i
- cilindar.



Danas se pneumatski pogon kod robota sreće prilično rijetko. Glavni problem je u regulisanju kretanja, odnosno u ostvarivanju željenog kretanja klipa (zadata promjena brzine). Zato se pneumatski pogon prvenstveno nalazi kod prostih industrijskih manipulatora. U tim primjenama klip u cilindru se pod pritiskom kreće od jednog kraja do drugog po nekom nelinearnom zakonu na koji ne utičemo. To je često dovoljno za prosto premještanje radnih predmeta. Objasnićemo ukratko ovakav rad pneumatskog cilindra, mada treba reći da se u posljednje vrijeme razvijaju i uspješni pneumatski servosistemi. Komprimovani vazduh se, po pravilu, dobija iz glavnog fabričkog kompresora, odnosno rezervoara smještenih u njegovoj blizini. Fabrička razvodna mreža obezbeđuje komprimovani vazduh na radnom mjestu robota-manipulatora. Pneumatski cilindar može biti jednosmernog i dvosmjernog dejstva. Cilindar jednosmernog dejstva može proizvoditi silu samo pri kretanju u jednom smjeru. Kretanje u drugom smjeru vrši se pod dejstvom povratne opruge. Ulazni otvor označen je sa C1, a C2 je izlazni otvor kroz koji se vazduh ispušta u spoljašnju sredinu. Naime, kod pneumatskog pogona, za razliku od hidrauličnog, radni fluid se ne vraća u rezervoar pa nema povratnog voda. Kod cilindra dvosmjernog dejstva vazduh pod pritiskom može da se dovodi i na otvor C1 i na otvor C2. Tako se može ostvariti sila u oba smjera.



Cilindri jednosmjernog i dvosmjernog dejstva



Princip rada pneumatskog cilindra

Šema cilindra sa klipom prikazana je na slici 3.30. Kada se vazduh pod pritiskom pusti kroz otvor C1 klip se brzo pokreće u smjeru od A1 ka A2 (udesno na slici 3.30a). Vazduh koji se nalazio u cilindru sa desne strane klipa ističe pri tome kroz otvor C2. Kada klip dođe u neposrednu blizinu položaja A2, istureni deo klipa zatvoriće široki prolaz otvora C2 (sl. 3.30b).

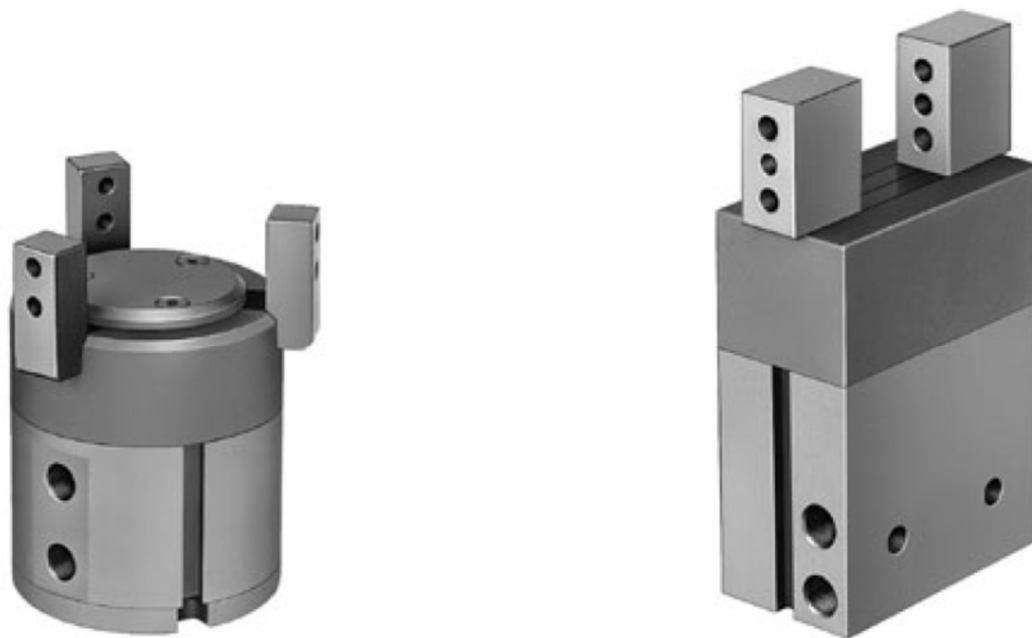
Ipak, vazduh nastavlja da ističe kroz uski prolaz otvora. Ovo isticanje kroz uski prolaz je znatno sporije, pa će doći do sabijanja vazduha sa desne strane klipa što će bitno usporiti kretanje klipa. Tako, klip će konačno stići u položaj A2 ali neće udariti velikom brzinom. Ovakvo usporenje bilo je neophodno da bi se izbjegao jak udar i oštećenje cilindra. Ako se na otvor C2 stave dopunski prigušivači, može se postići sporije pomjeranje klipa u cilindru celim putem kretanja.

Treba, na kraju, spomenuti i neke komponente koje se po pravilu sreću kod pneumatskog pogona: uređaji za filtriranje i lubrikaciju vazduha, prigušivači buke itd. Prigušivače buke posebno spominjemo jer pneumatski pogon karakteriše jaka buka koja nastaje prilikom ispuštanja vazduha u spoljašnju sredinu.



Izvedbe pneumatskog aktuatora

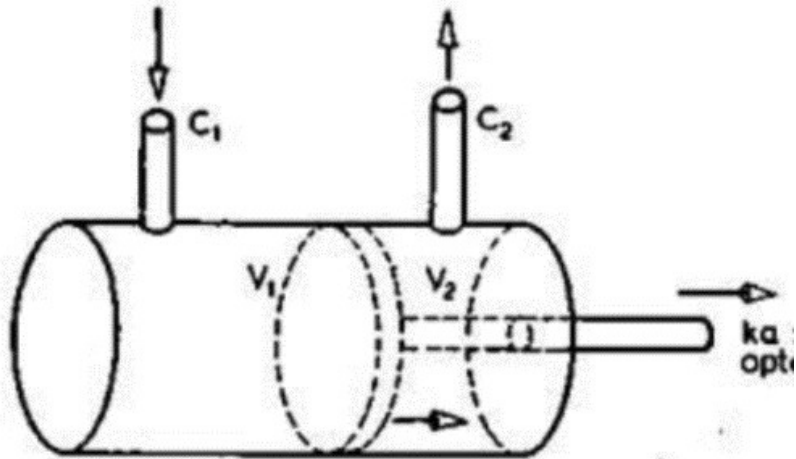
Primjena pneumatskih pogona je veoma široka tamo gdje se ne traže visoke sile zbog njihove jednostavne konstrukcije, prostog održavanja i niske cijene. Primjenu pneumatike imamo i kod hvataljki robota, a neki primjeri su dati na slijedećoj slici.



ELEKTROHIDRAULIČNI POGON

Ovi pogoni rade na bazi komprimiranog ulja. Hidrauličnim pogonom moguće je ostvariti visoke pritiske u cilindru, a time i velike sile u zglobovima robota. Ovaj pogon ima ograničenu maksimalnu brzinu klipa u cilindru pa je iz tog razloga ograničena i brzina robota.

Kao kod pneumatskih sistema, hidraulično regulisani sistemi se sastoje od izvora energije (pumpe), hidrauličnih vodova, razvodnika i samog aktuatora (tj. linearnog ili obrtnog klipa u robotima). Glavna razlika je u činjenici da razvodnik može biti proporcionalno regulisan i na taj način omogućava konvencionalnu upotrebu hidrauličkih servo-sistema, dok kod pneumatskih sistema razvodnik radi na principu “uključeno-isključeno”.

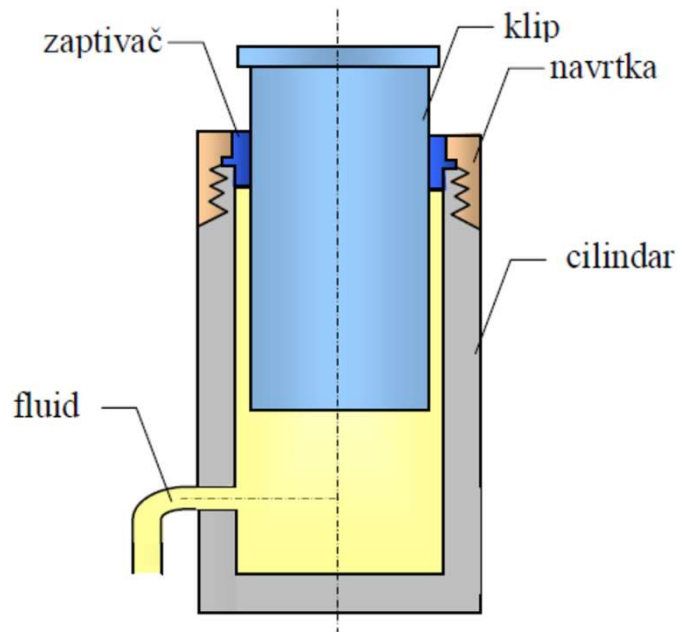


Hidraulični cilindar

Cilindar sa klipom prikazan je na slici. Napajanje se vrši hidrauličnim uljem veoma male stišljivosti. Ako se ulje pod pritiskom dovodi na ulaz C1 tada će se klip pomjerati udesno. Zapremina V_1 će se povećavati, a V_2 smanjivati. Kroz izlaz C2 oticaće ulje iz cilindra. Ukoliko želimo da ostvarimo kretanje ulijevo, promijenićemo smjer protoka ulja. C2 postaje ulaz, a C1 izlaz. Protok i razlika pritisaka određuju ne samo smjer već i brzinu kretanja klipa. Klip dalje vezujemo za određene spoljašnje mehanizme koje želimo pokrenuti i koje nazivamo spoljašnjim opterećenjem (na primer zglob robota).

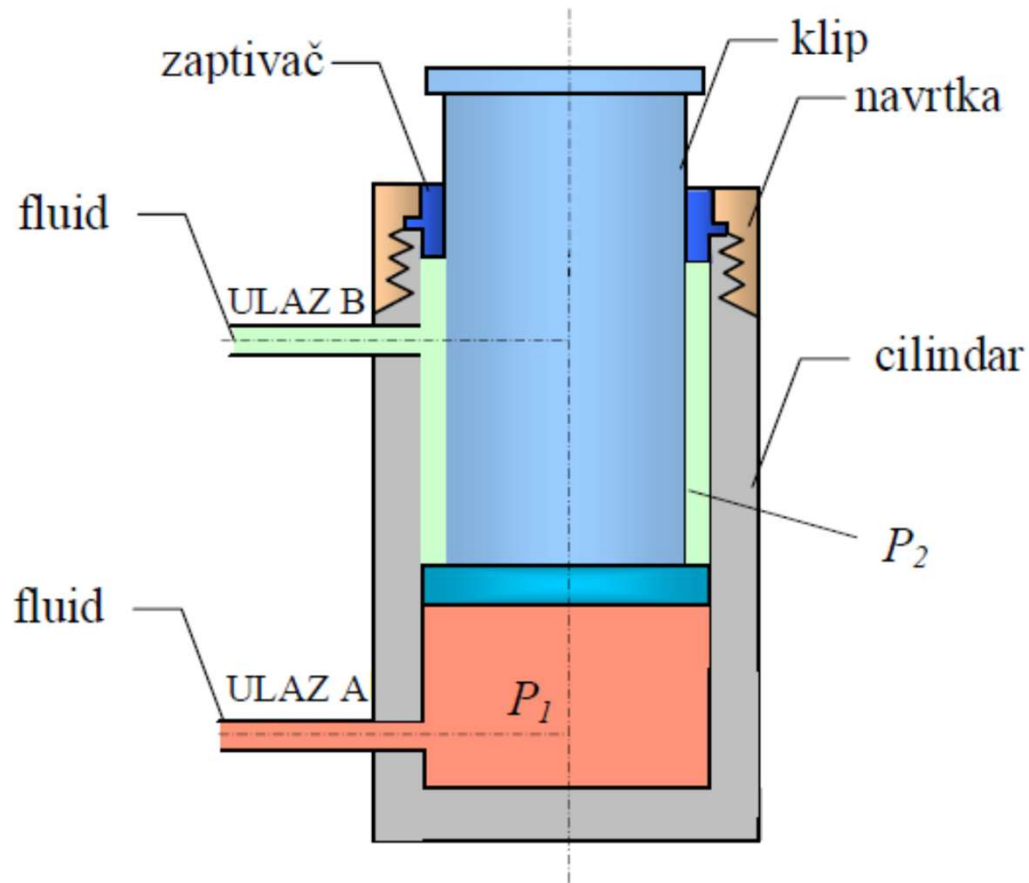
Postoje tri tipa linearnih cilindara:

- klip jednostrukog djelovanja,
- klip dvostrukog djelovanja i
- diferencijalni klip.



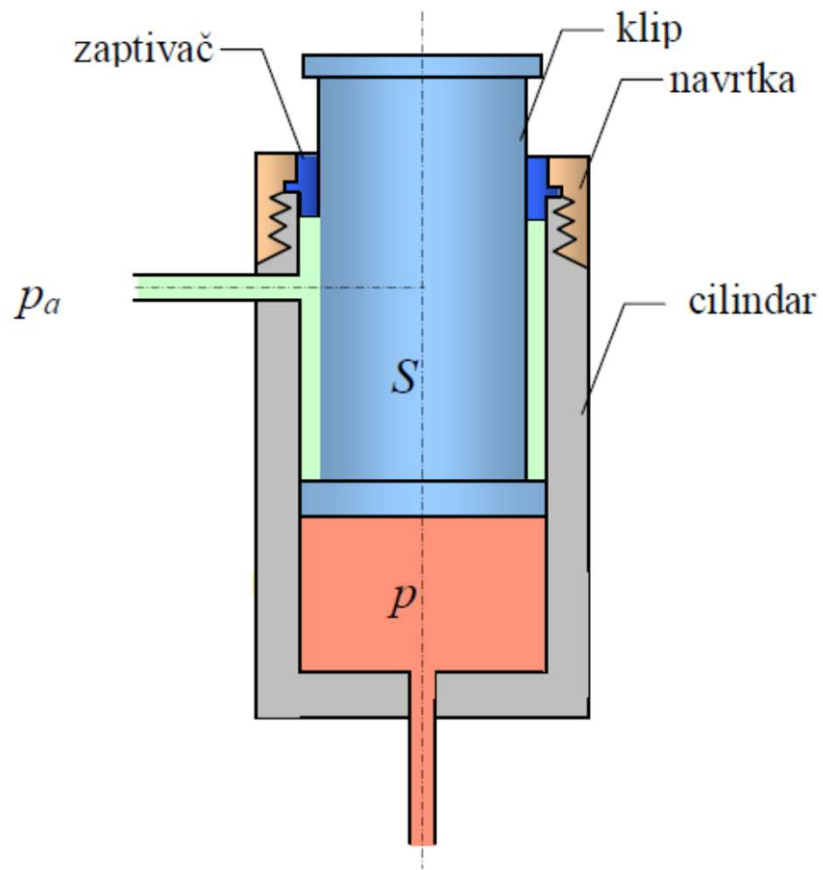
Kod cilindra jednostrukog djelovanja (slika), razvijena sila je jednosmjerna. Povratni uređaj (npr. opruga) osigurava povrat osovine klipa u početni položaj.

Hidraulični cilindar jednostrukog djelovanja



Klip dvostrukog djelovanja ima dvije komore u kojima se pritisak p_1 i p_2 može naizmjenično određivati (slika). Treba obratiti pažnju da prisustvo klipne osovine samo u jednoj komori znači da je klip asimetričan u odnosu na pritisak koji je potreban da se dobije isto kretanje nadesno i nalijevo.

Hidraulični cilindar dvostrukog djelovanja



Za dugi hod klipa koristi se diferencijalni klip (slika). Poprečni presjek s osovine klipa jednak je polovini površine tijela klipa S , odnosno $S = 2s$.

