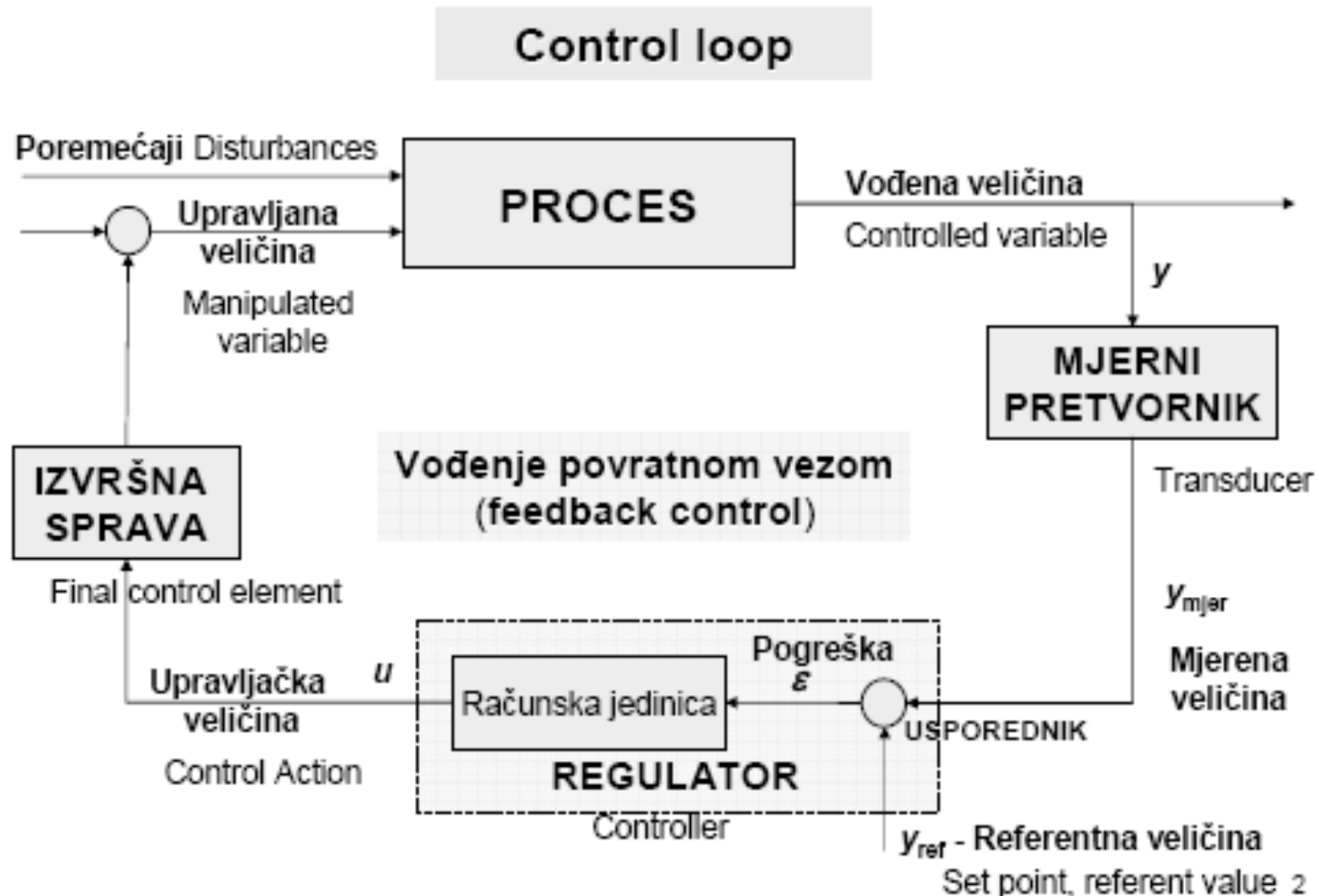


AKTUATORI

DA SE PODSJETIMO



Elementi sistema automatske regulacije

- **Objekti upravljanja** (čime se sve može upravljati): proizvodni procesi, alatne mašine, roboti, saobraćaj itd.
- Struktura sistema automatskog upravljanja (kako se upravlja procesima)
- **Regulator** (upravljački uređaji - “mozak” sistema upravljanja)
 - integrisana operaciona pojačala
 - prekidački sklopovi
 - digitalni logički sklopovi
 - mikroračunari i programabilni logički uređaji (PLC).

Elementi sistema automatske regulacije

- **Aktuatori** (izvršni uređaji) (uređaji koji direktno djeluju na proces):
 - jednosmjerni, naizmjenični i koračni motori,
 - tiristorska i tranzistorska pojačala snage,
 - pneumatski i hidraulični motori,
 - pneumatski i hidraulični razvodnici,
 - regulacioni ventili.

Elementi sistema automatske regulacije

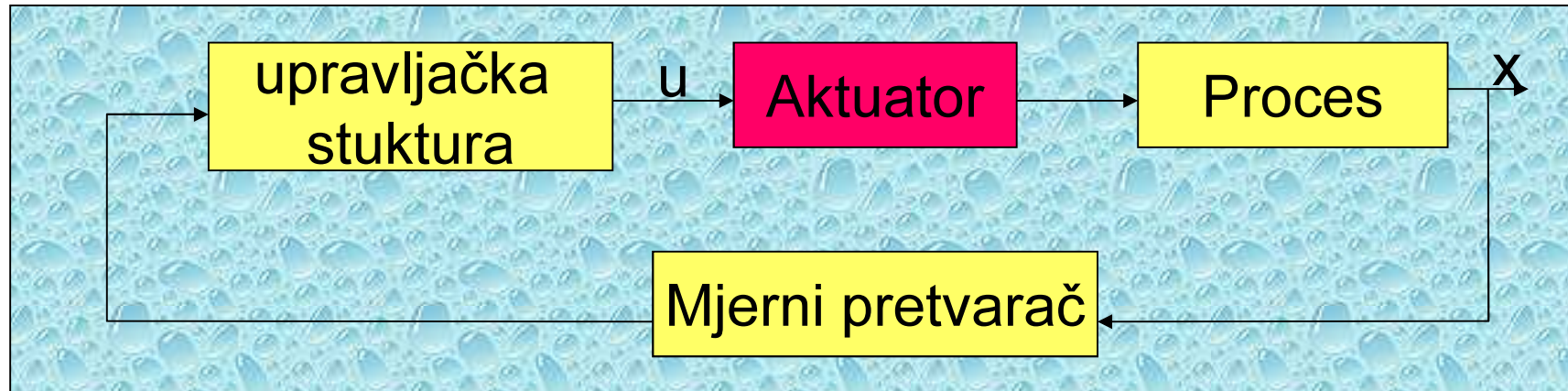
- **Mjerni uređaji (senzori)**

mjerni detektori za položaj, pomjeraj, ugao, brzinu, silu, temperaturu, nivo, pritisak i protok.

- Ostali elementi sistema automatske regulacije.

- Matematički opis fizičkih pojava u elementima automatizovanih procesa.

AKTUATORI I IZVRŠNI ORGANI



Izvršni organ je element direktne grane SAU kojom se neposredno mijenja izvršna (upravljачka) veličina. Obično, izvršni organ mijenja tok energije ili materijala kroz objekat upravljanja u cilju dostizanja određenih performansi.

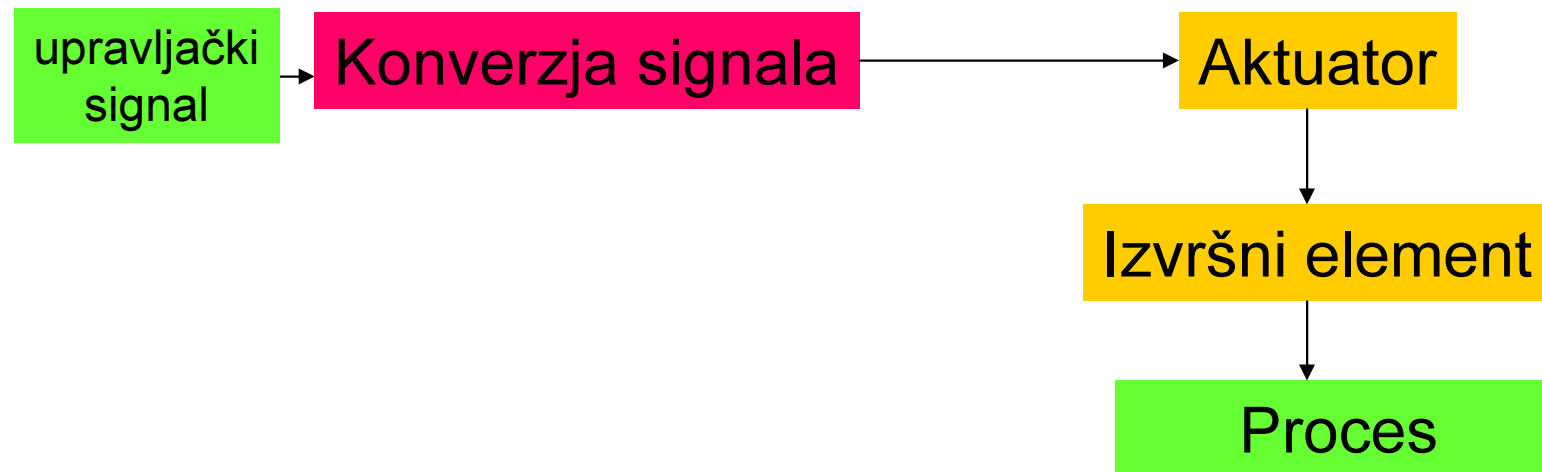
Za pokretanje izvršnih organa mehaničkog tipa koristi se izvršni mehanizam mehaničkog tipa koji se kratko naziva aktuator. Postoje razni vidovi aktuatora zavisno od prirode izvršnog organa koji pokreću, tipa energije koju koriste za svoj rad, tipa upravljačkog signala itd.

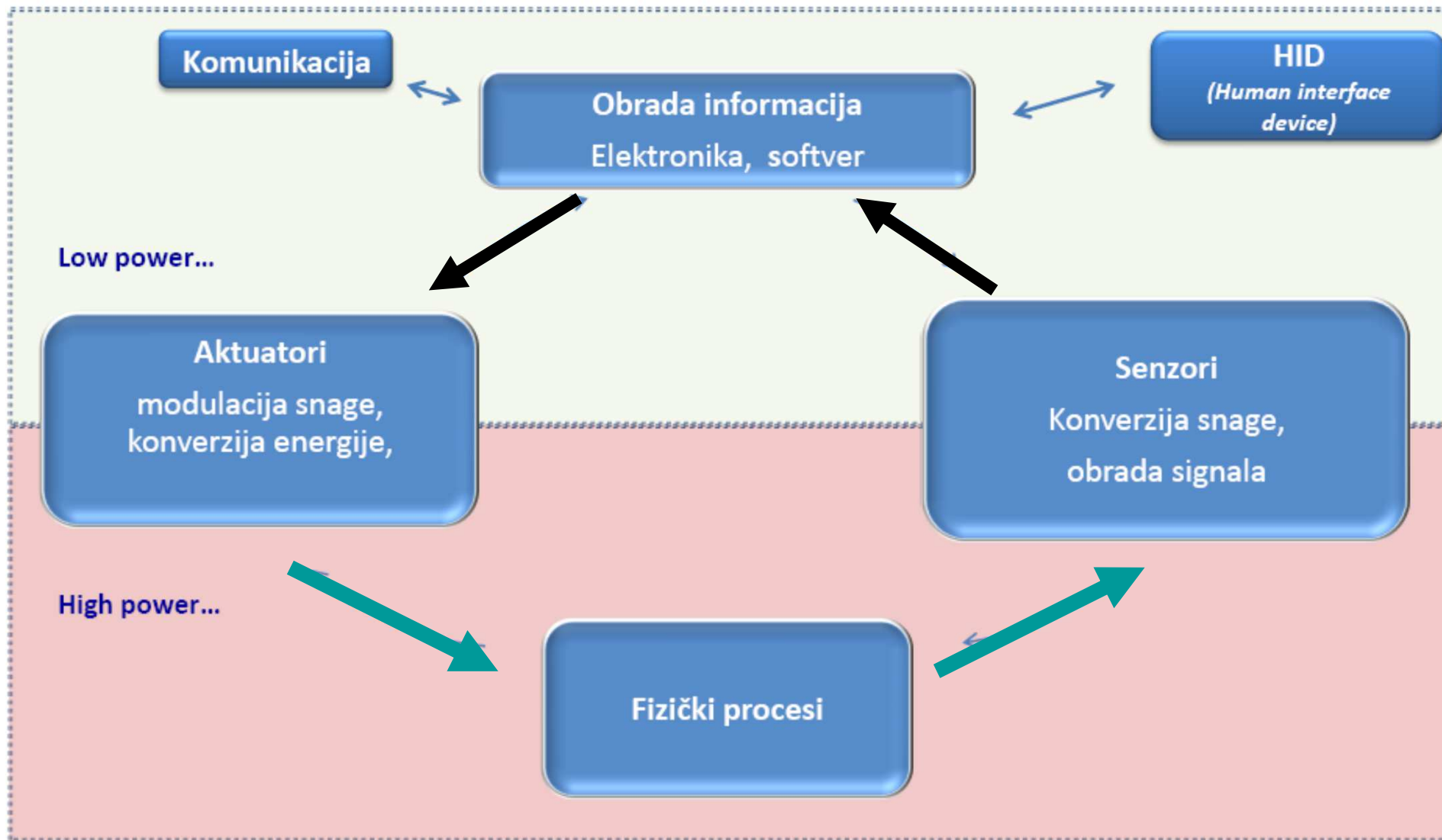
Osnove aktuatora

- **Aktuatori su uređaji koji pretvaraju električne ili fluidne ulaze u mehaničke izlaze, kao što su pozicija, sila, ugao ili moment.**
- Nivo izlazne energije je mnogo veći od nivoa energije ulaznog signala, tako da se zahtijeva korišćenje el. naelektrisanja, pneumatskog pritiska, hidrauličkog pritiska, itd.
- Klasifikacija i evaluacija najvažnijih aktuatorskih koncepata može se koncentrisati u tri glavne grupe:
 - Elektromehanički aktuatori;
 - Aktuatori koji koriste snagu fluida;
 - Alternativni aktuatorski koncepti (inteligentni, mikroaktuatori)

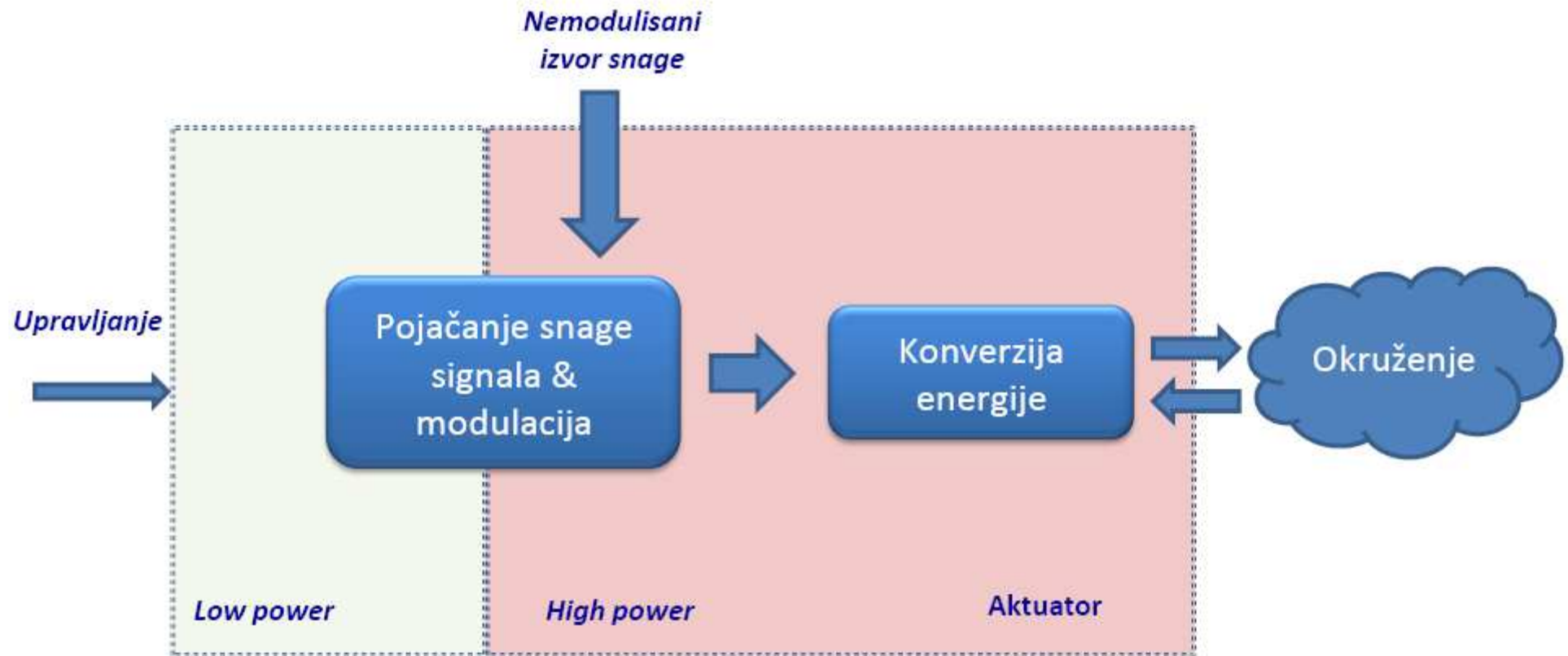
- Aktuator je uređaj koji kontrolisano pretvara električnu energiju (ili neku drugu) u mehaničku energiju. Elektromagnetski aktuatori pretvaraju energiju elektromagnetskog polja u mehaničku energiju koja generiše kretanje. Elektromagnetski aktuatori su pogodni za “srednje” pogonske momente i sile.
- Pneumatski aktuatori pretvaraju energiju koju daje pritisak gasa u kretanje. Pneumatski aktuatori su pogodni za manje pomjeraje.
- Hidraulički aktuatori pretvaraju energiju pritiska tečnosti u pomjeranje. Hidraulički aktuatori su pogodni za generisanje velikih sila i srednja pomjeranja.
- Piezoelektirčni aktuatori pretvaraju elektrostatičku energiju u pomjeranja površina. Pogodni su sa male pomjeraje i srednje sile.

Pozicioni aktuatori često se zovu i servomotori koji pozicioniraju izvršne organe, npr. manipulacionu polugu kod regulacionog ventila. Servomotori se mogu posmatrati kao konvertori jednog vida energije koji je niskog nivoa, u drugi vid energije koji je obično visokog nivoa, a koji je neophodan za uspješno pokretanje izvršnog organa.