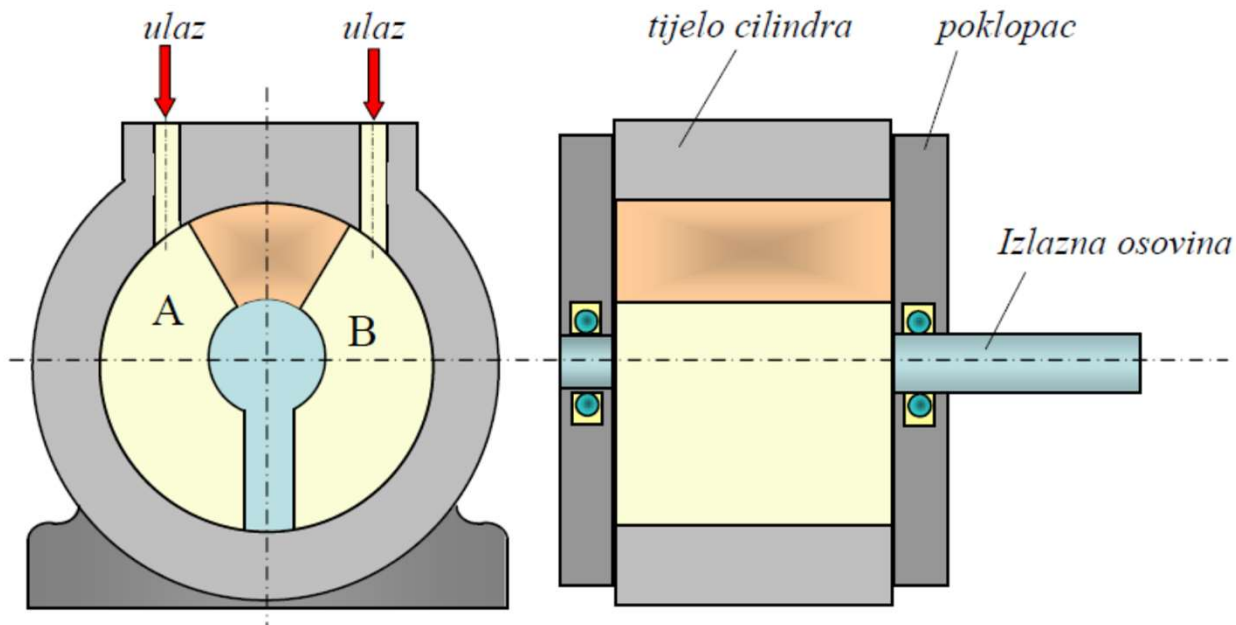
Razvijena sila je:

$$F = s(2p - p_a)$$

Hidraulični diferencijalni cilindar

Obrtni (zakretni) motori

Kao što je slučaj sa pneumatskim klipovima, moguće je na mehanički način transformisati linearno kretanje hidrauličkog klipa u obrtno kretanje. Postoji, međutim tip klipa koji je napravljen da rotira. To je obrtni klip (slika).

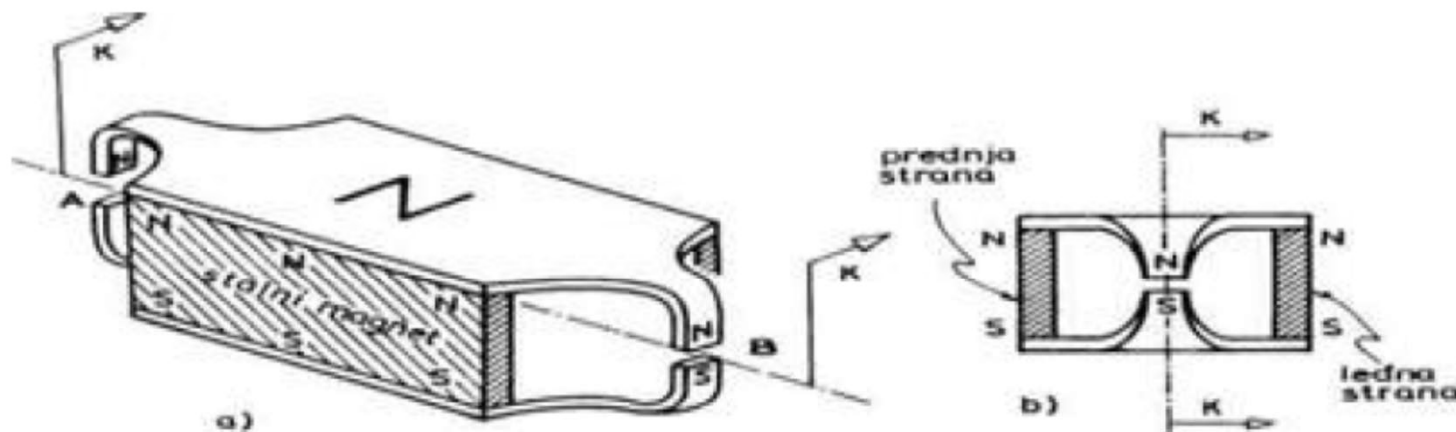


Hidraulični obrtni motor

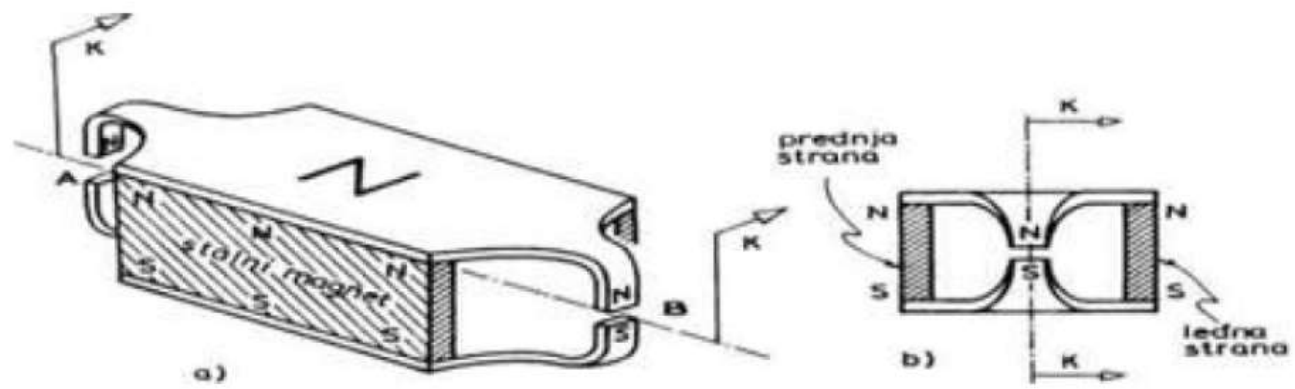
Najjednostavnija verzija sastoji se od cilindra s fiksnim zatvaračem. Unutar njega obrće se mobilni zatvarač koja čini cjelinu s izlaznom osovnom. Hod klipa je ograničen dimenzijama zatvarača na oko 330 stepeni.

Servorazvodnik se sastoji od razvodnika i magnetnog motora sa opružnom povratnom spregom.

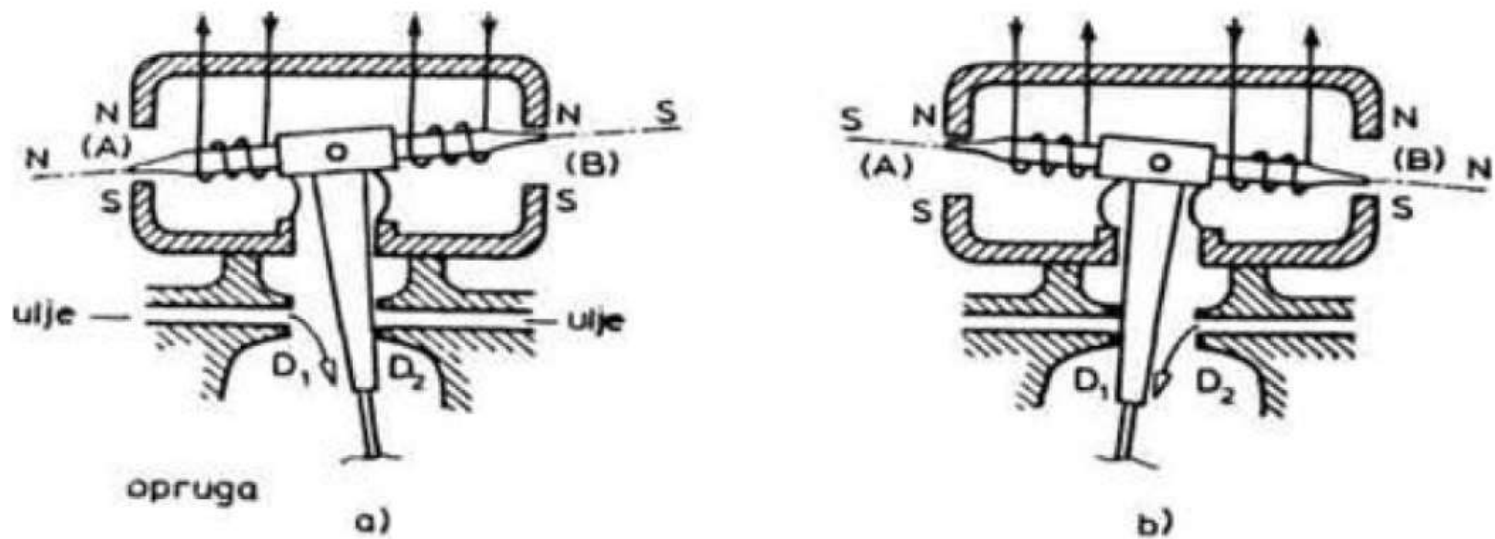
Objasnimo prvo konstrukciju i način rada motora. Na prednjoj i leđnoj strani (sl. 3.23.) postavljena su uspravno dva pločasta stalna magneta. Ovim se postiže da cijela gornja ploča bude sjeverni pol (N), a donja južni pol (S). U prorezima A i B javiće se sada jako magnetno polje. U unutrašnjost konstrukcije smješta se kotva sa namotajima. Presek K-K označen na slici 3.23. prikazan je na slici 3.24



Sl. 3.23. Konstrukcija magnetnog motora

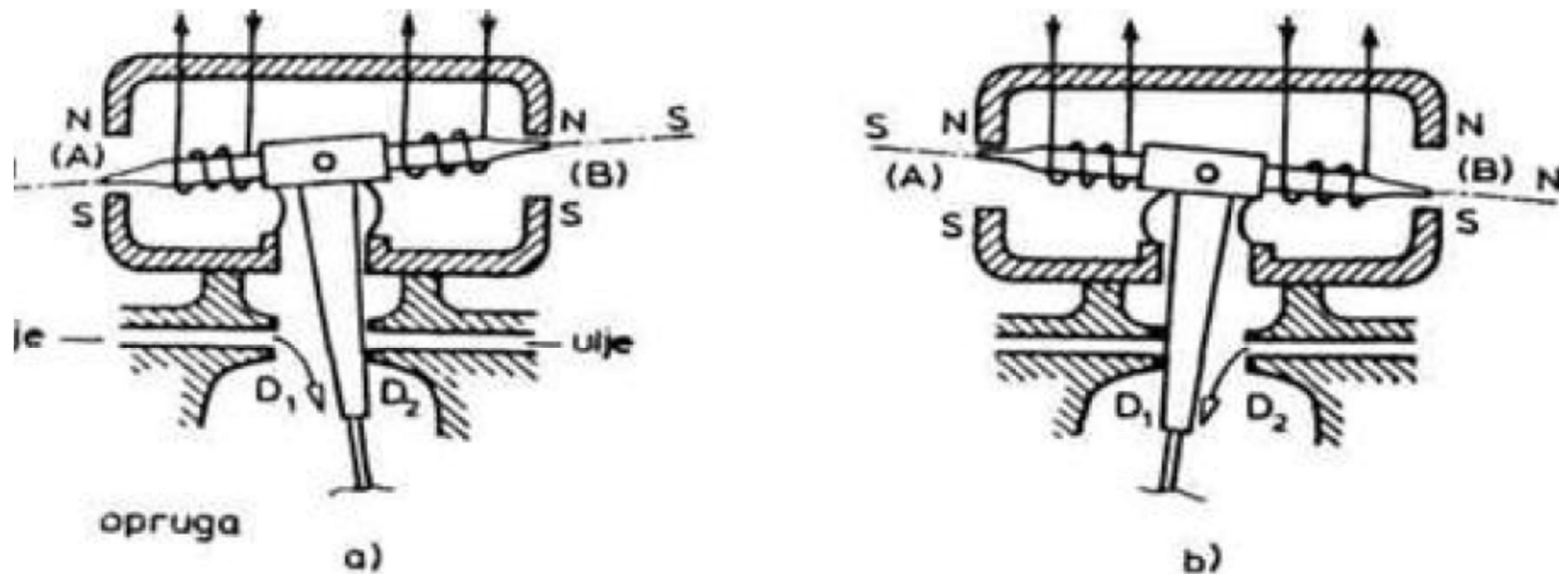


Sl. 3.23. Konstrukcija magnetnog motora



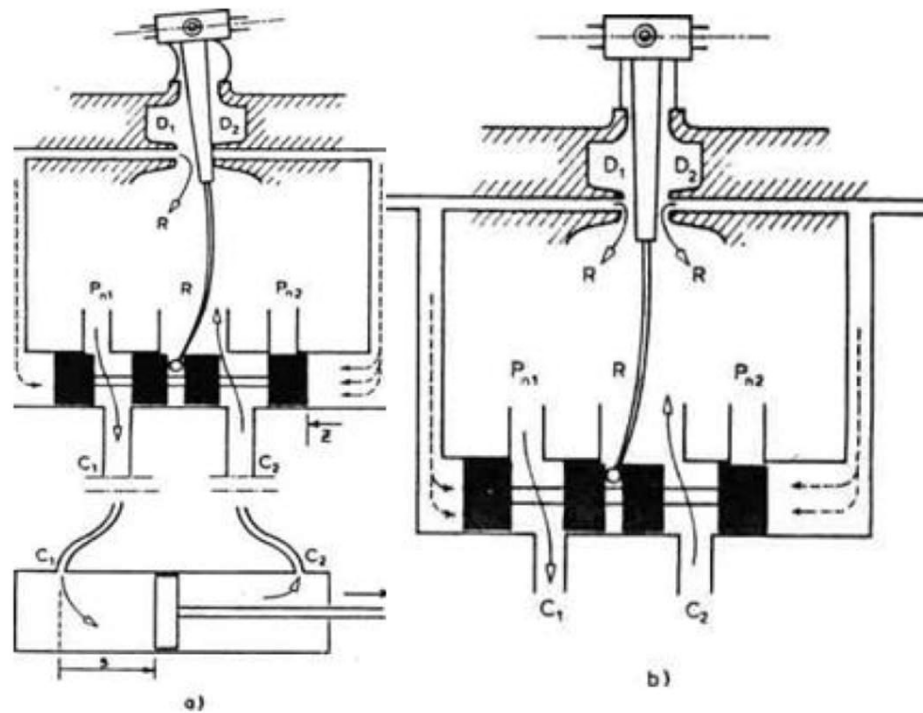
Sl. 3.24. Princip rada magnetnog motora

Ako se kroz namotajeпусти struja smjera prikazanog na sl. 3.24a, na kraju A će se indukovati sjeverni, a na kraju B južni pol. Usled toga kotva će se obrnuti ulijevo. Ako se smjerovi struja promijene (sl. 3.24b), kotva će se obrnuti udesno. Zajedno sa kotvom pomjera se i leptir koji zatvara desni ili lijevi dovod ulja (D1,D2) kao što je prikazano na slici 3.24.

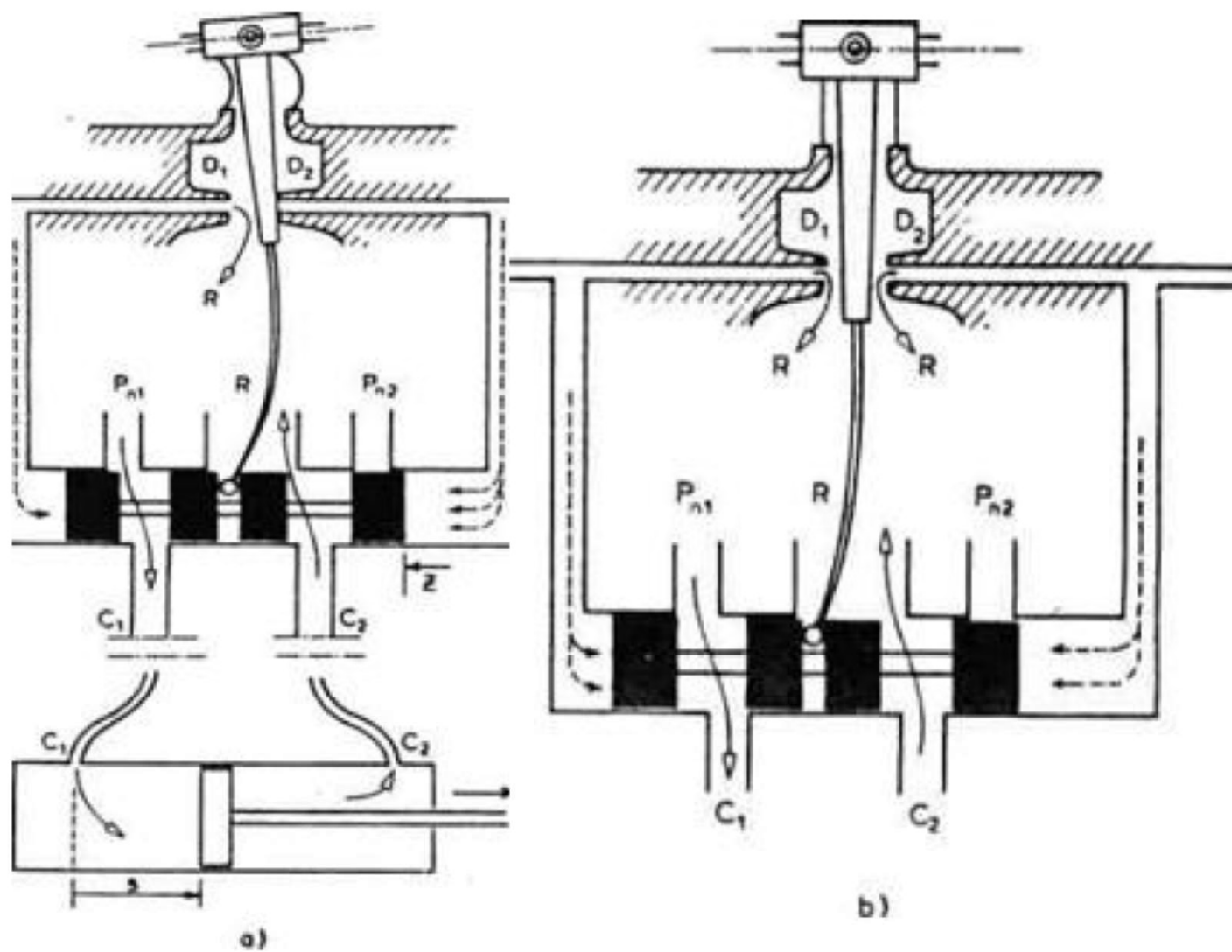


Sl. 3.24. Princip rada magnetnog motora

Pretpostavimo da je kroz namotaje puštena struja i i da se kotva obrnula ulijevo pomerajući leptir udesno i time zatvarajući otvor D_2 za protok ulja (sl. 3.25a). Sada ulje kroz desnu liniju ostvaruje pritisak na desnu stranu klipa razvodnika i on se pomjera ulijevo (pomjeranje z). Desni glavni dovod ulja P_{n2} je sad zatvoren. Iz levog glavnog dovoda P_{n1} i kroz vod C_1 ulje protiče u cilindar. Klip cilindra pomera se udesno (pomjeranje s), a ulje otiče kroz cijev C_2 i povratni vod R . Pomjeranjem klipa pomjeraju se i spoljašnji mehanizmi vezani za klip.



Sl. 3.25. Cilindar sa servorazvodnikom



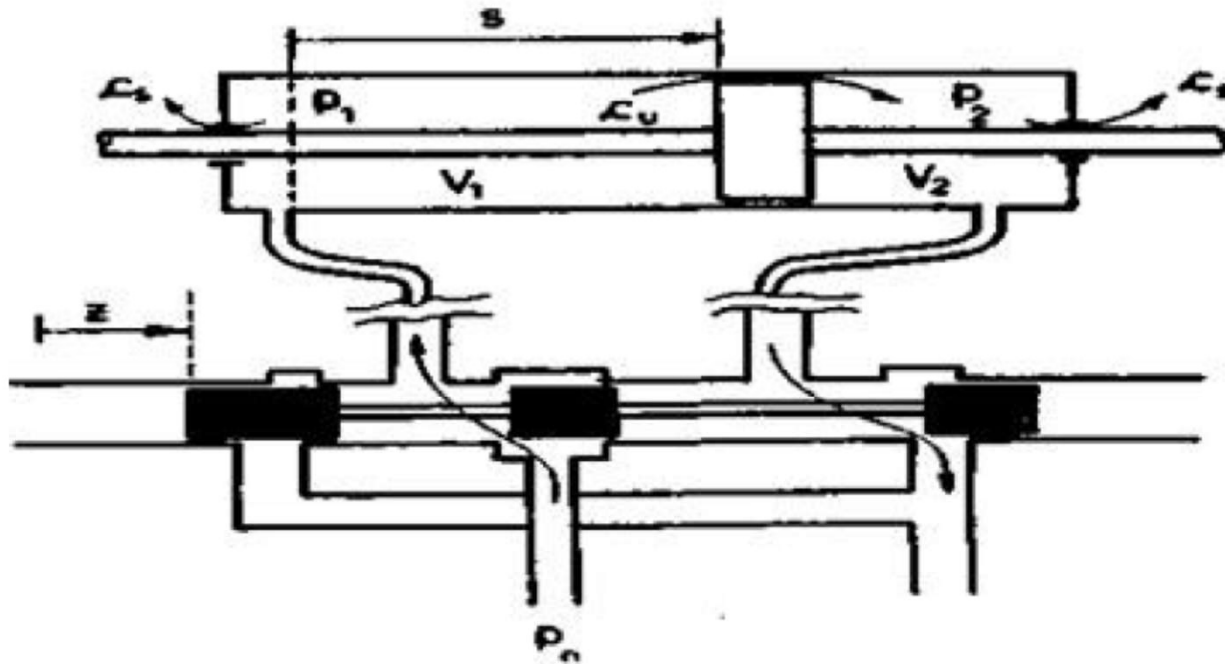
Sl. 3.25. Cilindar sa servorazvodnikom

Pomjeranjem razvodnika ulijevo dolazi do elastične deformacije opruge povratne sprege. Pri određenoj veličini deformacije elastični momenat počće da pomjera leptir ulijevo čime se djelimično otvara dovod D2 . Proticanje ulja kroz D2 smanjiće pritisak sa desne strane klipa razvodnika p_2 , on je još uvek veći od pritiska sa lijeve strane, pa klip nastavlja kretanje ulijevo.

Pritisci se izjednačuju kada se izjednače protoci kroz D1 i D2 tj. kad leptir bude vertikaln a kotva motora horizontalna (sl. 3.25b). Klip razvodnika se zaustavlja i u tom položaju (z) uspostavljena je ravnoteža momenta motora i elastičnog momenta opruge. Tom položaju razvodnika odgovara određeni protok iz glavnog dovoda P_{n1} kroz cilindar, a time i određena brzina pomjeranja klipa u cilindru. Kako moment motora zavisi od struje i , to možemo reći da protok kroz cilindar (i kretanje klipa z) zavisi od struje motora. Promjenom struje promijenićemo moment motora, pomjeriti razvodnik (tj. promijeniti z) i tako promijeniti protok kroz cilindar.

Matematički model

Pri izvođenju matematičkog modela hidrauličnog pogonskog sistema uvešćemo određena uprošćenja. Simetričan cilindar (sl. 3.26) obezbeđuje da površine klipa sa obje strane budu jednake i pojednostavljuje račun. Takođe, zanemariće se dinamika servorazvodnika.



Sl. 3.26. Simetrični cilindar

Posmatrajmo dinamičku ravnotežu klipa u cilindru. Neka su p_1 i p_2 pritisci ulja sa jedne i druge strane klipa, a A slobodna površina klipa (jednaka sa obe strane). Tada na klip deluje sila pritiska

$$F = p_1 A - p_2 A = (p_1 - p_2) A = p_d A$$

Gdje je p_d razlika pritisaka (diferencijalni pritiska). Ovoj sili suprotstavlja se inercijalna sila klipa

$$F_1 = ma = m\ddot{s},$$

gdje je m –masa, a - ubrzanje, a s koordinata pomjeranja klipa, zatim se suprotstavlja sila viskoznog trenja

$$F_T = B\dot{s},$$

gdje je B koeficijent, a \dot{s} brzina. Konačno sili F suprotstavlja se sila F_M spoljašnjeg opterećenja. F_M predstavlja izlaznu silu hidrauličnog poligona. Dinamička ravnoteža data je izrazom

$$F = F_1 + F_T + F_M \quad \text{ili} \quad p_d A = m\ddot{s} + B\dot{s} + F_M$$

Sada ćemo posmatrati protok ulja kroz cilindar i označićemo ga sa Q . Zapreminski protok definišemo kao količnik protekle zapremine ulja i vremena. Za cilindrične zapremine, ovaj količnik će postati proizvod površine poprečnog preseka i brzine: $A\dot{s}$. Međutim, zbog curenja i zbog sabijanja (kompresije) ulja, ovom protoku će se dodati dopunski sabirci: Cp_d zbog curenja i $\frac{V}{4\beta}\dot{p}_d$ zbog kompresije.

Curenje ulja je posledica pritiska i zato uvodimo koeficijent curenja C kao protok curenja za jedinični pritisak. Curenje dijelimo na unutrašnje i spoljašnje. Unutrašnje predstavlja prolaz ulja pored klipa, sa jedne strane na drugu, i dešava se unutar cilindra. Spoljašnje curenje predstavlja prolaz ulja pored vodica u spoljašnju sredinu. Tako je koeficijent

$$C = C_u + \frac{C_s}{2},$$

gdje su C_u koeficijent unutrašnjeg, a C_s spoljašnjeg curenja. Za

kompresiju ulja treba reći da je mala i da koeficijent stišljivosti β zavisi od procenta vazduha u ulju. Sada za protok možemo napisati

$$Q = A\dot{s} + cp_d + \frac{V}{4\beta}\dot{p}_d$$

, gdje V predstavlja ukupnu zapreminu $V=V_1+V_2$ (što uključuje cilindar, cijevi servorazvodnik)

Protok se, kako je već rečeno, reguliše servorazvodnikom. Nelinearna statička karakteristika servorazvodnika (protok u funkciji pritiska) ima oblik

$$Q = Dwz \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_n - \text{sgn}(z) p_d)}$$

gde z predstavlja pomjeranje klipa servorazvodnika, $\text{sgn}(z)$ njegov znak (+ ili -), p_n pritisak napajanja, w gradijent povećanja površine sa pomeranjem klipa, ρ gustinu ulja i D bezdimenzioni koeficijent. Ako je masa klipa razvodnika mala (dakle veliki propusni opseg) tada možemo zanemariti njegovu dinamiku i pomeranje z smatrati proporcionalnim struji magnetnog motora tj:

$$z = \frac{C_M}{\gamma} i$$

gde je C_M konstanta momenta magnetnog motora, a γ elastični koeficijent momenta opruge. Ovo se dobija na osnovu ravnoteže momenta motora i opruge: $C_M i = \gamma z$.

Tako smo došli do matematičkog modela elektrohidrauličnog pogona koji je definisan sa poslednje tri relacije. Dobijeni model je nelinearan.

Linearizacija karakteristike servorazvodnika u okolini radne tačke T daje

$$Q = Dwz \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_n - \text{sgn}(z) p_d)}$$

$$Q - Q_r = \underbrace{\frac{\partial Q}{\partial z}}_{k_1} \Big|_r (z - z_r) + \underbrace{\frac{\partial Q}{\partial p_d}}_{k_2} \Big|_r (p_d - p_{dr})$$

a uz uslov simetrije dobija se dalje

$$Q = k_1 z + k_2 p_d$$

Sada relacije

$$p_d A = m\ddot{s} + B\dot{s} + F_M$$

$$Q = A\dot{s} + cp_d + \frac{V}{4\beta} \dot{p}_d$$

$$z = \frac{C_M}{\gamma} \dot{i}$$

$$Q = k_1 z + k_2 p_d$$

određuju linearni oblik matematičkog modela. Model je trećeg reda, a koordinate stanja su $\mathbf{x} = [\mathbf{s} \ \dot{\mathbf{s}} \ \mathbf{p}_d]^T$. Dobijeni linearni model može se napisati u kanonskom obliku

$$\dot{\mathbf{x}}_j = \mathbf{C}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{f}_j F_{Mj} + \mathbf{d}_j \dot{i}_j ,$$

gdje je dodat indeks „j“ da bi se odredio zglob robota koji se posmatranim cilindrom pokreće. Matrice sistema su:

$$C_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{m} & \frac{A}{m} \\ 0 & -\frac{4\beta}{V}A & \frac{4\beta}{V}(k_1 - c) \end{bmatrix} \quad f_j = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad d_j = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{4\beta}{V}k_1 \frac{C_M}{\gamma} \end{bmatrix}$$

U ovom dijelu razmotrićemo, pomoću nekoliko primjera, način postavljanja hidrauličnih pogona za robot. Vidjeli smo već da hidraulični motori mogu biti konstruisani tako da kao izlaz daju ili translatorno ili obrtno kretanje. Kako zglobovi robota mogu biti translatorni ili obrtni, to izgleda logično da se translatorni motori, dakle cilindri, koriste za pogon translatornih zglobova, a rotacioni motori za pogon rotacionih zglobova. Međutim, hidraulični cilindri se često koriste za pogon i translatornih i rotacionih zglobova.