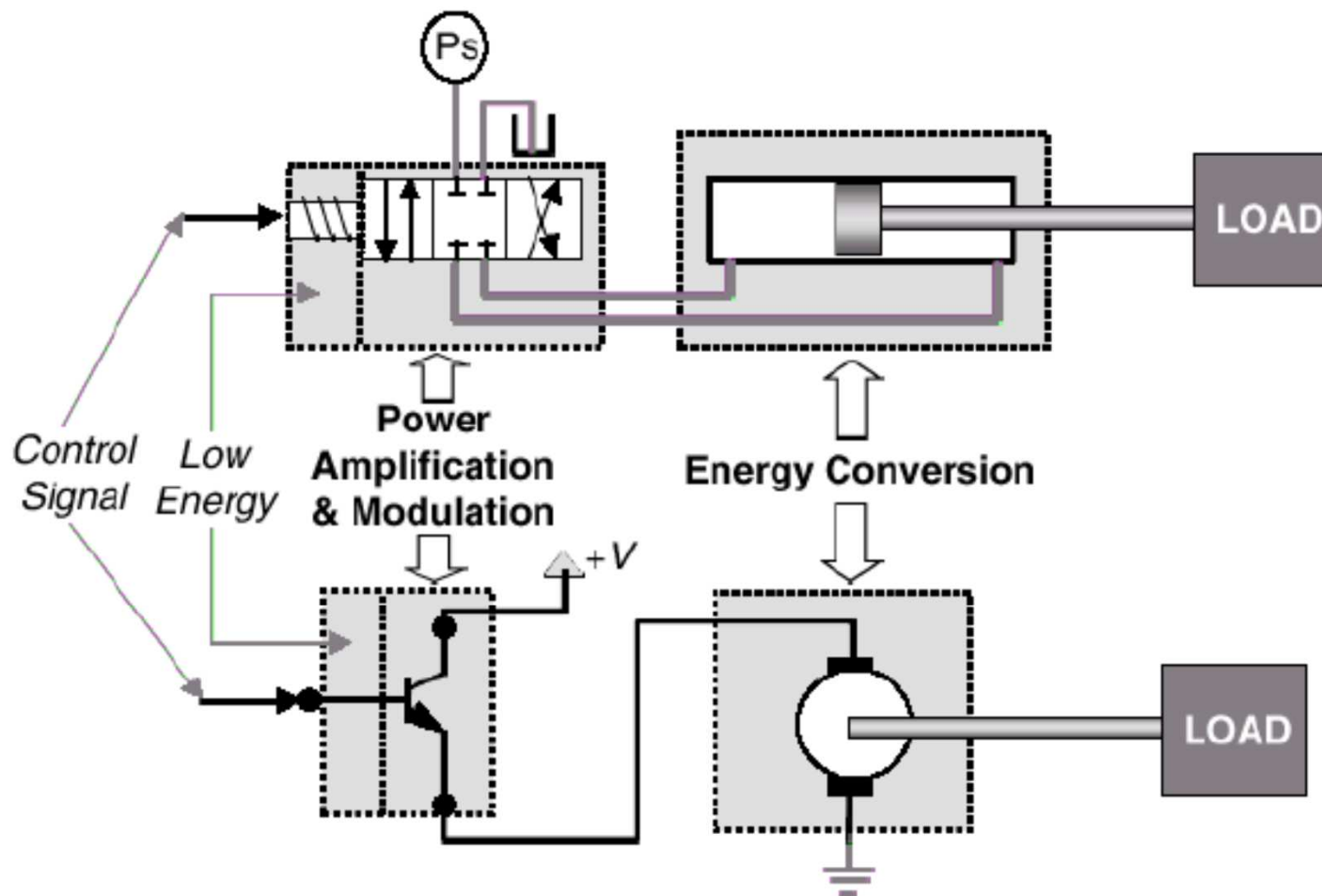


Aktuatori

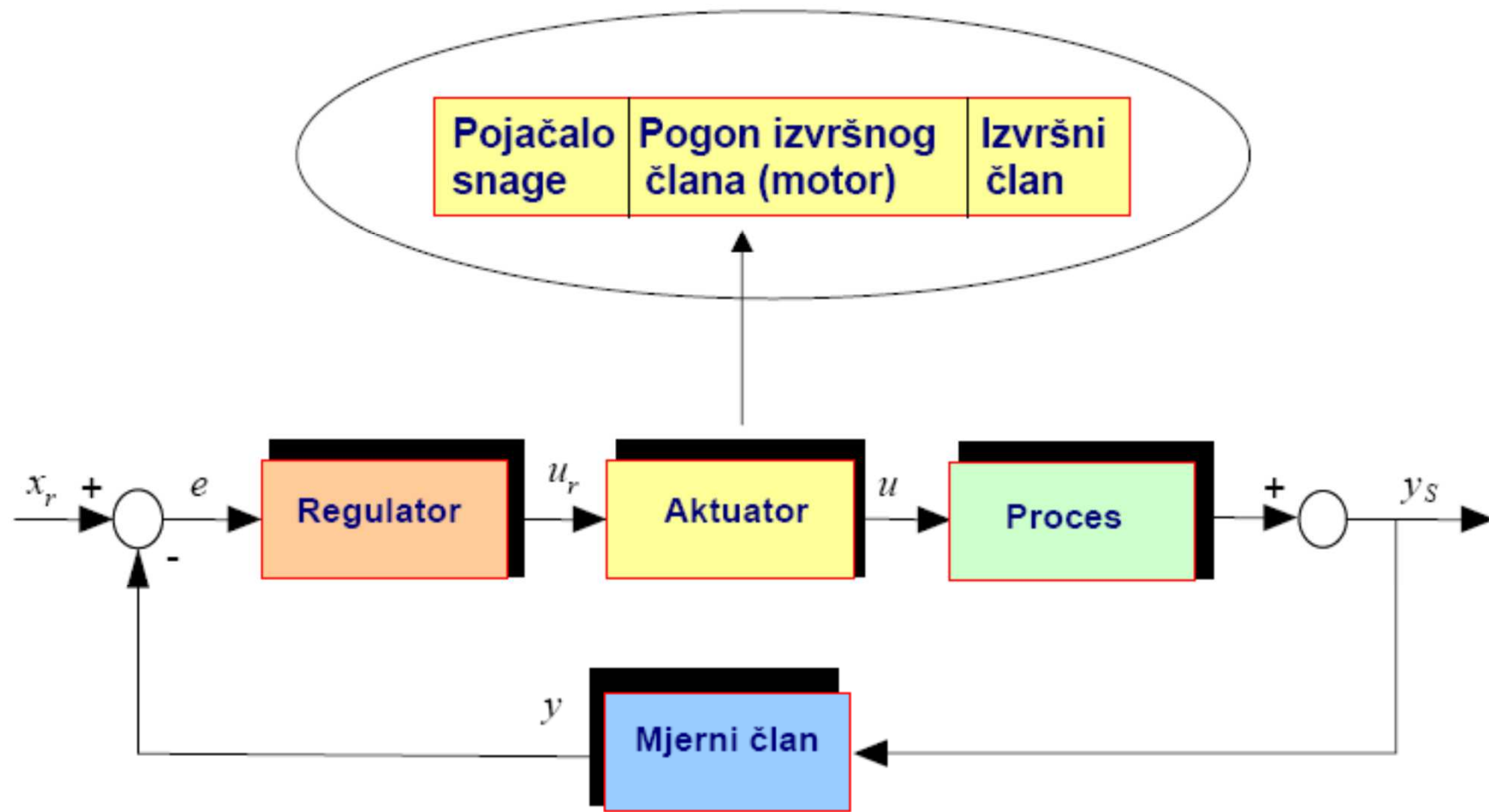


Funkcionalni dijagram aktuatora

Elektrohidraulični i elektromehanički aktuator

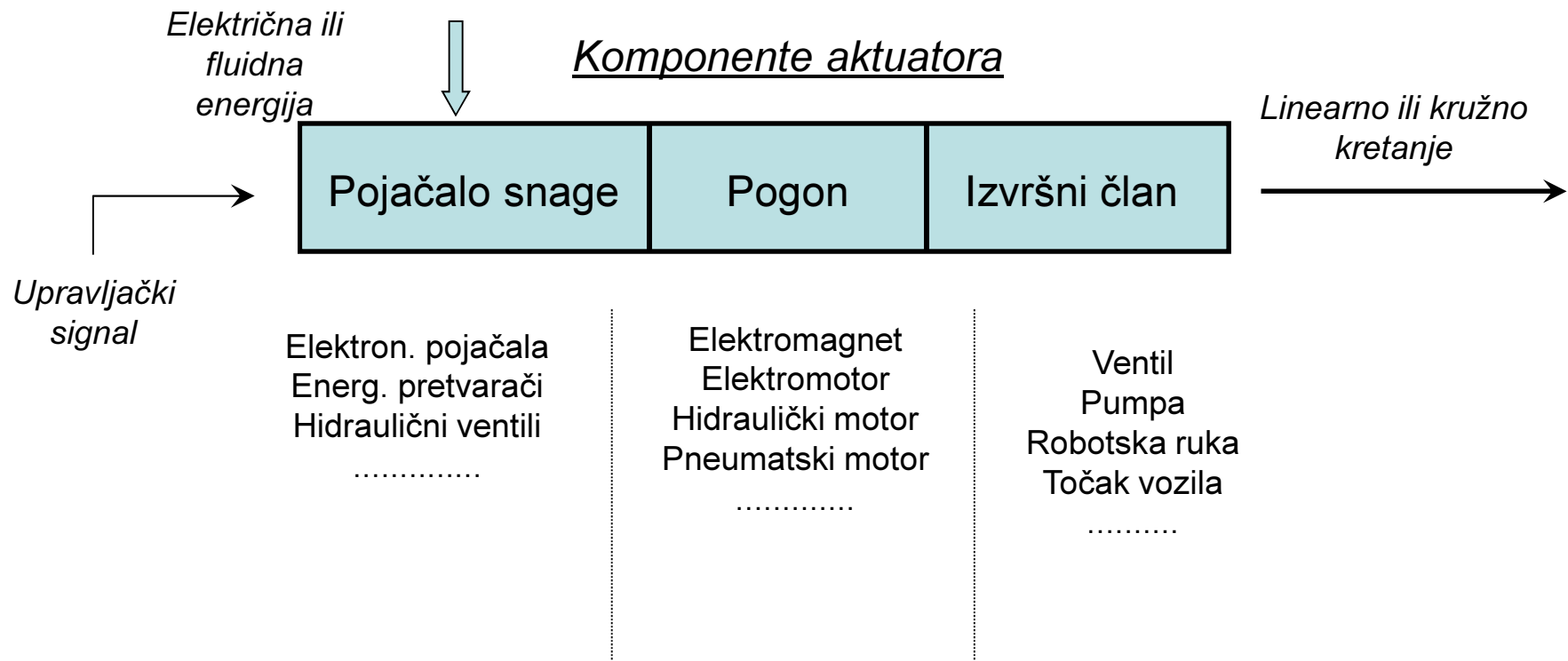


Komponente aktuatora



AKTUATORI

Osnovni pojmovi



Komponente aktuatora

- **Pojačala snage** – upravljanje tokom energije (elektroenergije)

- tiristorska,
- tranzistorska.

Primjena: elektroenergetika, elektromotorni pogoni

- **Pogon izvršnog člana** – upravljanje kretanjem čvrstih tijela

- motori (električni, pneumatski, hidraulični).

Primjena: građevinske i poljoprivredne mašine, roboti.

Izvršni član

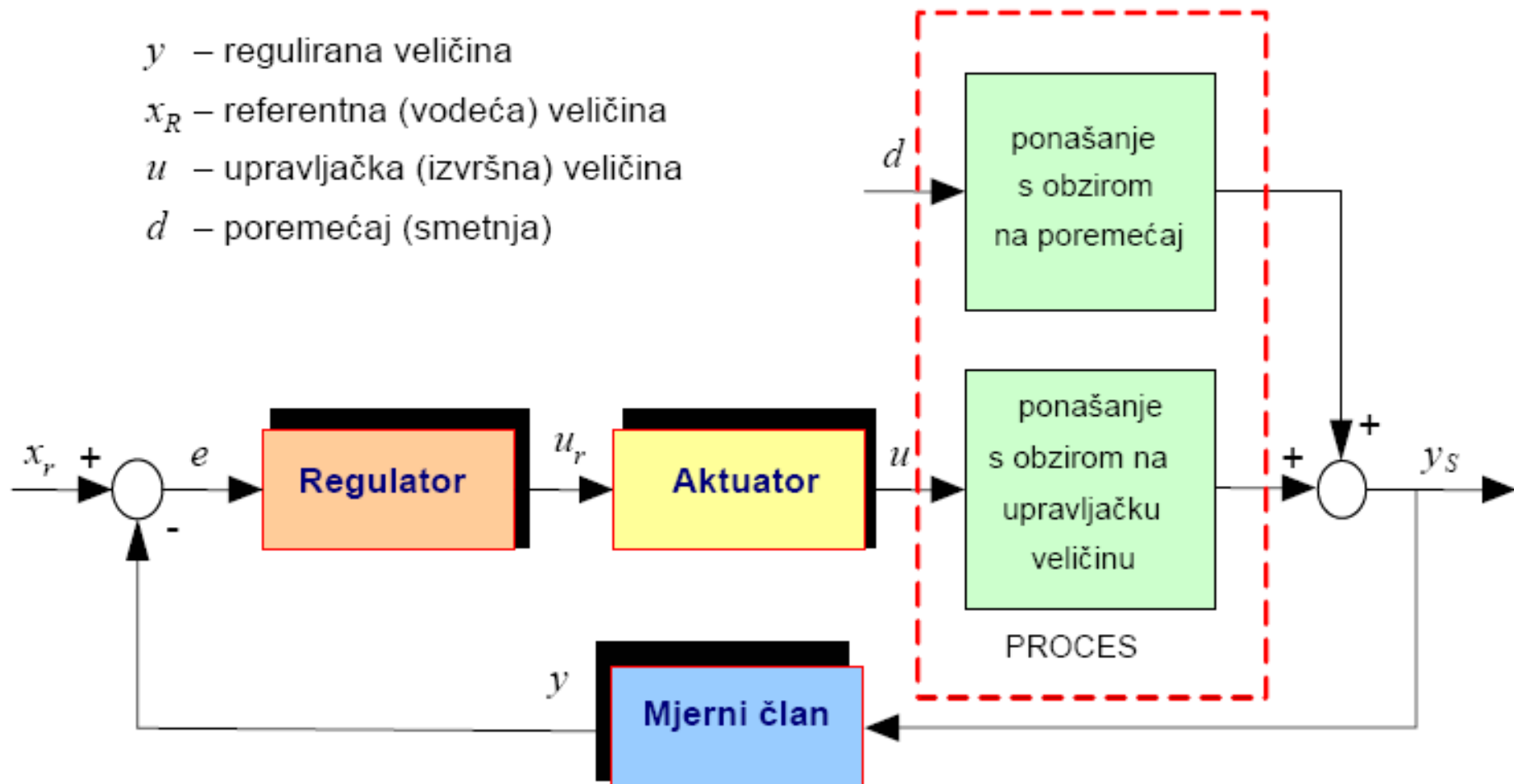
- Upravljanje strujom materije (gasovi, tečnosti)
 - Ventili
 - Pumpe
 - Uređaj za doziranje

Primjena: procesna tehnika.