Razmotrimo prvo slučaj rotacionih hidrauličnih motora. Oni se uglavnom postavljaju u zglobove robota gde bez reduktora ostvaruju traženi pogonski moment. To je moguće zahvaljujući velikom izlaznom momentu i maloj brzini ovih motora. Može se još reći da postoje i takozvani brzohodni hidraulični motori koji se odlikuju velikom brzinom i manjim izlaznim momentom. Kod takvih motora reduktor je neophodan, pa je njihova primjena unekoliko slična primjeni elektromotora. Posmatrajmo zglob "j" robota. Neka je u pitanju rotacioni zglob pokretan rotacionim hidrauličnim motorom. Izlazni momenat motora (P_{mj}) je jednak pogonskom momentu u zglobu (P_j) ukoliko je veza direktna. Tako je:

$$P_j = P_{Mj}$$

Ako je veza ostvarena preko para zupčanika prenosnog odnosa n_j tada je

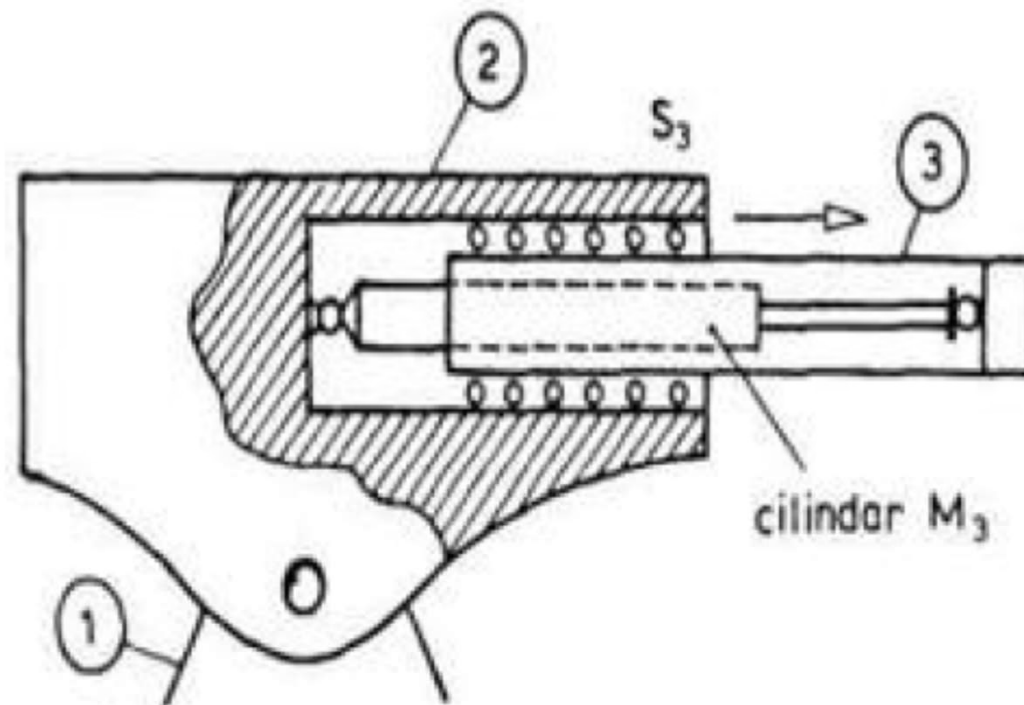
$$P_j = n_j P_{Mj}$$

Slično važi i za vezu obrtanja motora i obrtanja zgloba

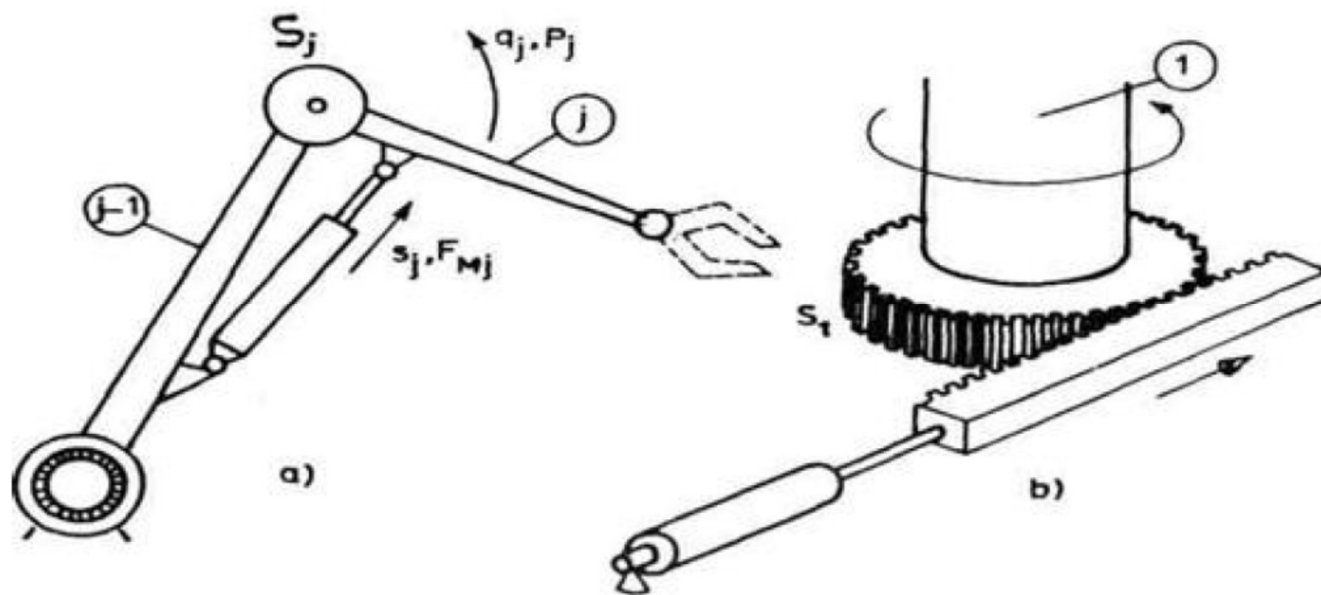
$$q_j = \theta_j \quad \text{ili ako postoji zupčasti par tada je } q_j = \theta_j / n_j$$

Veća raznolikost je u slučaju primjene hidrauličnih cilindara dakle motora koji proizvode translatorno kretanje. Prikazaćemo to sa nekoliko primera.

U prvom primjeru (sl. 3. 27) posmatraćemo translatorni zglob S_3 jednog zamišljenog robota. Sam zglob realizovan je u vidu jednog duguljastog segmenta (segment 3 na slici) koji se izvlači kroz odgovarajuće ležište postavljeno na segmentu 2. Hidraulični motor M_3 direktno pokreće zglob tako što je cilindar vezan za segment 2, a klip za segment 3.



Sl. 3.27. Pogon translatornog zgloba



Sledeći primer predstavlja jedno rešenje pogona rotacionog zgloba. Neka je to neki zglob (sl. a). Cilindar se vezuje za segment "j-1" a klip za segment "j" na način prikazan na slici. Ovo je vrlo čest način postavljanja hidrauličnih cilindara. Karakteristično je da postoji nelinearna veza između kretanja klipa (pomeranje s_j) i obrtanja zgloba (ugao q_j) kao i između pogonske sile klipa (F_{Mj}) i odgovarajućeg momenta oko ose zgloba (P_j).

Druga mogućnost za pogon rotacionog zgloba prikazana je na slici 3.28.(b). U pitanju je pogon preko zupčaste letve. U ovom slučaju veza između kretanja klipa i obrtanja zgloba je linearna. Primer je dat za slučaj pokretanja prvog zgloba S_1

ELEKTROMOTORI JEDNOSMERNE STRUJE

Kao pogonske elemente u robotici često srećemo elektromotore jednosmerne struje sa stalnim magnetom. Objasnićemo princip rada ovih motora i izvesti matematički model. Ukazaćemo i na različite konstrukcije motora.

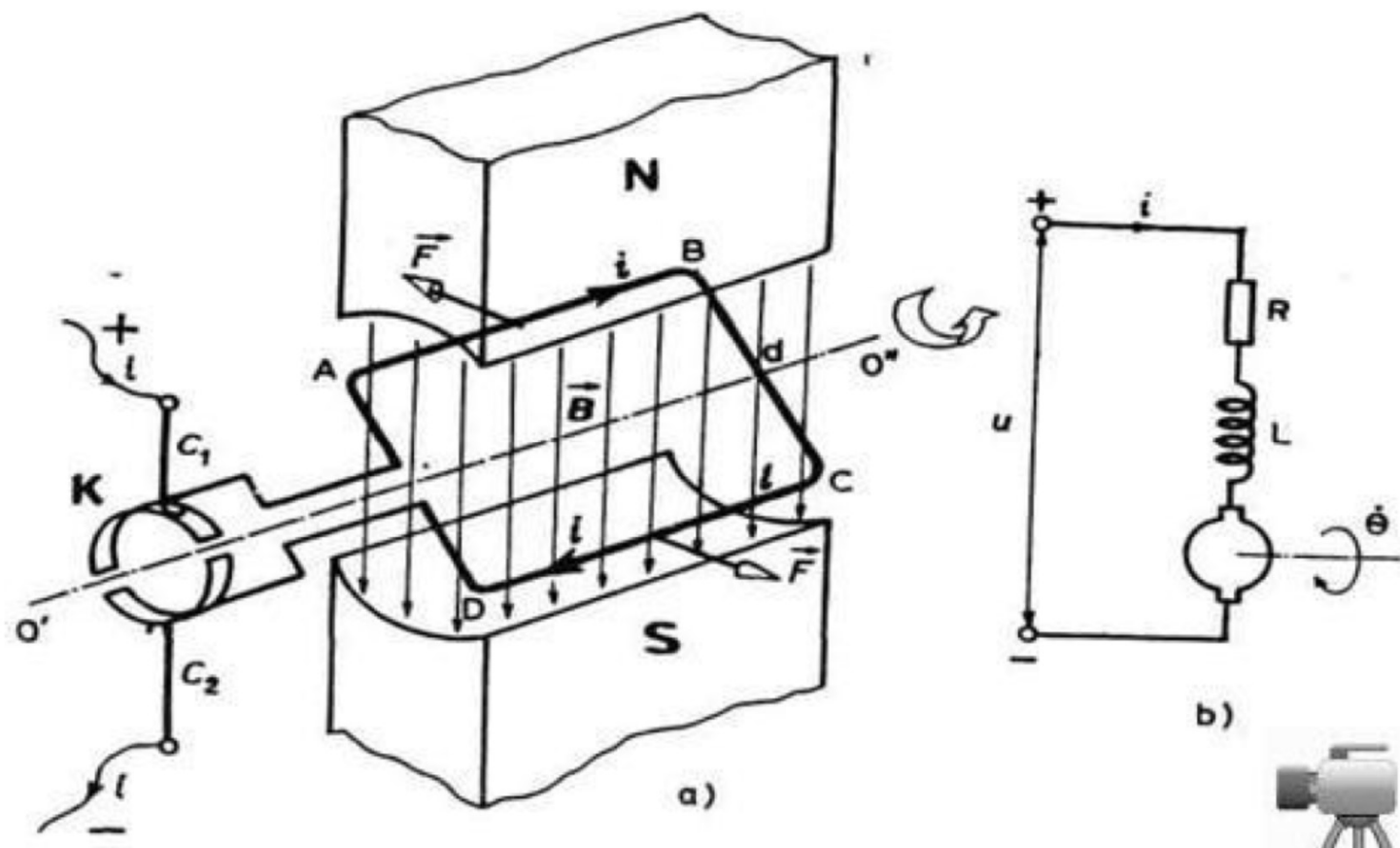
Da bismo objasnili princip rada motora jednosmerne struje sa stalnim magnetom i izveli matematički model poslužićemo se pojednostavljenim modelom prikazanim na sl. 3.2a. Posmatramo okvir kroz koji protiče struja i , a koji se nalazi u magnetnom polju indukcije B . Na delove okvira AB i CD deluju Lorencove sile

$$F = i l B \quad (1)$$

gde je l dužina delova AB odnosno BC. Ove dvije sile izazivaju spreg sila momenta

$$M = F d \cos \vartheta = i l B d \cos \vartheta \quad (2)$$

Ovaj momenat izaziva obrtanje okvira oko ose $O'O''$. Vidimo da je proporcionalan struji kroz okvir. Da bi se održao uvijek isti smjer struje u gornjem i donjem dijelu okvira, tj. da se ne bi promijenio kada dio BC dođe gore, koristi se komutator K . Provodnici $C1$ i $C2$ koji se naslanjaju na komutator nazivaju se četkice.



Princip rada motora jednosmjerne struje

Opisano obrtanje okvira u magnetnom polju izazvaće indukovanu elektromotornu silu u okviru. Intenzitet elektromotorne sile biće:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(BS \sin \theta) = BS \cos \theta \times \dot{\theta} \quad (3)$$

a po smjeru je takva da teži poništavanju struje zbog čega se i naziva kontraelektromotorna sila. Iz izraza (3) vidimo da je kontraelektromotorna sila proporcionalna brzini obrtanja . Sada možemo zamisliti više međusobno spojenih okvira koji formiraju rotor motora. Stalni magnet sa postoljem obrazuje stator motora. Ukupni momenat koji će izazvati obrtanje rotora i dalje je proporcionalan struji kroz motor: $\mathbf{M} = \mathbf{C}_m \mathbf{i}$. \mathbf{C}_m je takozvana konstanta momenta čija se vrijednost za određeni motor uzima iz kataloga proizvođača. Kontraelektromotorna sila je i dalje proporcionalna brzini obrtanja $\dot{\theta}$ tj. $\mathbf{e} = \mathbf{C} \dot{\theta}$. je takozvana konstanta elektromotorne sile. Može se dokazati da su, u slučaju izražavanja u SI sistemu, ove konstante brojno jednake.

Posmatramo sada dinamičku ravnotežu rotora. Momentu \mathbf{M} suprotstavljaju se inercijalne sile rotora momentom $\mathbf{M}_I = I \ddot{\theta}$ gdje je I moment inercije rotora, a $\ddot{\theta}$ ugaono ubrzanje. Takođe, suprotstavljaju se moment viskoznog trenja $\mathbf{M}_T = B \dot{\theta}$, gde je B koeficijent, a $\dot{\theta}$ ugaona brzina rotora i konačno suprotstavljaju se momenat \mathbf{P}_M spoljašnjeg opterećenja na osovini motora. Momenat \mathbf{P}_M nazivamo izlazni momenat motora. Veličine I i B nalaze se u katalogizima proizvođača motora. Dinamička ravnoteža sada je data izrazom:

$$M = M_I + M_T + P_M \quad \longrightarrow \quad I \ddot{\theta} = C_M i - B \dot{\theta} - P_M \quad (4)$$

Sada posmatrajmo električnu shemu motora prikazanu na slici 3.2 (b). Priključeni napon u savlađuje kontraelektromotornu silu e , elektrootpornu $e_R = Ri$ kontraelektromotornu silu samoindukcije $e_L = L di/dt$, gde je R otpornost, L induktivnost a i struja kroz namotaje. Brojni podaci za veličine R i L uzimaju se iz kataloga. Sada je ravnoteža kola određena izrazom:

$$u = e + e_L + e_R \quad \longrightarrow \quad u = C_E \dot{\theta} + L \frac{di}{dt} + R i \quad (5)$$

Izrazi (4) i (5) predstavljaju matematički model motora. Ako je u pitanju motor koji pokreće j-ti zglobov robota, tada ovi izrazi dobijaju indeks j:

$$I_j \ddot{\theta}_j = C_{Mj} \dot{i}_j - B_j \dot{\theta}_j - P_{Mj}$$

$$u_j = C_{Ej} \dot{\theta}_j + L_j \frac{di}{dt} - R_j i_j$$

Ove relacije se mogu napisati u matricnoj formi

$$\dot{\mathbf{x}}_j = \mathbf{C}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{f}_j P_{Mj} + \mathbf{d}_j u_j, \quad (8)$$

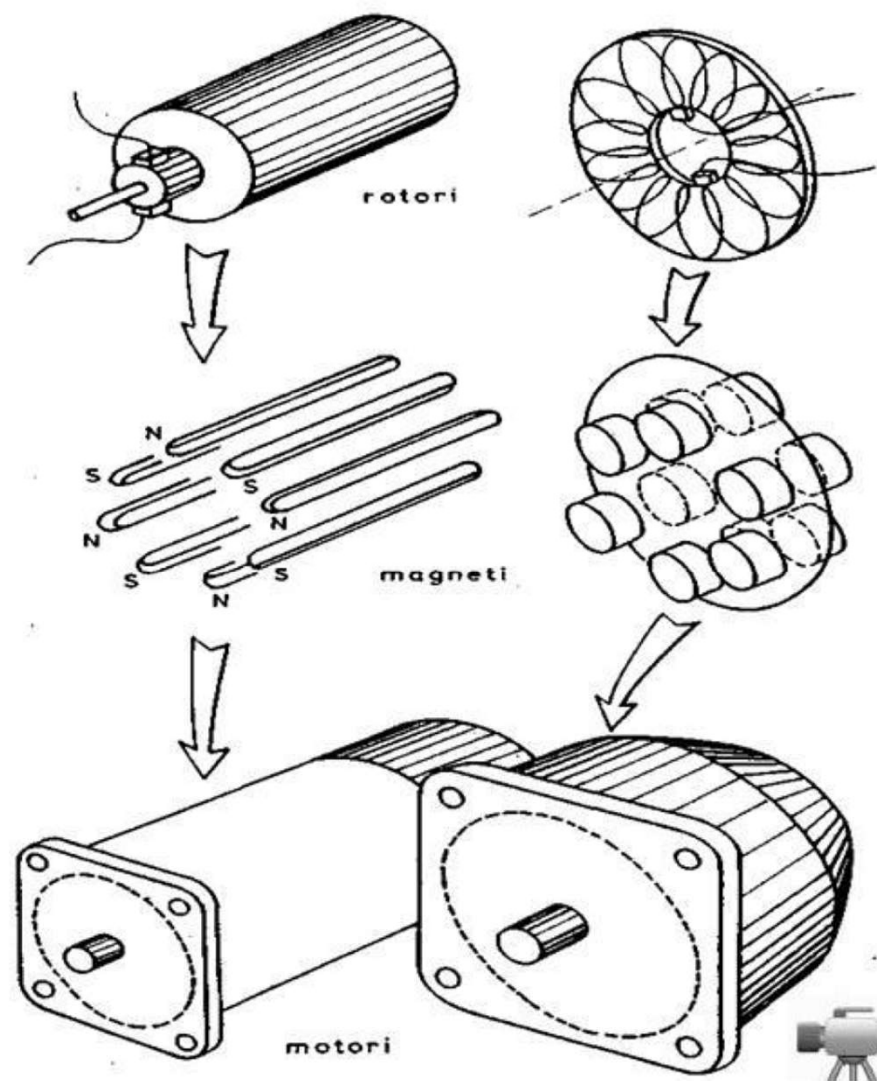
gdje je $\mathbf{x}_j = [\theta_j, \dot{\theta}_j, i_j]^T$ kolona matrica stanja motora dimenzija 3x1, a \mathbf{C} , \mathbf{f} i \mathbf{d} su matrice sistema

$$\mathbf{C}_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_j}{I_j} & \frac{C_{Mj}}{I_j} \\ 0 & -\frac{C_E}{L_j} & -\frac{R_j}{L_j} \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}_j = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{I_j} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}_j = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{L_j} \end{bmatrix}$$

Sada možemo reći da relacija (8) definiše matematički model motora koji pokreće zglob. Pri korišćenju ovog modela treba voditi računa da je ulazni napon je ograničen po apsolutnoj vrijednosti.

Napon je veličina koju možemo po želji mijenjati. Tako, napon predstavlja upravljačku promenljivu i mijenjanjem napona upravljamo kretanjem robota.

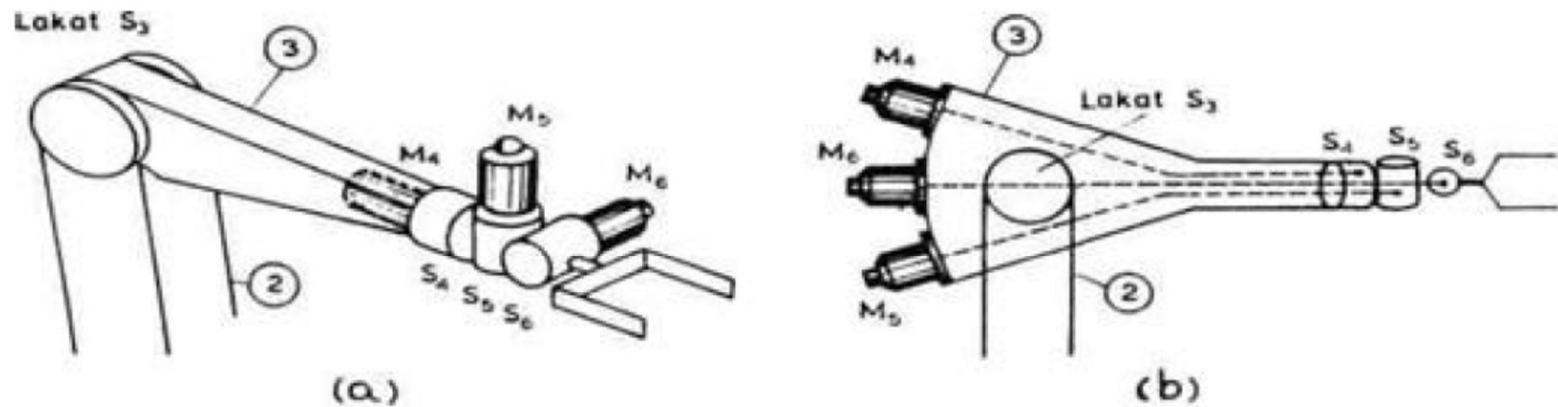
Ukažimo sada na neke različitosti u konstrukcijama postojećih motora. Prvo ćemo reći da se rotori sreću u dva osnovna oblika: cilindričnom i pločastom. Slika 3.3 prikazuje oblik rotora sa metodom komutacije, način postavljanja parova stalnih magneta i spoljašnji izgled motora. Očigledno je da pločasti rotor omogućava kraću ali širu formu motora.



Sl. 3.3. Različiti oblici rotora i motora

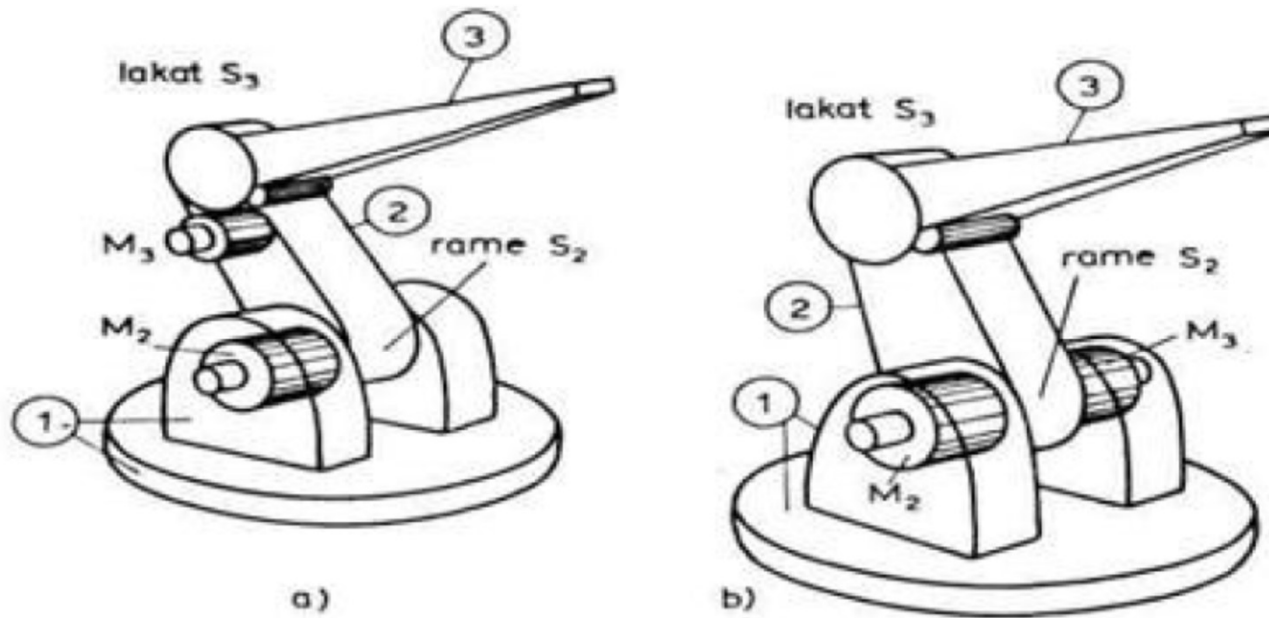
Načini postavljanja motora

U ovom dijelu razmotrićemo način i mesto postavljanja motora koji pokreću zglobove robota. Analizu ćemo početi od zglobova šake. Na slici 3.5 a prikazan je treći segment minimalne konfiguracije i segmenti šake i jedan mogući način postavljanja motora. Motori su postavljeni direktno u zglobovima koje pokreću. Na slici, motori koji pokreću zglobove S_4, S_5, S_6 označeni su M_4, M_5, M_6 . Ovaj način omogućava jednostavnu konstrukciju, međutim, ima dosta nedostataka. Šaka postaje glomazna i to sa jedne strane povećava opterećenje robota, a sa druge strane smanjuje mogućnosti kretanja zglobova šake.



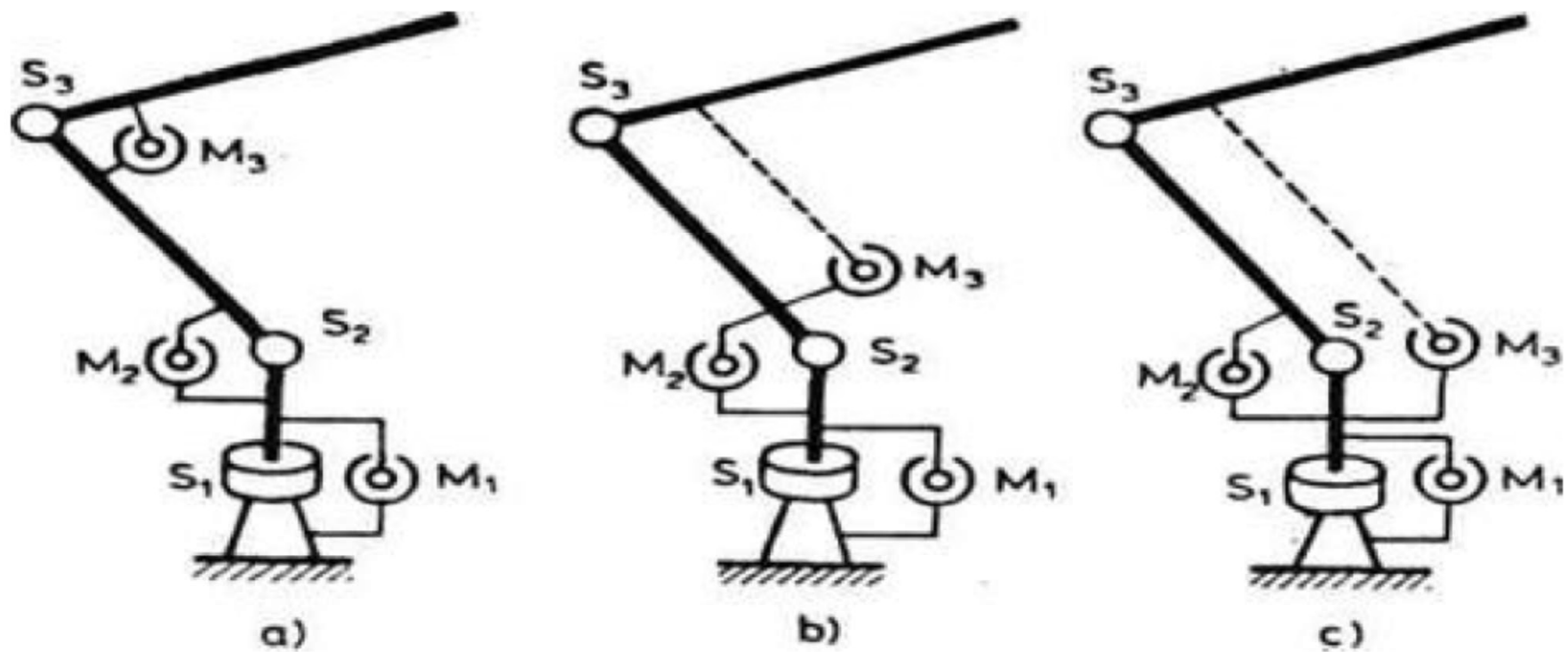
Sl. 3.5. Načini postavljanja motora za pogon šake

Drugi način, koji je češći, polazi od ideje da motore treba postavljati što bliže osnovi robota jer se tako smanjuje statičko opterećenje. Kada su u pitanju zglobovi šake i motori koji ih pokreću, jedan raspored motora koji sledi ovu ideju prikazan je na slici 3.5(b). Motori su postavljeni iza lakta i predstavljaju kontratežinu. Pogonski momenti se od motora prenose osovinama do odgovarajućih zglobova.



Sl. 3.6. Načini postavljanja motora za pokretanje minimalne konfiguracije

Analiziraćemo pogon zglobova minimalne konfiguracije. Razmotrimo prvo zglobove S3 i S2 tj. lakat i rame robota (sl. 3.6.). Jedna od mogućnosti je smeštanje motora uz same zglobove kao što je prikazano na slici 3.6(a). Ovakav pristup pojednostavljuje konstrukciju prenosa pogonskog momenta od motora na zglob. Primetimo da ovde svaki motor deluje između dva susjedna segmenta. M3 pokreće zglob S3, i deluje između segmenata 2 i 3 tako što stator vezujemo za segment 2, a rotor preko određenog prenosnog mehanizma za segment 3. Slično važi za motor M2 koji deluje između segmenta 1 i 2. Ovo je shematski prikazano na slici 3.7(a). Razmotrićemo još jednu mogućnost. Motori M2 i M3 mogu se postaviti na mjesta prikazana na slici 3.6(b). Za motor M2 koji pokreće rame S2 važi sve što je maloprije rečeno, ali pitanje motora M3 je složenije. Ovaj motor pokreće lakat S3. Svojom osovinom rotora, preko prenosnog mehanizma, motor je vezan za segment 3. Stator motora može se vezati na dva različita načina. U prvom slučaju stator vezujemo za segment 2 i time dobijamo da motor M3 deluje između segmenata 2 i 3. Ovaj slučaj je, dakle, po dejstvu motora ekvivalentan načinu prikazanom i opisanom pod (a). Ovo je shematski prikazano na slici 3.7(b).



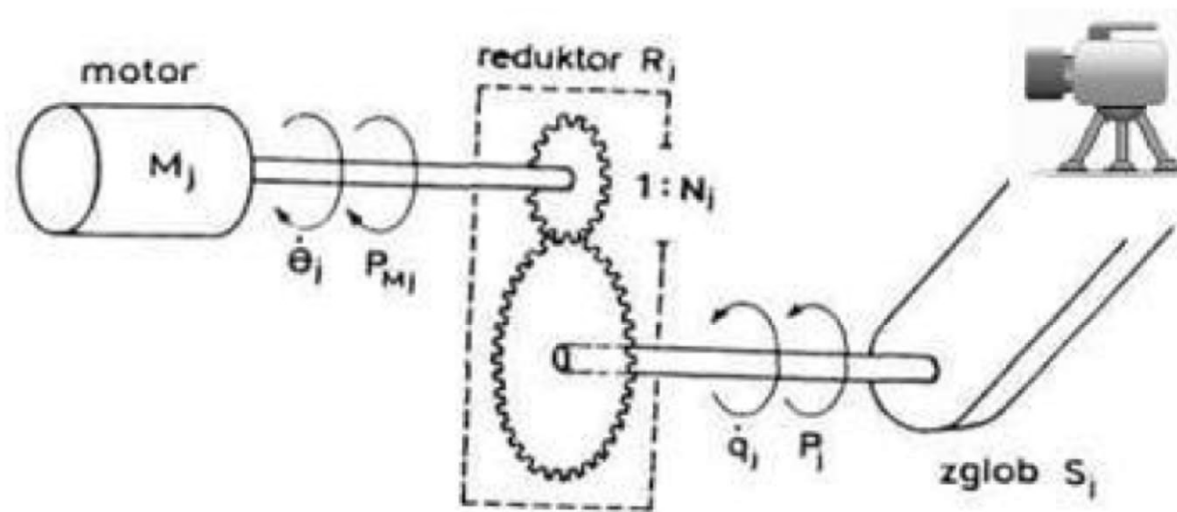
Sl. 3.7. Otvoreni i zatvoreni lanci

U drugom slučaju stator motora M3 vezujemo za segment 1. Tada motor deluje između segmenata 1 i 3. Na ovaj način dobijamo vezu između segmenata koji nisu susjedni (sl. 3.7c).

Ostalo je i da razmotrimo zglob S1 tj. obrtanje robota oko vertikalne ose. Taj zglob vezuje segment 1 sa podlogom i motor M1 se uvek vezuje između tih segmenata. Pri tome stator može biti učvršćen na segmentu 1 ili na podlozi.

Prenos pogonskog momenta

Problem prenosa pogonskog momenta od motora do zgloba je važno i dosta opširno pitanje. Naime, postoji veliki broj različitih rešenja prenosnog mehanizma i nemoguće ih je sve predstaviti. Zato ćemo se ovdje zadržati na nekoliko primjera koji su relativno često korišćeni. Kao prvo uočavamo sledeće: motori jednosmerne struje daju male momente i velike brzine obrtanja. Ove pojmove malo i veliko treba shvatiti uslovno. Mislimo da su momenti mali u odnosu na momente koji su potrebni za pokretanje robota, a brzine su velike u odnosu na brzine kojima se obrću zglobovi robota pri nekom uobičajenom kretanju. Zbog ovoga prenosni mehanizam uvek sadrži reduktor koji u određenom odnosu povećava pogonski momenat (na primer N puta) i u istom odnosu smanjuje brzinu obrtanja (takođe N puta). Ovaj odnos naziva se prenosni odnos reduktora, ili stepen redukcije. Najjednostavnija realizacija reduktora je u obliku para zupčanika (sl. 3.8) čiji su poluprečnici u odnosu $1:N$.