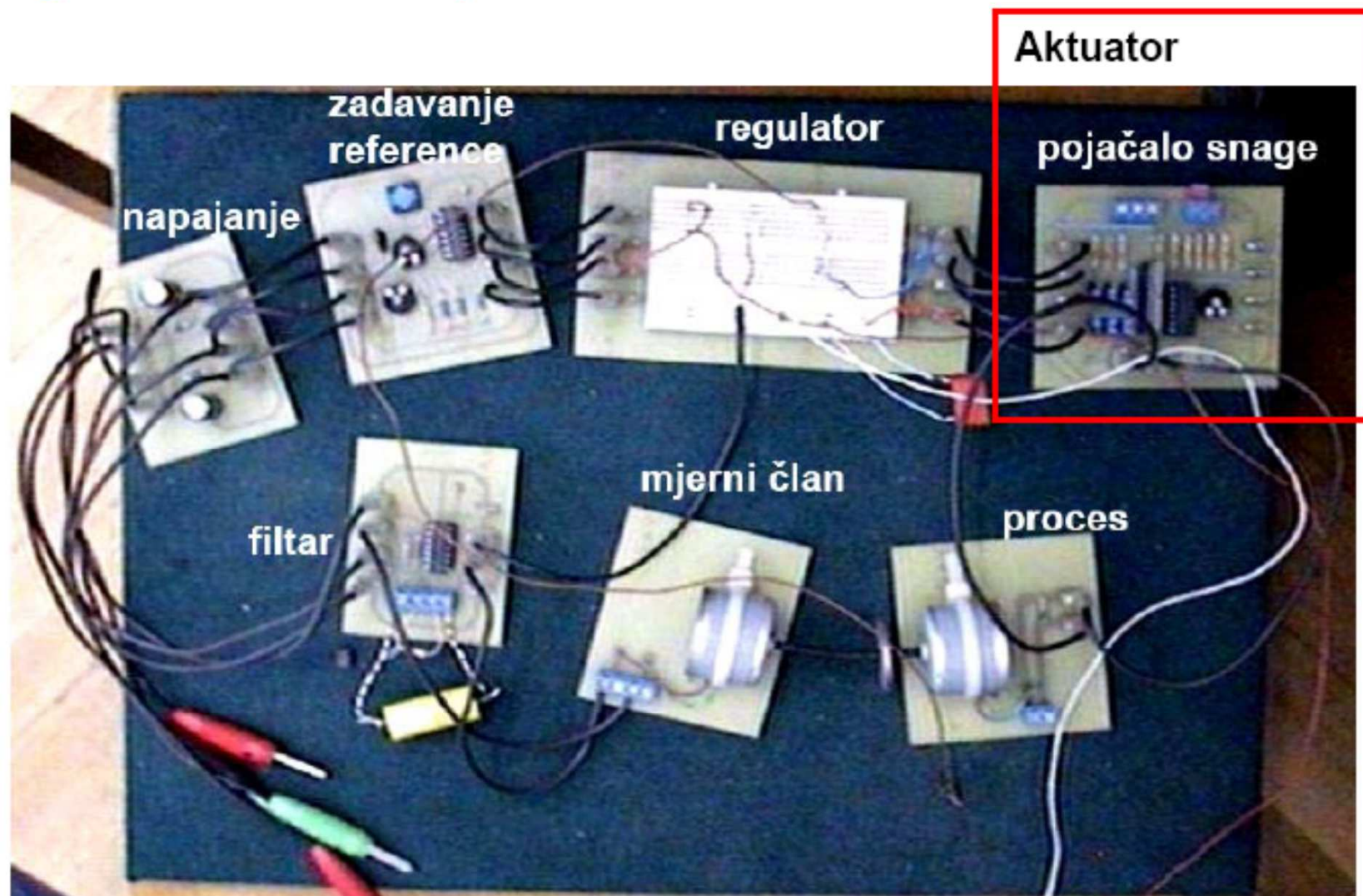
- Upravljanje tokom energije (elektroenergije).
 - prigušnica (L),
 - transformator.

Pozicija aktuatora u sistemu automatske regulacije

y – regulirana veličina
 x_R – referentna (vodeća) veličina
 u – upravljačka (izvršna) veličina
 d – poremećaj (smetnja)