Sl. 3.8. Prenos pogonu preko reduktora

Posmatrajmo zglob S_j . Ako je na izlazu motora moment P_{Mj} , ugao obrtanja θ_j i brzina obrtanja $\dot{\theta}_j$, tada će moment u zglobu P_j , ugao u zglobu q_j , i brzina \dot{q}_j biti:

$$P_j = N_j P_{Mj}$$

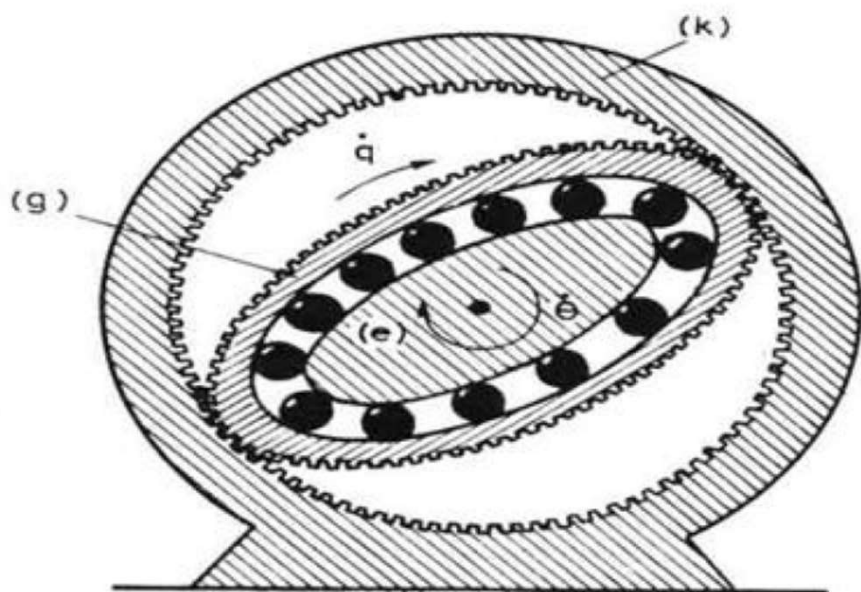
$$q_j = \theta_j / N_j$$

$$\dot{q}_j = \dot{\theta}_j / N_j$$

Gdje je N_j prenosni odnos reduktora

U praksi, da bi se ostvario željeni prenosni odnos reduktora neophodno je redovno vezati nekoliko parova zupčanika i tako u nekoliko koraka ostvariti željenu redukciju. Naime, jasno je da se ne može praviti par zupčanika čiji bi poluprečnici bili u odnosu, na primer, 1:300. U slučaju više parova javlja se problem zazora. U svakom kontaktu dva tijela, pa tako i zupčanika, javlja se prazan hod ili zazor, dakle malo pomjerenje koje ne možemo kontrolisati. Otuda je poželjno izbjegavati veći broj parova zupčanika da se zazor ne bi umnožavao. Jedan način da se ovaj problem riješi je konstrukcija specijalnih vrsta reduktora koji uspijevaju da ostvare velike prenosne odnose sa jednim ili bar sa malim brojem zupčastih parova. Od takvih konstrukcija u robotici se najčešće koriste tzv. harmonik drajv (harmonic drive) reduktori. Ova konstrukcija u robotici se najčešće koriste tzv. harmonik drajv (harmonic drive) reduktori. Princip rada ovih reduktora objasnićemo koristeći sliku 3.9.

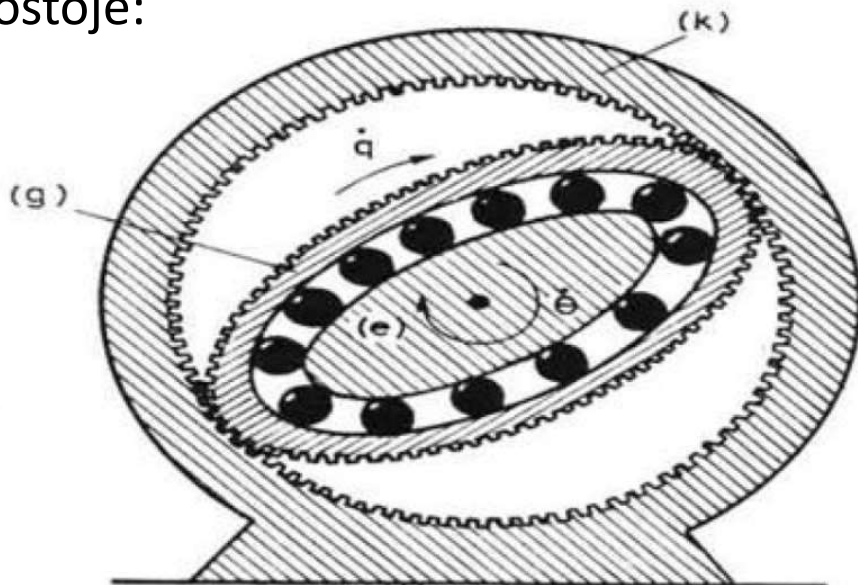
Osnovni funkcionalni delovi su ulazna elipsa označena na slici sa (e), takozvani generator talasa (engleski: wave generator) označen sa (g) i kućište (k). Između elipse i generatora talasa nalazi se eliptični kuglični ležaj, pa je tako omogućeno međusobno obrtanje ova dva elementa, a generator i kućište su u zupčastoj vezi. Osovina motora učvršćuje se za elipsu koja se onda obrće brzinom motora $\dot{\theta}$. Tako $\dot{\theta}$ predstavlja ulaznu brzinu reduktora.



Sl. 3.9. Harmonik drajev reduktor

Kućište ćemo smatrati nepokretnim i tada će zupci kućišta određivati obrtanje generatora. Generator je od elastičnog materijala i obrće se stalno menjajući pravac deformacije. Generator se vezuje za izlaznu osovinu reduktora. Ova osovina pokreće zglob robota, pa njenu brzinu označavamo sa \dot{q} . Da bismo jasno prikazali odnos ulazne brzine $\dot{\theta}$ i izlaza \dot{q} poslužićemo se prvo jednim pojednostavljenjem.

Pretpostavićemo da je broj zuba generatora za jedan manji od broja zuba kućišta. To znači da, ako se ulazna elipsa obrne za pun krug, utiskujući pri tom zube generatora u zube kućišta, generator će se pomeriti za jedan zub unazad. Proizlazi da je obrtanje generatora znatno sporije. Ako se posmatra uopšteno, generator će se obrnuti unazad za onoliko zuba koliko ih ima manje nego na kućištu. Neka je to Δn . Ugao obrtanja je tada $\Delta n\varphi$, gde je φ ugao koji odgovara jednom zubu. Dakle, ako se ulazna osovina obrne za pun krug tj. $\theta = 2\pi$ onda će se izlazna osovina obrnuti unatrag za $q = \Delta n\varphi$. Prenosni odnos reduktora $N = \theta/q$ sada postoje:



Sl. 3.9. Harmonik drajv reduktor

$$N = \frac{2\pi}{\Delta n\varphi}$$

U ovom odnosu smanjuje se izlazna brzina i povećava izlazni moment.

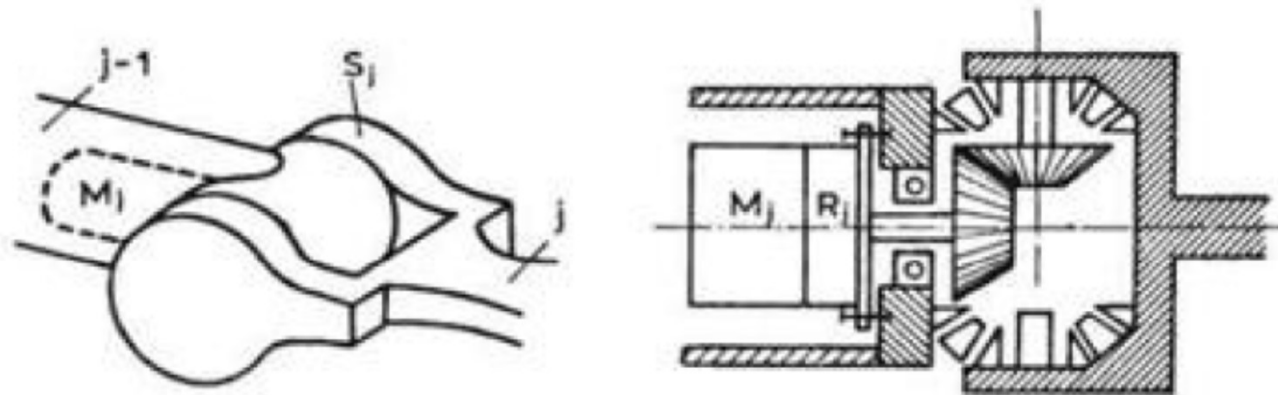
Do sada smo smatrali da se pogonski momenat povećava u istom odnosu u kome se smanjuje brzina. Međutim, zbog unutrašnjih trenja u reduktoru gubi se dio snage. To se uzima u obzir tako što prenosni odnos brzine ostaje N , a prenosni odnos momenta postaje $N\eta$, gde je η takozvani koeficijent korisnog dejstva reduktora, tj. odnos izlazne i ulazne snage. Sada relacija za moment postaje

$$P_j = N_j \eta P_{Mj}$$

Koeficijent η je uvek manji od jedinice jer je izlazna snaga manja od ulazne. Kod harmonik drajev reduktora koji se odlikuju visokim koeficijentom korisnog dejstva on može iznositi okvirno od 0,6 do 0,9.

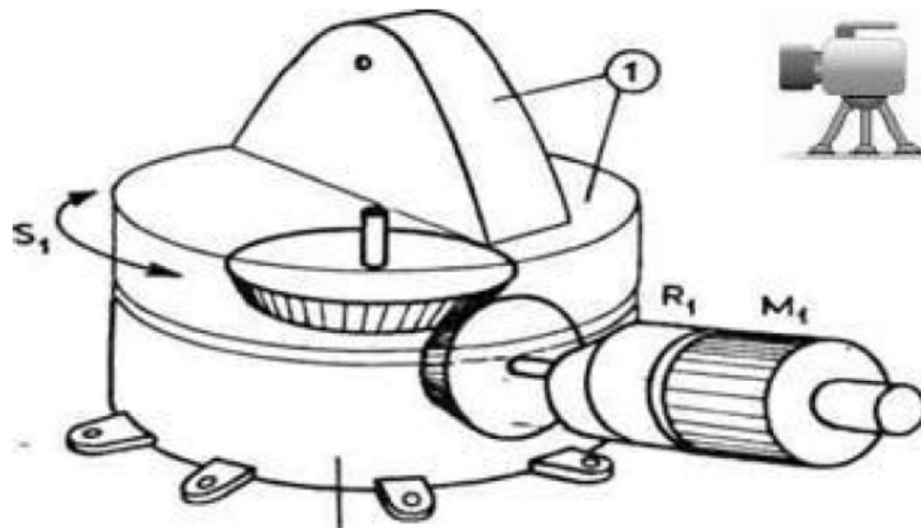
Sada ćemo prikazati nekoliko primera prenosnih mehanizama za pogon manipulacionih robota.

Slika 3.10 prikazuje spoljni izgled jednog zgloba i moguću shemu pogona toga zgloba. Reduktor R_j direktno se nastavlja na motor M_j tako da možemo govoriti o sklopu motor-reduktor. Stator ovog sklopa učvršćen je za segment "j-1", a rotor, preko izlazne osovine i para zupčanika, za segment "j". Ovdje očigledno ne postoji neki složen prenosni mehanizam

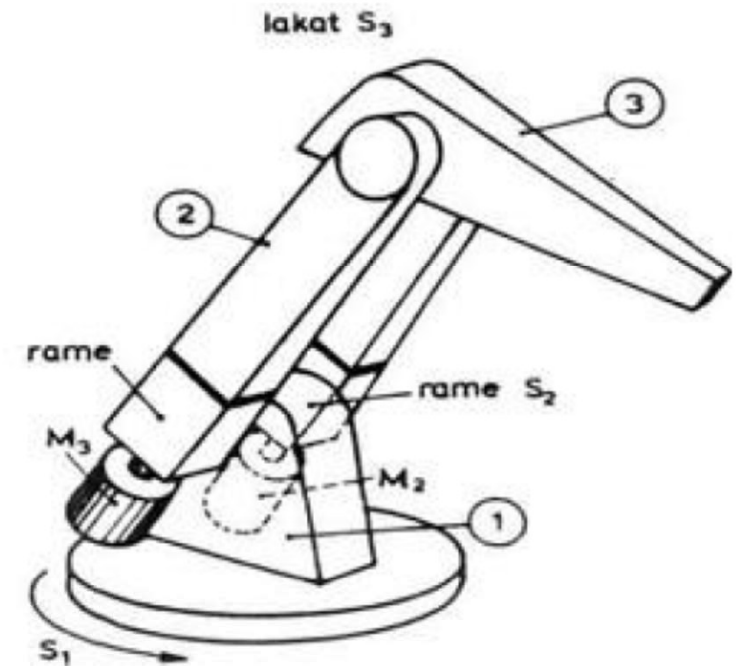


Sl. 3.10. Jedan zglob robota

Na slici 3.11 prikazan je spoljašnji izgled jedne minimalne konfiguracije robota laktaste sheme. Na slici 3.12 prikazana je shema pogona zgloba S_1 koji predstavlja obrtanje cijelog robota oko vertikalne ose. Stator je učvršćen za postolje, a rotor, preko osovine i para zupčanika, obrće segment 1, a time i cio robot.

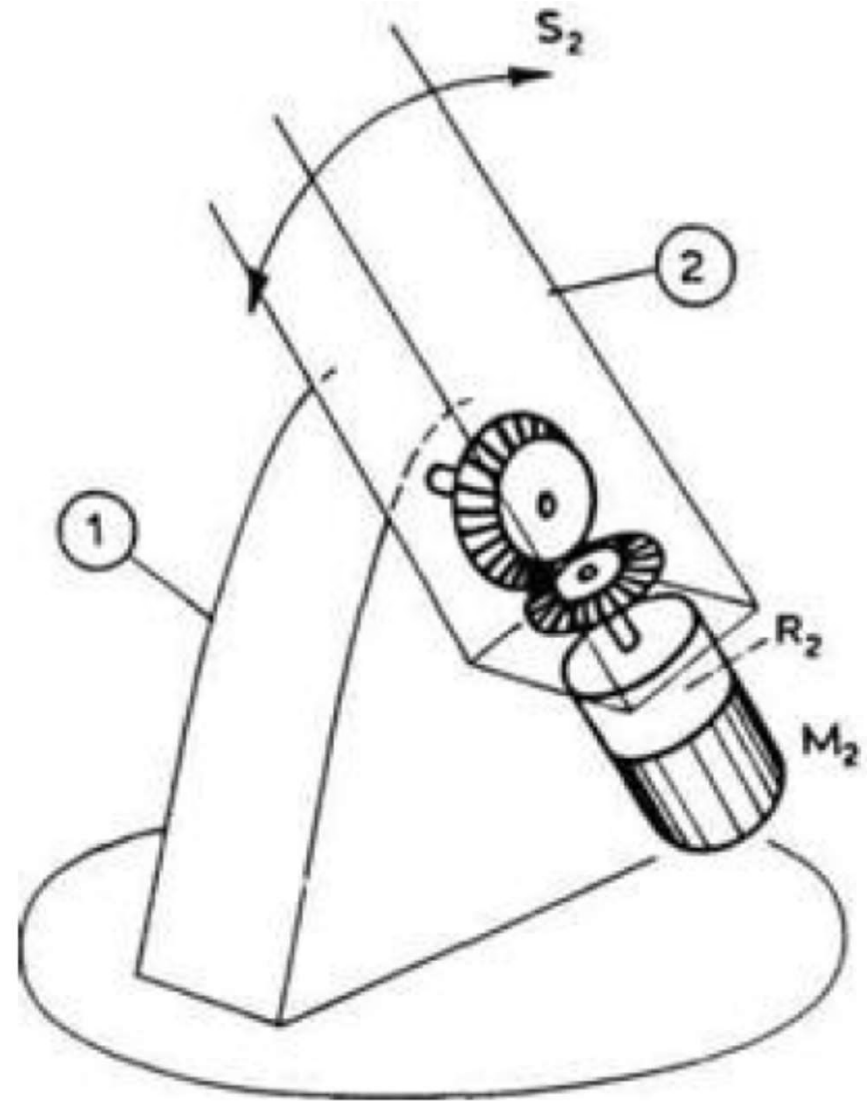


Sl. 3.12. Shema pogona zgloba S_1

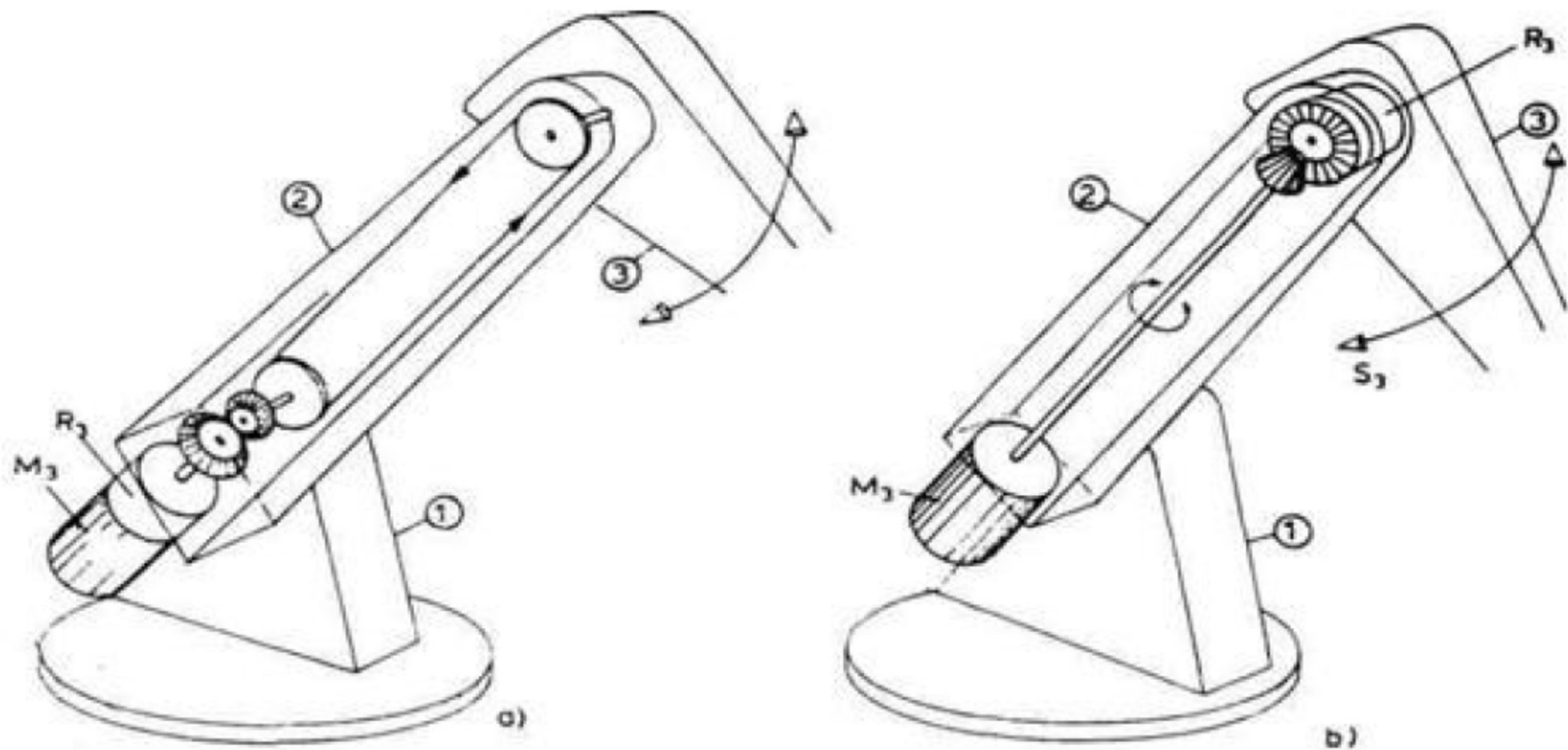


Sl. 3.11. Laktasta shema manipulacionog robota

Na slici 3.13 prikazana je shema pogona ramena S_2 . Sklop motor- reduktor (M_2 — R_2) preko zupčastog para pokreće zglob. Stator je vezan za segment 2, a rotor preko zupčanika za segment 1.



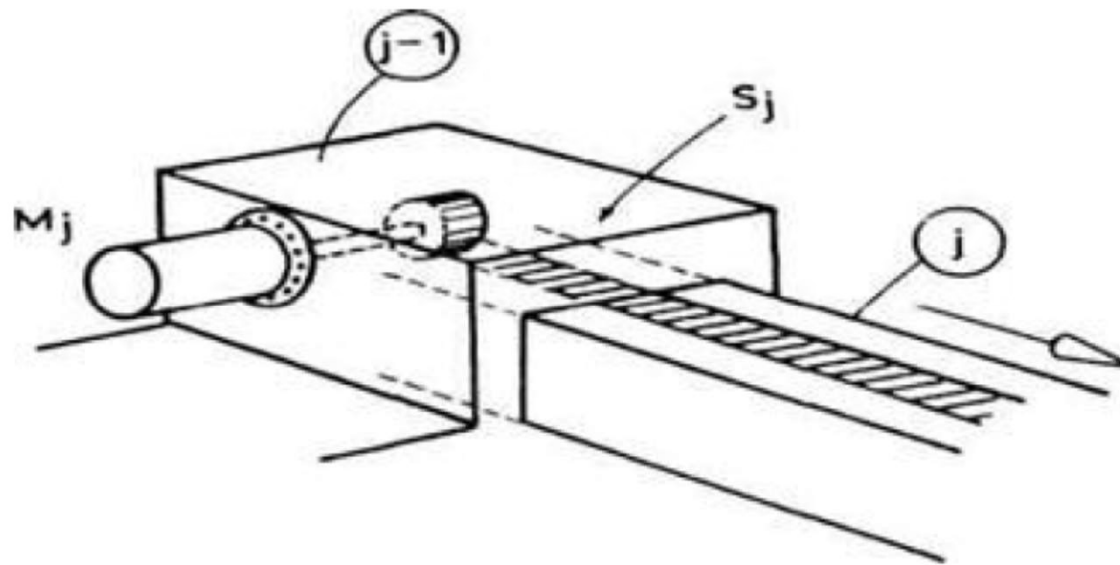
3.13. Shema pogona ramenog zgloba



Dvije mogućnosti za prenos pogona zgloba lakta

Na slici 3.14 prikazane su dve moguće realizacije prenosa pogona na zglob lakta S3. U slučaju (a) motor M3 i reduktor R3 vezani su u jedinstven sklop. Stator je učvršćen za segment 2. Rotor pokreće par zupčanika, a zatim se pogon prenosi preko prenosnog lanca do segmenta 3. U ovoj varijanti i motor i reduktor smješteni su blizu osnove robota čime je smanjeno opterećenje. Mana ovog prenosa je što se svaki zazor lanca ili njegovo elastično istežanje pokazuje direktno kao greška u pomjeranju segmenta 3. Ovo posebno treba imati u vidu ako se zna da u ovom slučaju lanac prenosi veliku silu jer se radi o pogonu iza reduktora. Slučaj (b) ispravlja ovu manu. Prvo uočavamo da su motor i reduktor sada razdvojeni. Pogonski momenat motora M3 prenosi se osovinom do zgloba lakta, gde preko para zupčanika ulazi u reduktor R3. Izlazna osovina reduktora vezuje se i pokreće segment 3. Ovde primećujemo da prikazana dugačka osovina prenosi mali momenat jer se radi o momentu motora prije reduktora. Eventualna greška usled zazora i elastičnog uvijanja osovine posredstvom reduktora smanjuje se N puta. Tako, ovakav prenos omogućava manje greške koje bi bile posledica zazora ili elastičnih deformacija. S druge strane, u ovom slučaju smo reduktor udaljili od osnove robota i time povećali opterećenje. Ovde nijesmo imali kao cilj diskusiju o prednosti jedne ili druge varijante prenosa već su nam obje varijante služile samo kao ilustracija različitih mogućnosti.

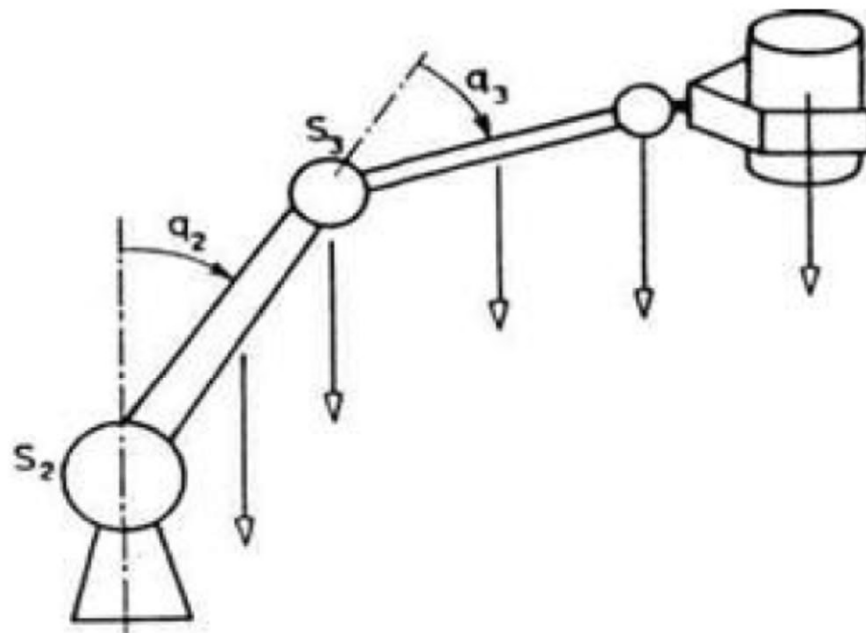
Sledeći primer odnosi se na pogon translatornog zgloba. Slika 3.15 predstavlja jednu mogućnost za pokretanje translatornog zgloba. Stator motora učvršćen je za segment "j-1", a rotor preko osovine, jednog zupčanika i zubaca na segmentu "j", pokreće segment "j". Drugi čest način pokretanja translatornih zglobova je pomoću zavojnih vretena.



Sl. 3.15. Pogon translatornog zgloba

KOMPENZACIJA STATIČKOG OPTEREĆENJA

Posmatrajmo laktasti robot prikazan na slici 3.31. Sada analizirajmo sile koje prave momenat oko pojedinih zglobova, odnosno proizvode opterećenje zglobova. Na sve djelove robota djeluje sila težine što je prikazano strelicama na slici 3.31 i te sile prave momenat oko zglobova S_2 i S_3 . Ovo opterećenje nazivamo statičkom komponentom opterećenja. Pored sila težine, momenat oko zglobova prave i sile inercije nastale prilikom kretanja robota. Momenti inercijalnih sila čine dinamičku komponentu opterećenja.



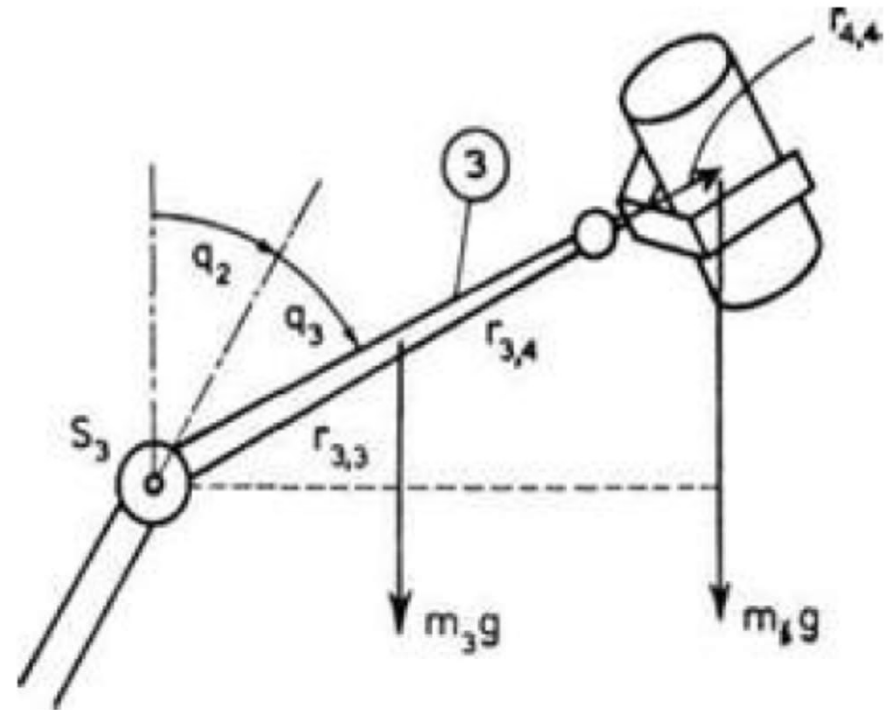
Sl. 3.31. Statičko opterećenje laktastog robota

Kako je statička komponenta uvijek prisutna to je logično razmišljati kako da se izvrši uravnoteženje, odnosno kako da se kompenzuju momenti nastali usled težina. Jedan načina je metoda kontra težina. Ta ideja je već spominjana i primijenjena pri postavljanju motora za pogon šake. Motori za pogon šake postavljaju se sa suprotne strane zgloba lakta. Tako predstavljaju kontratežinu koja delimično uravnotežuje težinu segmenta 3, šake i radnogpredmeta. Ovo je svakako korisno, ali s obzirom na težinu motora veći dio statičkog opterećenje oko zgloba lakta ostaje neuravnotežen. Da bi kompenzacija bila potpuna trebalo bi da kontratežina bude dovoljno velika. Međutim, to bi znatno povećalo ukupnu težinu robota, a time i dinamičko opterećenje pri radu. Za slučaj zgloba lakta često se zadovoljavamo ovakvom djelimičnom kompenzacijom pa motor mora savladati nekompenzovani dio statičkog opterećenja i cijelo dinamičko opterećenje. To, međutim, nije dobro rješenje u slučaju robota za rad sa većim teretima. Tada se pristupa kompenzaciji pomoću posebnog mehanizma što će biti objašnjeno u sledećoj analizi

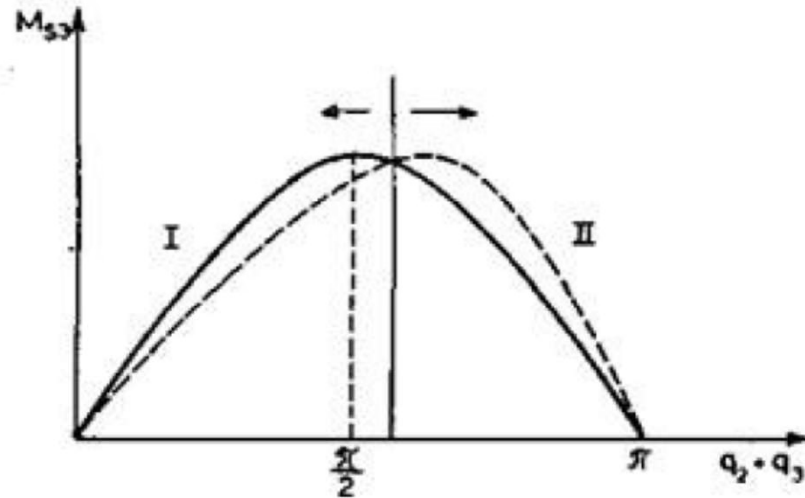
Posmatraćemo zglob lakta (S3). Sile težina koje prave momenat oko ovog zgloba prikazane su, u nešto pojednostavljenom slučaju, na slici 3.32. Momenat statičkog opterećenja sada

$$M_{s3} = m_3 g r_{3,3} \sin(q_2 + q_3) + m_4 g (r_{3,3} + r_{3,4} + r_{4,4}) \sin(q_2 + q_3) = [m_3 r_{3,3} + m_4 (r_{3,3} + r_{3,4} + r_{4,4})] g \sin(q_2 + q_3)$$

gde je m_3 masa segmenta 3, a m_4 masa kompletne šake sa radnim predmetom. Moment je proporcionalan sinusuu ugla $q_2 + q_3$, a to je ugao nagiba segmenta 3 u odnosu na vertikalnu. Promena momenta u zavisnosti od ugla nagiba prikazana je na slici 3.33 punom linijom.