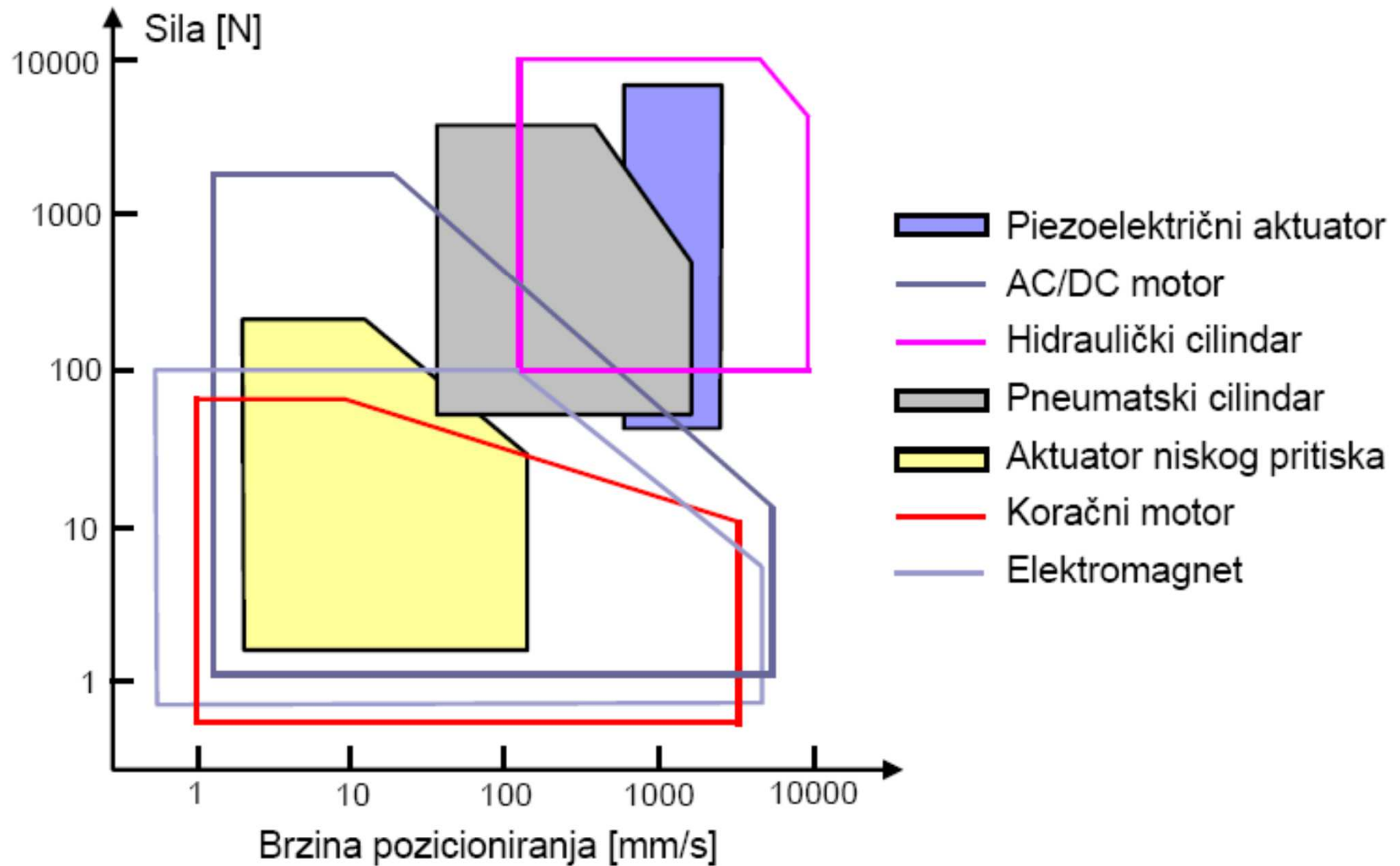
Izgled laboratorijske makete za SAU



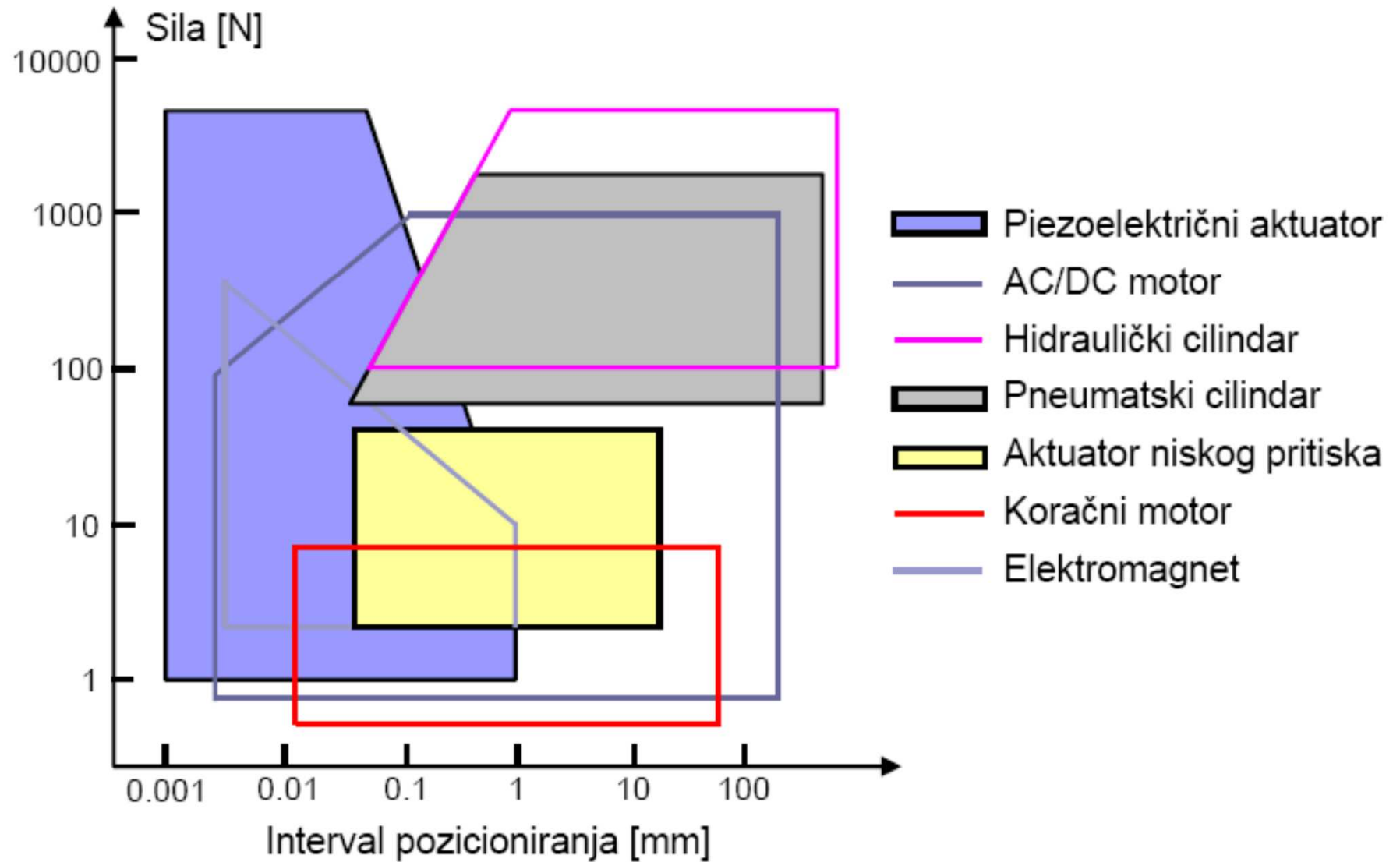
Poređenje aktuatora

- Za izbor odgovarajućeg aktuatora mogu se posmatrati različiti principi.
 - Najčešće se koriste slijedeći principi:
 - zavisnost sile od linearne brzine pozicioniranja;
 - zavisnost sile od intervala pozicioniranja;
 - odnos energija-težina.
- Na slijedećim slikama će biti prikazane navedene karakteristike u logaritamskoj razmjeri.
- Sa prve slike se uočava da piezoelektrični aktuatori zahtijevaju velike iznose sile za male pomjeraje (promjena dimenzija).
 - Što se tiče intervala pozicioniranja, najšire intervale imaju elektromehanički koncepti.

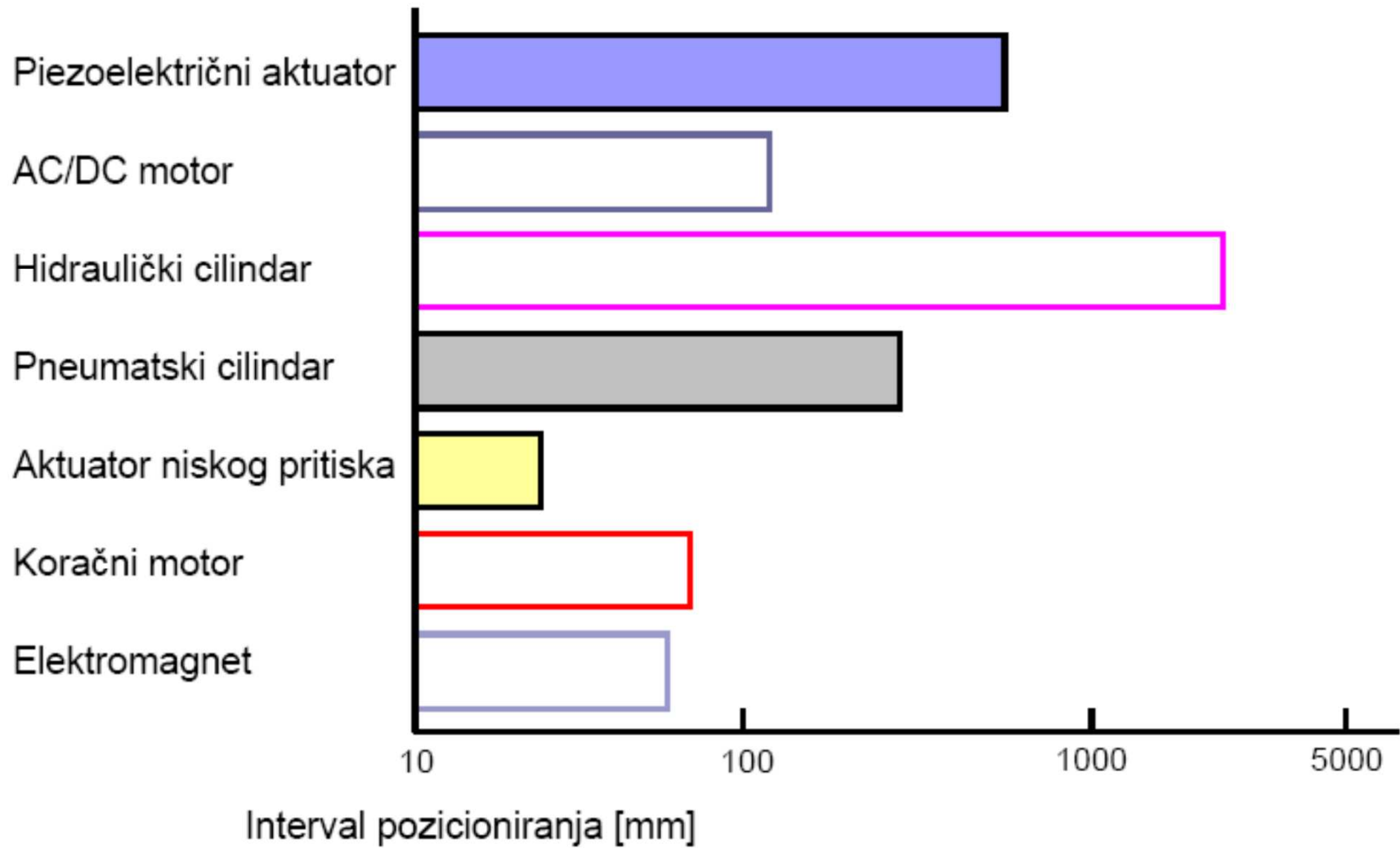
Zavisnost sile od brzine pozicioniranja



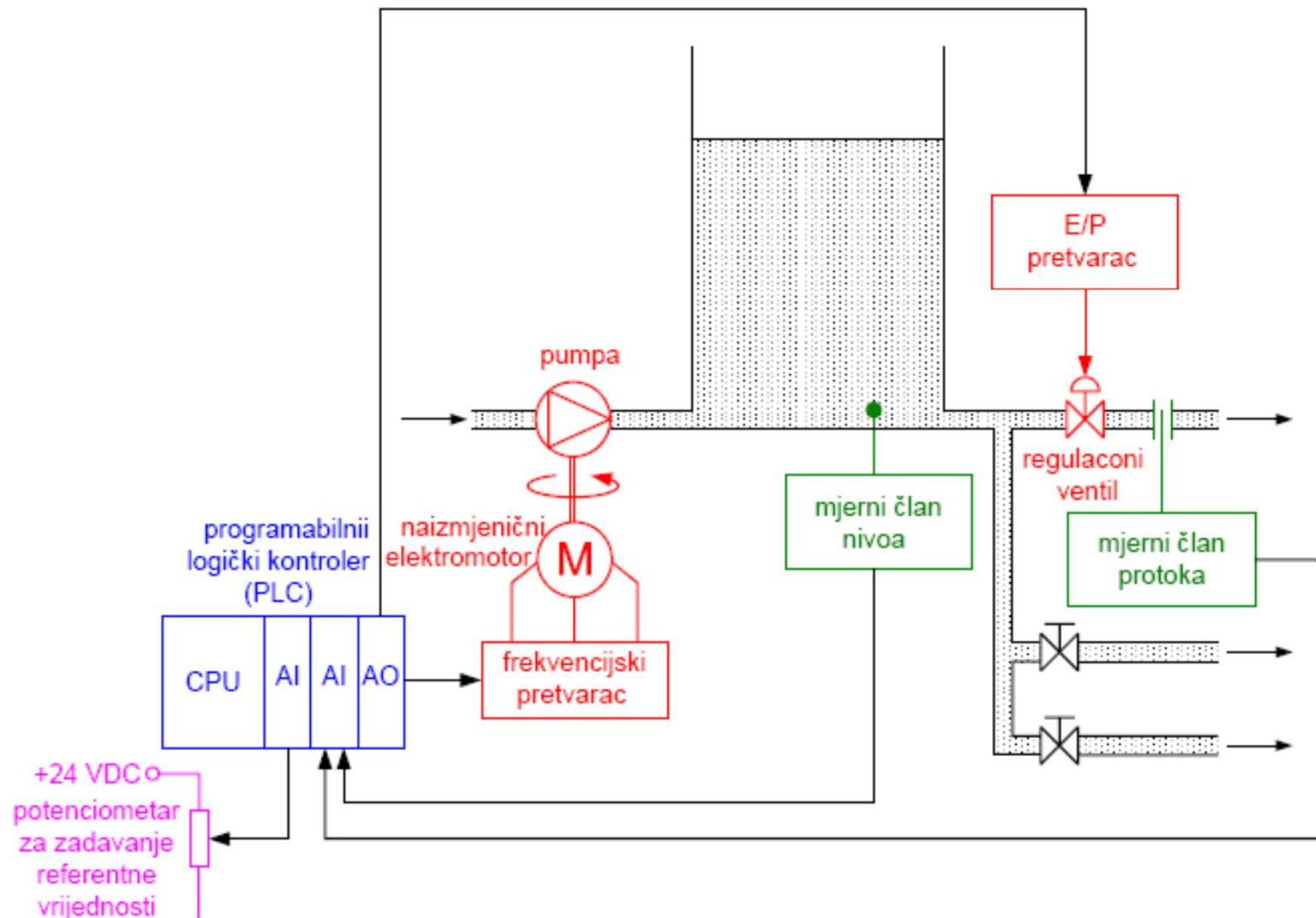
Zavisnost sile od intervala pozicioniranja