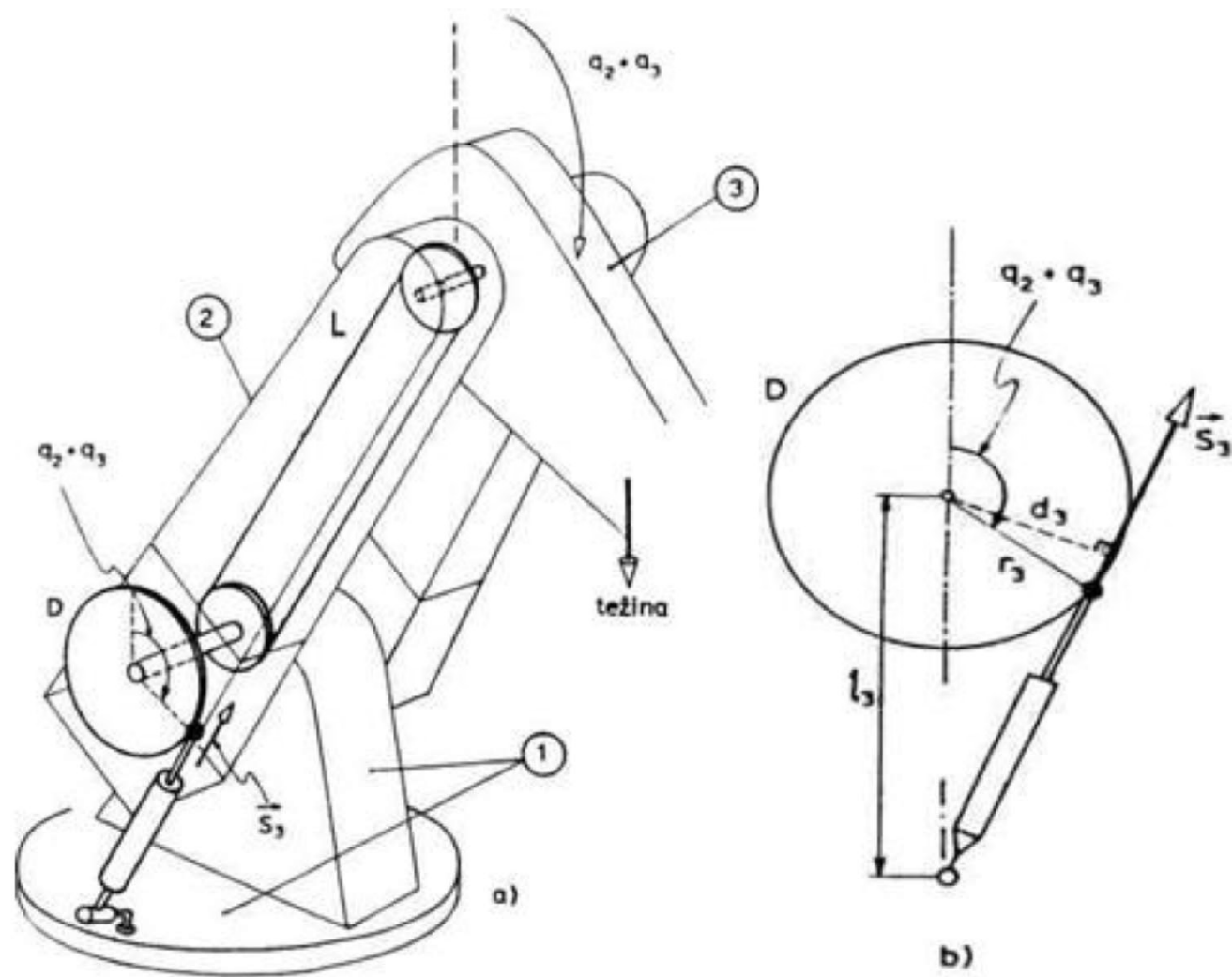


Sl. 3.32. Statičko opterećenje lakta



Sl. 3.33. Promena momenta opterećenja i momenta kompenzacije u zavisnosti od ugla nagiba

Mehanizam za kompenzaciju prikazan je na sl. 3.34. Ovo je u stvari modifikacija mehanizma prikazanog na slici 3.14a namijenjenog za pogon zgloba 3 odnosno pokretanje segmenta 3. Obrtanje segmenta 3 prenosi se preko prenosnog lanca L i tako se obrće disk D. Primijetićemo da se disk obrće za isti ugao za koji se segment 3 obrne u odnosu na vertikalu, a to je ugao $q_2 + q_3$. Za obod diska vezan je klip pneumatskog ili hidrauličnog cilindra koji se naziva kompenzator. Gas ili ulje u cilindru vrši pritisak na klip i proizvodi silu kompenzacije S_3 . Ova sila pravi kontramomenat oko osovine diska. Kontramomenat se preko lanca prenosi do zgloba lakta i poništava momenat težine segmenta 3 i šake.



Sl. 3.34. Kompenzacija zgloba lakta

Razmotrimo sada jedan specijalni slučaj. Pretpostavimo da je obezbijeđen konstantan pritisak u cilindru, bez obzira na pomjeranje klipa. Ovo je približno tačno kod hidrauličnog cilindra vezanog za hidraulični akumulator jer je promena zapremine radnog gasa uočljivo manja od ukupne zapremine gasa. Spomenimo da u slučaju pneumatskog cilindra (punjenog određenom količinom gasa) ovo ne važi jer se pri sabijanju gasa povećava pritisak.

Zadržaćemo se na objašnjenju pomenutog specijalnog slučaja. Rekli smo da je u cilindru stalan pritisak i da će sila S_3 kojom deluje klip biti takođe stalna bez obzira na položaj robota.

Momenat kompenzacije M_{k3} biće: **$M_{k3} = S_3 d_3$**

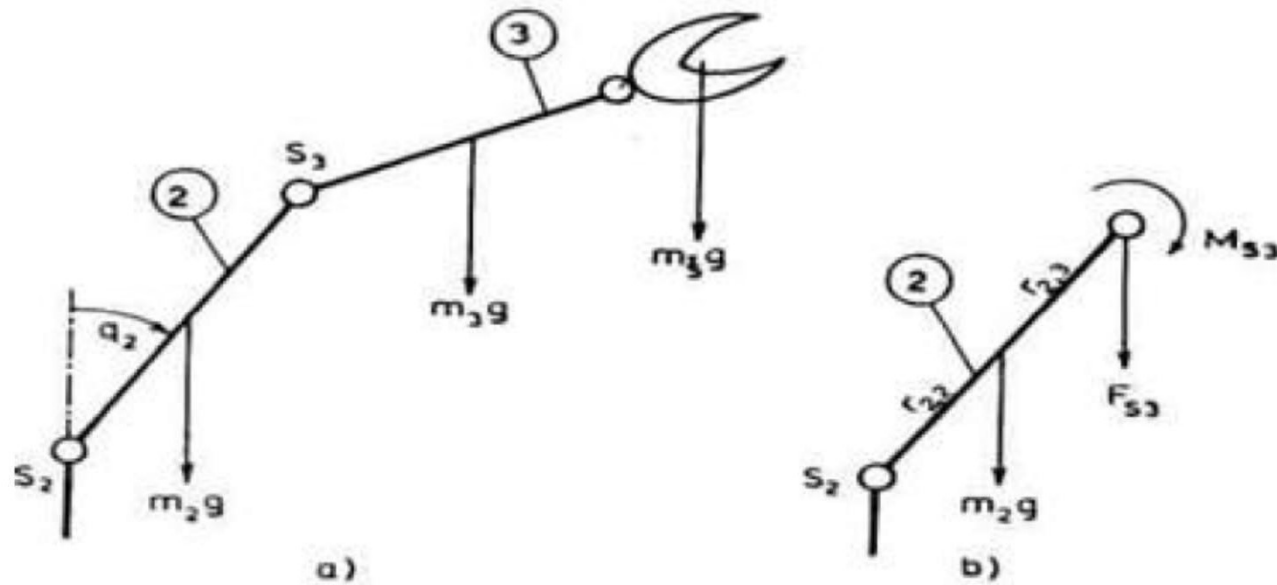
Sa slike (3.34b) vidimo da se pri obrtanju segmenta 3, a time i diska D mijenja krak sile kompenzacije označen na slici sa d . Može se pokazati da se krak d_3 mijenja po zakonu:

$$d_3 = \frac{r_3 l_3 \sin(q_2 + q_3)}{\sqrt{r_3^2 + l_3^2 - r_3 l_3 \cos(q_2 + q_3)}}$$

Samim tim

$$M_{k3} = \frac{S_3 r_3 l_3 \sin(q_2 + q_3)}{\sqrt{r_3^2 + l_3^2 - r_3 l_3 \cos(q_2 + q_3)}}$$

Ova promjena momenta kompenzacije u zavisnosti od ugla $q_2 + q_3$ prikazana je na slici 3.33 isprekidanom linijom. Sa slike 3.33 vidimo da moment statičkog opterećenja (puna linija) i kontramoment usled kompenzacije ne mogu potpuno da se ponište. Podešavanjem pritiska u kompenzacionom cilindru, a time mijenjajući silu S_3 , postizemo što bolje poklapanje ova dva grafika. Pošto su momenti suprotnih smjerova, vidimo da će se u velikoj mjeri poništiti. Tako će motoru preostati da savlada samo manji dio statičkog opterećenja (tamo gdje je ono veće od kompenzacije, a to je dio I) ili pak da savlada višak kompenzacije (tamo gdje je ona prevelika i veća od statičkog opterećenja - deo II).



Sl. 3.35. Statičko opterećenje ramena.

Prelazimo na analizu problema kompenzacije statičkog opterećenja ramenog zgloba S2. Posmatraćemo zglob S2 i sile težina koje proizvode statičko opterećenje oko ose zgloba (sl. 3.35). Masa segmenta 2 je m_2 . Ako zamislimo razdvajanje segmenata 2 i 3 u zglobu S3, tada dejstvo segmenta 3 na segment 2 posmatramo preko sile F_{S3} koja je jednaka:

$$F_{S3} = m_3g + m_{\check{s}}g$$

i momenta statičkog opterećenja lakta

$$M_{S3} = m_3g r_{3,3} \sin(q_2 + q_3) + m_{\check{s}}g (r_{3,3} + r_{3,4} + r_{4,4}) \sin(q_2 + q_3) =$$

$$[m_3 r_{3,3} + m_{\check{s}} (r_{3,3} + r_{3,4} + r_{4,4})] g \sin(q_2 + q_3)$$

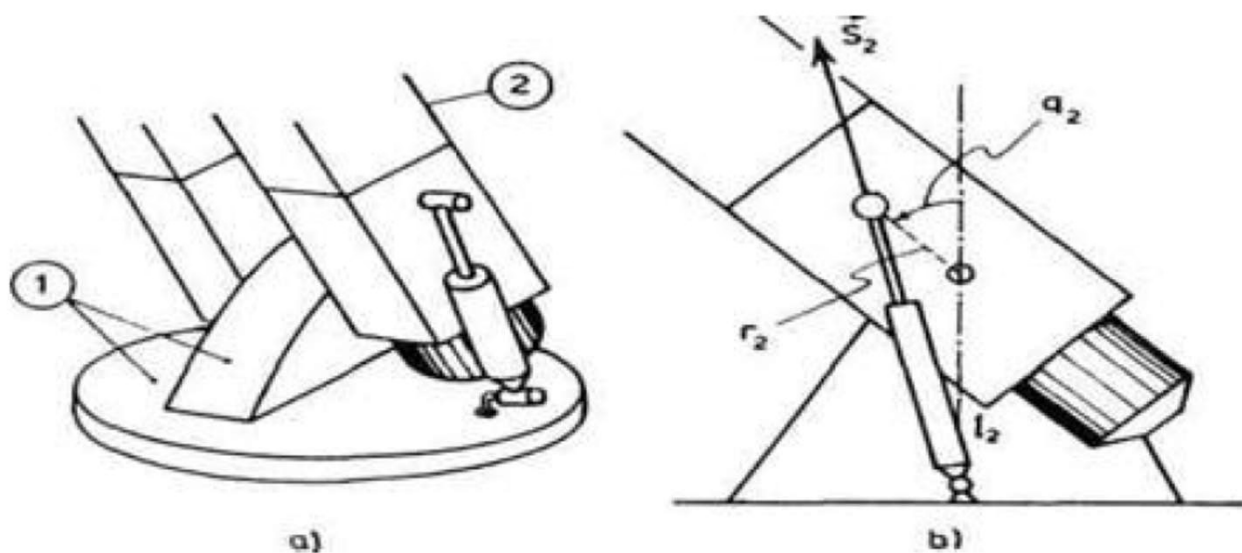
Ovdje treba uočiti dva slučaja. Prvi nastupa onda kada nije uvedena kompenzacija lakta

$$\begin{aligned} M_{s2} &= m_2 g r_{2,2} \sin q_2 + F_{s1} (r_{2,2} + r_{2,3}) \sin q_2 + M_{s1} = \\ &= [m_2 r_{2,2} + (m_1 + m_4)(r_{2,2} + r_{2,3})] g \sin q_2 + M_{s1} \end{aligned}$$

S3, a drugi ako je ova kompenzacija uvedena. U prvom slučaju izraz važi u cjelosti i takav momenat ramena teško se može poništiti kontramomentom kompenzacije u ramenu. U drugom slučaju kompenzacija poništava najveći dio momenta M_{s3} pa se samo njegov mali dio prenosi na segment 2. Ako bi pojednostavili smatrajmo da je poništavanje u laktu potpuno i tada se u gornjem izrazu neće pojaviti M_{s3} a izraz će postati:

$$M_{s1} = [m_2 r_{2,2} + (m_1 + m_4)(r_{2,2} + r_{2,3})] g \sin q_2$$

iz čega slijedi da je momenat statičkog opterećenja ramena proporcionalan sinusu ugla q_2 . U daljoj analizi zadržaćemo se na ovom slučaju. Ostaje činjenica da je statičko opterećenje lakta potpuno kompenzovano.



Sl. 3.36. Kompenzacija ramenog zgloba

Matematički gledano, postupak je isti kao i u slučaju kompenzacije lakta. Ako bismo posmatrali konstruktivno, rješenje je ovdje mnogo jednostavnije jer nije potreban nikakav prenosni mehanizam. Kompenzacioni cilindar vezuje se za segmente 1 i 2 na način kako je prikazano na slici 3.36.

Opterećenja data prethodnim izrazima i kompenzacije prikazane na slikama 3.34(b) i 3.36(b) dovode do zaključka da je problem kompenzovanja opterećenja ramena matematički sličan problemu koji smo obrađivali pri kompenzovanju lakta, samo što se u slučaju ramena pojavljuje ugao q_2 , a u slučaju lakta ugao $q_2 + q_3$. Slijedi da za moment kompenzacije u ramenu dobijamo izraz

$$M_{k2} = \frac{S_2 r_2 l_2 \sin q_2}{\sqrt{r_2^2 + l_2^2 - r_2 l_2 \cos q_2}}$$

gdje je S_2 sila klipa koji vrši kompenzaciju (sl. 3.36).

Ako bismo opterećenje M_{s2} i kontramomenat M_{k2} prikazali grafički dobili bismo dijagrame kao na slici 3.33, s tim što bi u ovom slučaju momenti zavisili samo od ugla q_2 . Podešavanjem pritiska u kompenzacionom cilindru mijenjamo silu S_2 , te tako postizemo približno poklapanje ovih dijagrama. U tom slučaju najveći dio statičkog opterećenja ramena poništen je kompenzacijom.