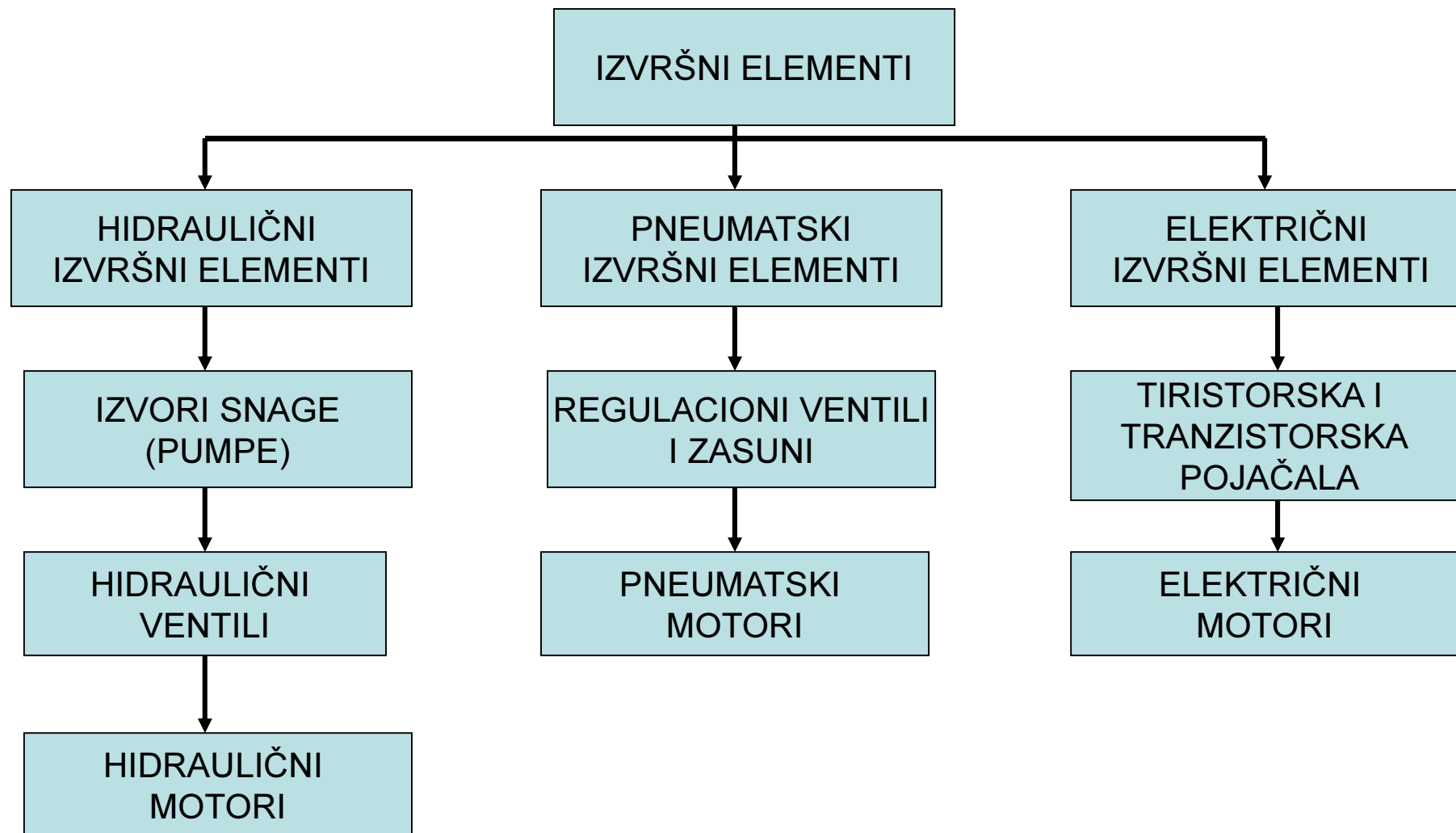


ODNOS ENERGIJA TEŽINA



Primjer: upravljanje nivoom i protokom





Tipovi aktuatora

- Elektromagnetski
 - Solenoidi
 - Električni motori
 - DC, AC, Linearni, i Step motori
- Piezoelektrični
 - Bimorph
 - Piezomotori
- Magnetostrikcijski

- Elektrostatički
 - Elektrostatički Zvučnici
 - Elektrostatički motori

- Hidraulički
 - Cilindri (linearni)
 - Motori (rotacijski)
- Pneumatski
 - Cilindri (lin.)
 - Motori (rot.)
- Ostalo
 - Nitinol – nikal titanijum

Elektromehanički
aktuatori

DC motor

AC motor

Koračni motor

Tranzistorska i
tiristorska pojačala

Elektromagnet

Linearni motor

Aktuatori koji
koriste snagu fluida

Hidraulički

(ventili, pumpe,
motori)

Pneumatski

(regulacijski ventili,
zasuni, motor)

Mikroaktuatori

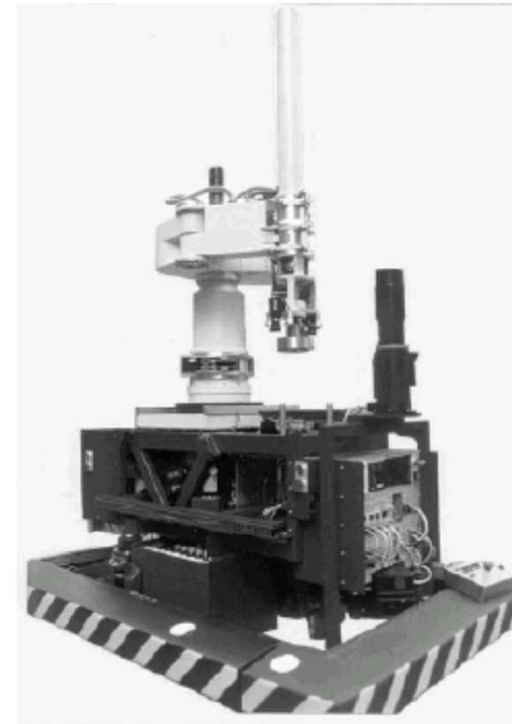
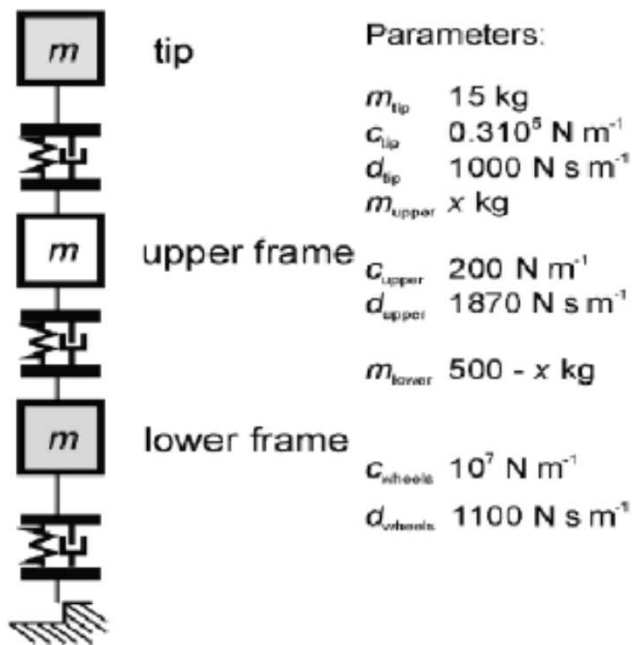
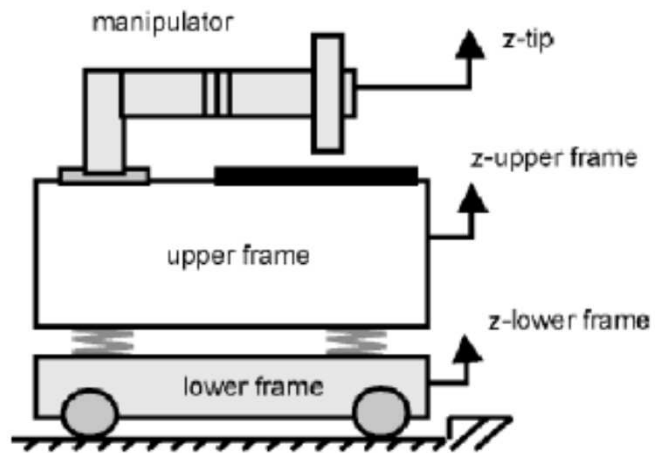
Piezoelektrični

Magnetostruktivni

Elektrohemijski

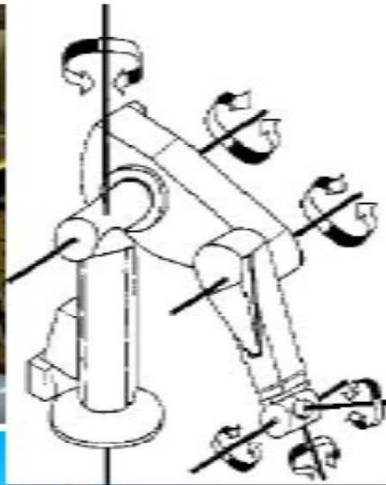
Termalni

Memorijsko metalni



- **Zašto su važni aktuatori?**

Aktuatori su smješteni u mnogim proizvodima za korisničke, industrijske, medicinske i vojne primjene.



- Minijaturizacija aktuatora dovodi do minijaturizacije proizvoda.

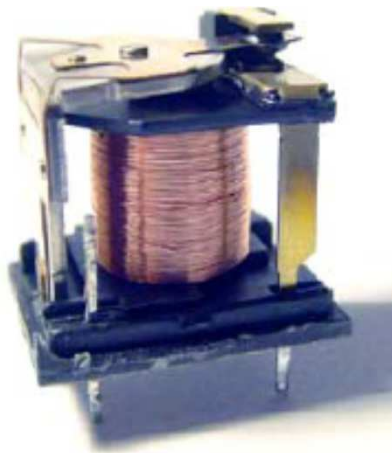


- Minijaturizacija aktuatora dovodi do minijaturizacije proizvoda.



Elektromagnetni aktuatori

- Elektromagnetni aktuatori pretvaraju energiju elektromagnetskog polja u mehaničku energiju koja izaziva kretanje.
- Pogodni su za “srednje” pogonske momente i sile, kao i pomjeraje u “srednjem” domenu.



Relej



motori rotacioni i linearni

Elektromagnetni aktuatori



Ventil sa sloenoidom



Zvučnik



Aktuator za otvaranje vrata.

ELEKTROMAGNETSKI AKTUATOR

Brushless servo motori



Linearni motori

DC brushless motor



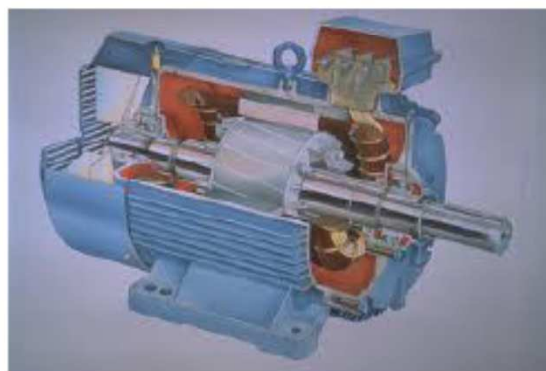
Asinkroni motor



DC motor



Asinkroni motor

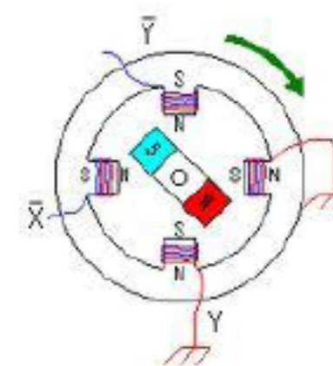
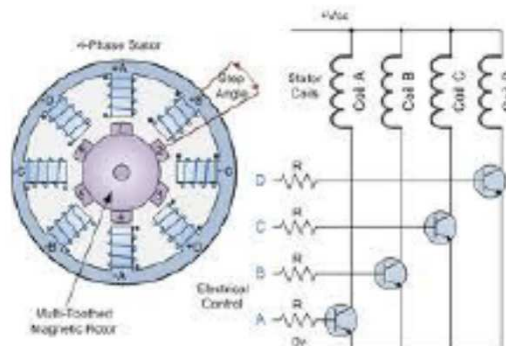
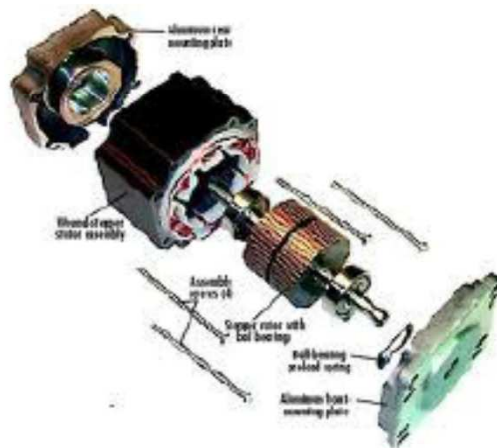
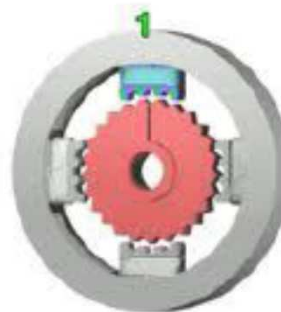


Mali sinkroni motori



ELEKTROMAGNETSKI AKTUATOR

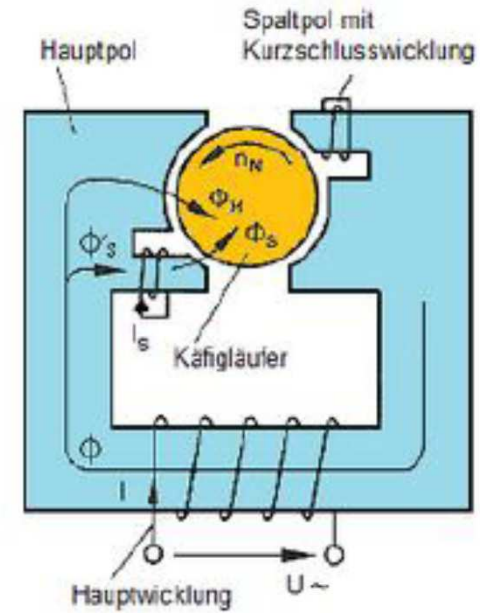
Koračni motori



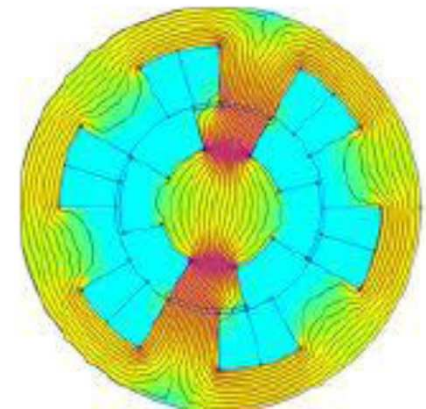
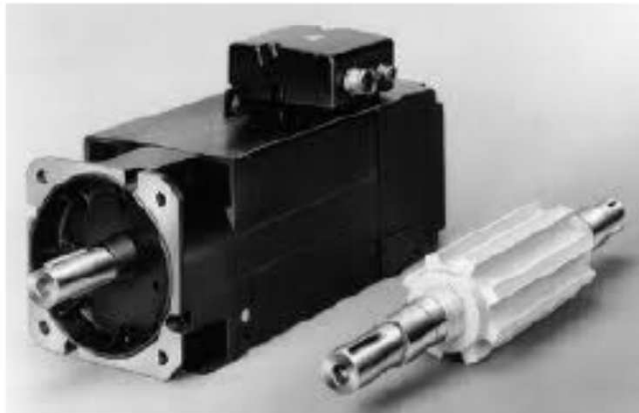
X	K	Y	Y
0	1	0	1
1	0	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0

ELEKTROMAGNETSKI AKTUATOR

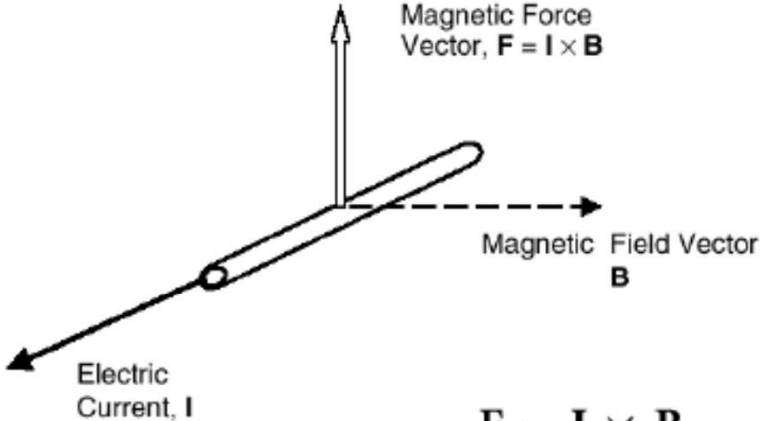
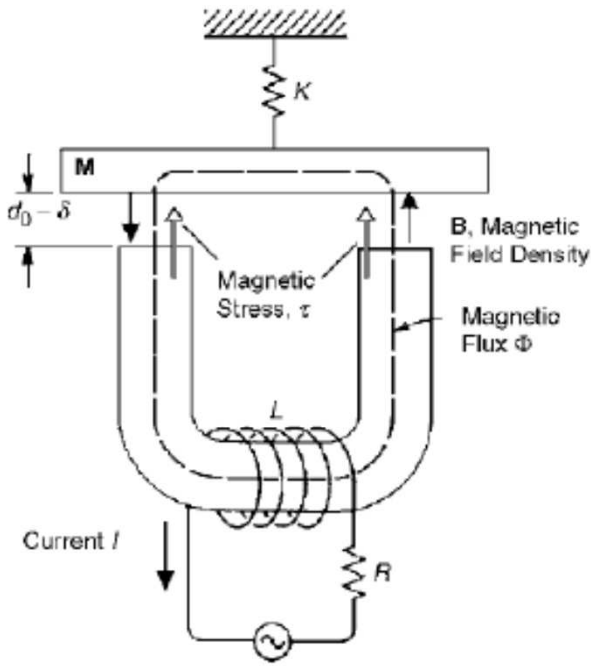
Motor s kratkospojenom pomoćnom fazom



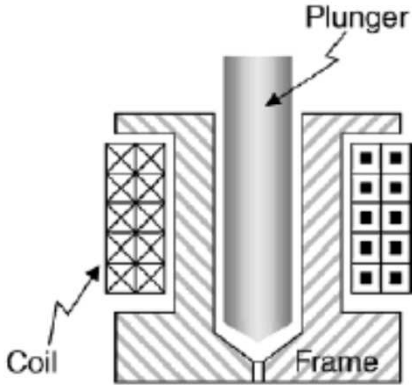
Motori s promjenjivom reluktancijom SRM, PM SRM



Elektromagnetski-Solenoidi

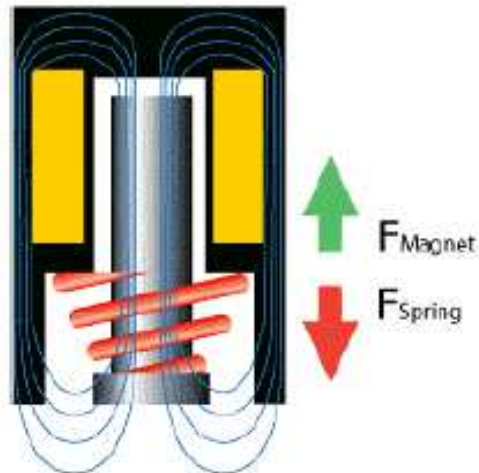
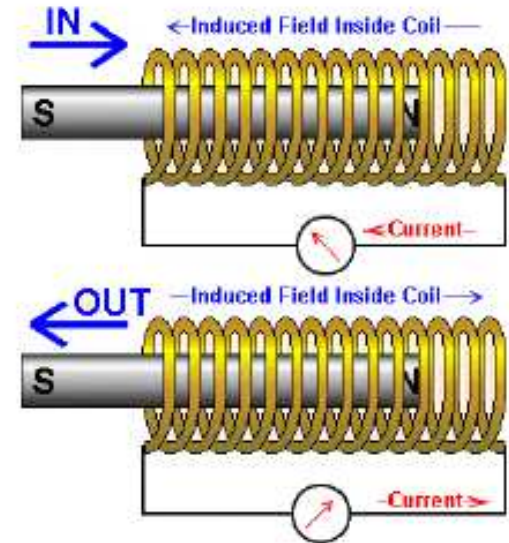
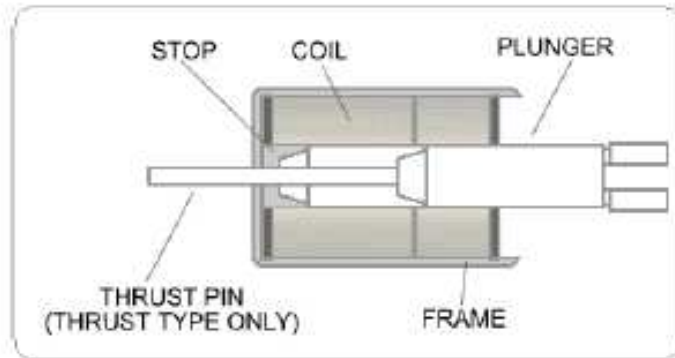


$$F = I \times B$$



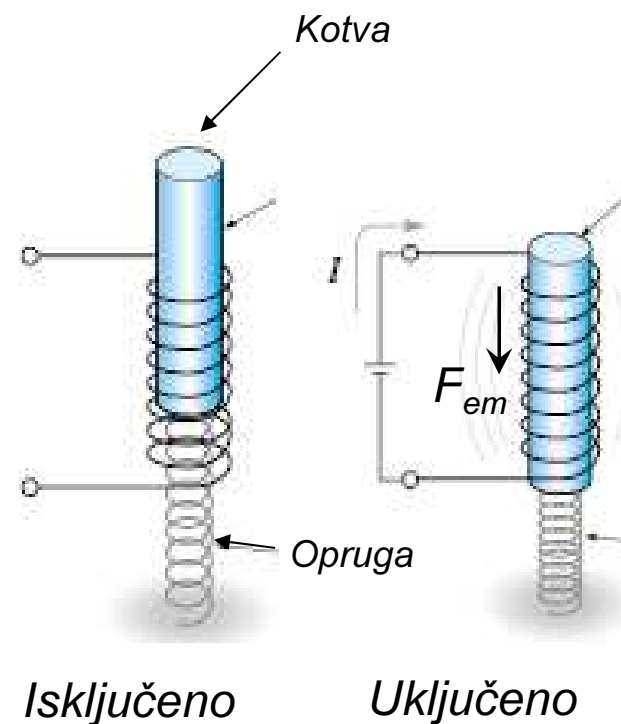
ELEKTROMAGNETSKI AKTUATOR

Solenoid - zavojnica



ELEKTROMAGNETI (SOLENOIDI)

- Solenoidi su jednostavni elektromagnetski uređaji koji električnu energiju direktno pretvaraju u linearno mehaničko kretanje. Imaju relativno mali hod, što ograničava njihovu primjenu.
- Solenoid se sastoji od zavojnice i željezne kotve koja se može pomjerati unutar zavojnice. Kada se kroz zavojnicu pusti jednoosmjerna ili naizmjenična struja, na kotvu djeluje elektromagnetska sila (F_{em}) koja je uvlači unutar zavojnice. Za povratak kotve u početni položaj koristi se opruga.

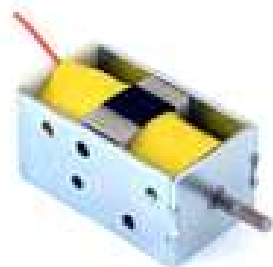
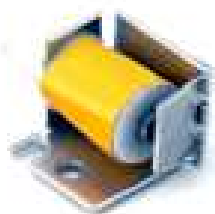


ELEKTROMAGNETI (SOLENOIDI)

- Magnetsko polje u solenoidu možemo izračunati iz:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{NI}{h}$$

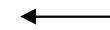
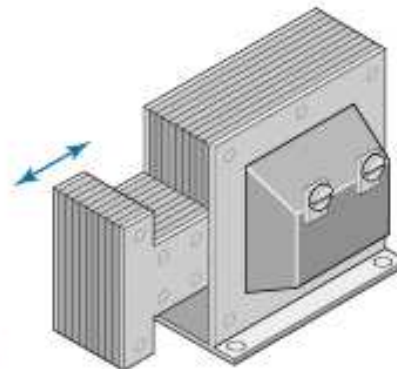
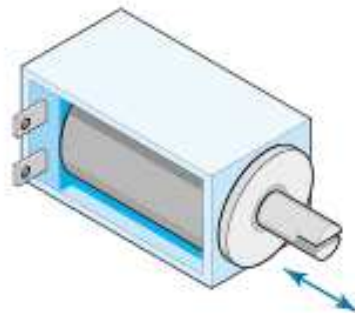
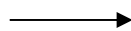
gdje je $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (permeabilnost – H/m),
B – magnetska indukcija (T), n – broj navoja
po metru, h – dužina solenoida (m)



ELEKTROMAGNETI (SOLENOIDI)

- Zbog malog hoda primjene su ograničene, ali ipak postoji mnoštvo primjena pri čemu se elektromagneti uglavnom koriste kao "on/off" (uključiti/isključiti) aktuatori: npr. releji, električne brave, elektromagnetski ventili, sklopnici.....
- Znatno veći napon i struja potrebni su za uvlačenje kotve, nego za držanje kotve u uvučenom položaju kada nepotrebno teče veća struja i zagrijava zavojnicu.

*jednosmjerni
elektromagnet*

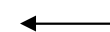
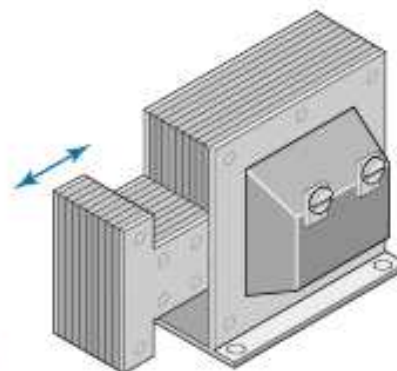
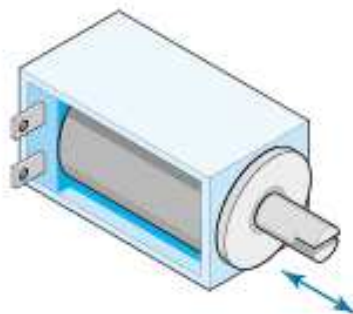
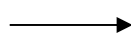


*naizmjenični
elektromagnet*

ELEKTROMAGNETI (SOLENOIDI)

- Sila na kotvu je promjenljiva zavisno o njenom položaju, a najveća je pri uvučenom položaju kotve.
- Elektromagneti mogu biti projekovirani za kontinualni ili intermitentni rad. Kod intermitentnog rada poslije svakog ciklusa rada potrebno je odgovarajuće vrijeme hlađenja, dok su elektromagneti za kontinualni rad projektovani tako da termički mogu stalno podnijeti nazivnu struju.
- Naizmjenični elektromagneti koriste lameliranu kotvu i kućište radi sprečavanja vrtložnih struja.

*jednosmjerni
elektromagnet*



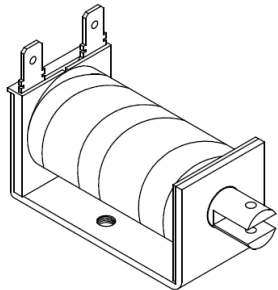
*Naizmjenični
elektromagnet*

ELEKTROMAGNETI (SOLENOIDI)

MAGNETIC SENSOR SYSTEMS

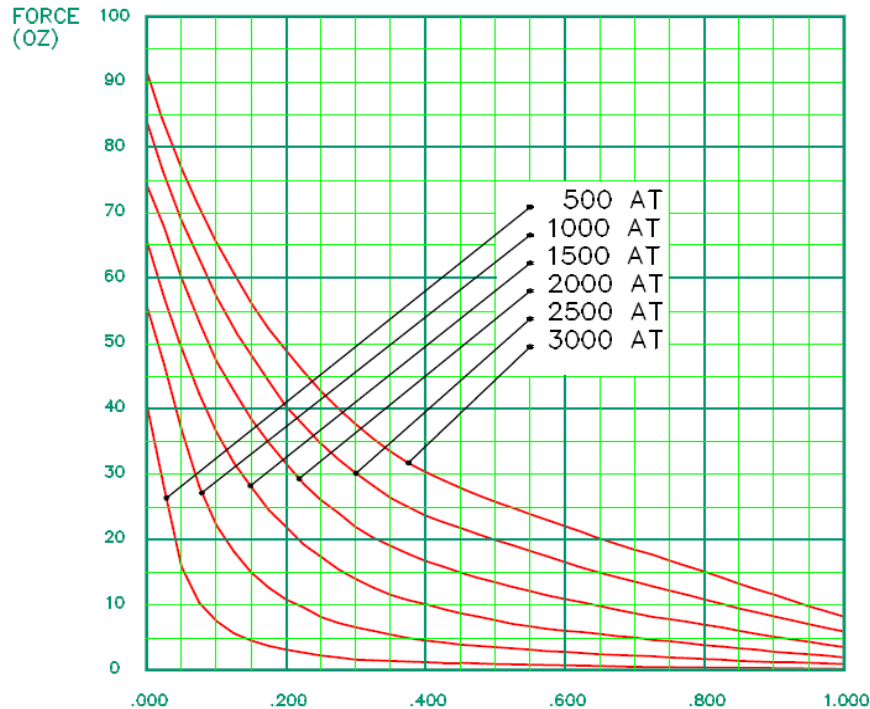
Pull Type C-Frame Solenoid

TOTAL WEIGHT: 3.7 OUNCES
PLUNGER WEIGHT: 0.5 OUNCES



Series S-17-85
0.84" X 0.92" X 1.75"

TYPICAL PULL FORCE VERSUS STROKE

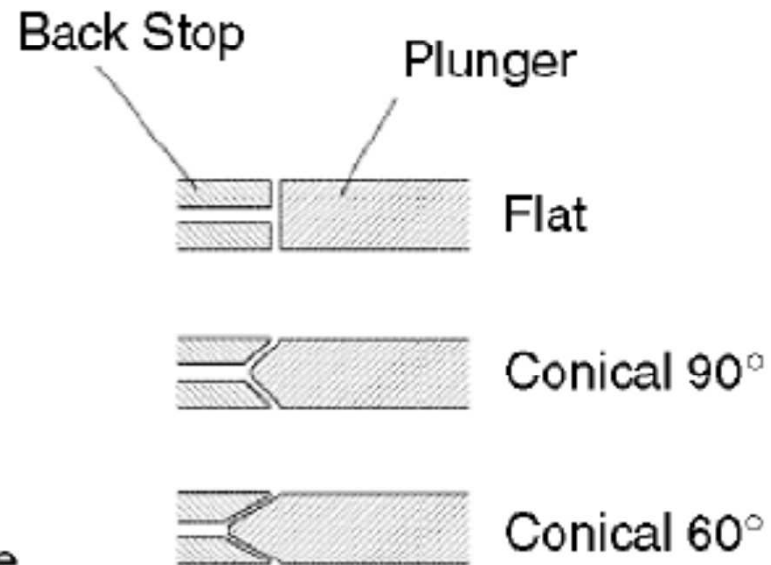
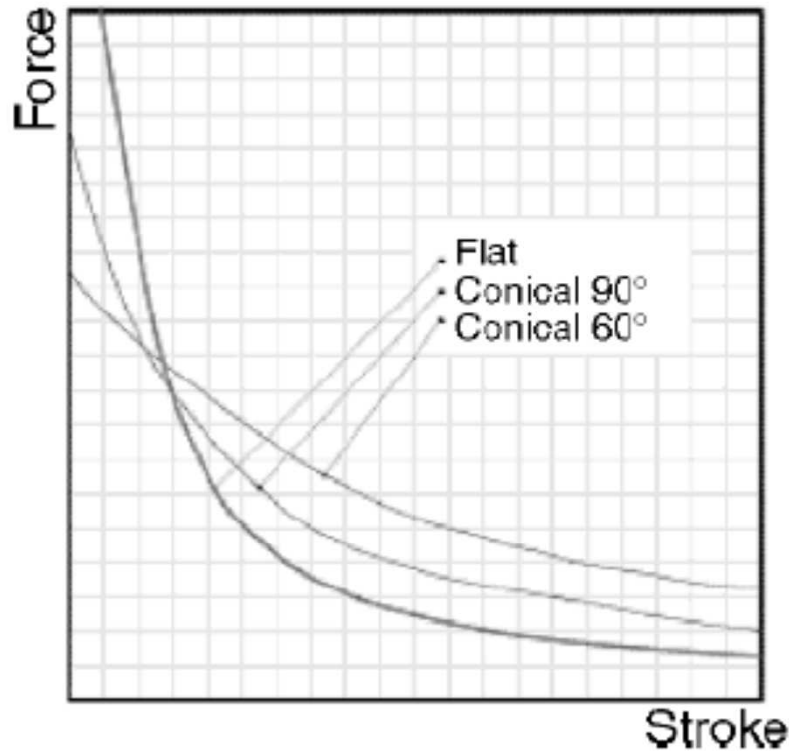


duty cycle	1	1/2	1/4	1/8	
maximum "ON" time, (Sec.)	∞	100	15	10	
watts	5	10	20	40	
approximate ampere turns	1060	1500	2120	3000	
AWG number	resistance	volts DC	volts DC	volts DC	volts DC
23	1.8	3.0	4.2	6.0	8.5
24	2.7	3.7	5.2	7.3	10.4
25	4.4	4.7	6.6	9.4	13.3
26	7.4	6.1	8.6	12.2	17.2
27	11.0	7.4	10.5	14.8	21.0
28	18.7	9.7	13.7	19.3	27.3
29	30.3	12.3	17.4	24.6	34.8
30	46.1	15.2	21.5	30.4	42.9
31	76.9	19.6	27.7	39.2	55.5
32	117	24.2	34.2	48.4	68.4
33	185	30.4	43.0	60.8	86.0
34	286	37.8	53.5	75.6	107
35	477	48.8	69.1	97.7	138
36	705	59.4	84.0	119	168
37	1105	74.3	105	149	210
38	1643	90.6	128	181	256
39	2915	121	171	241	341
40	4610	152	215	304	429

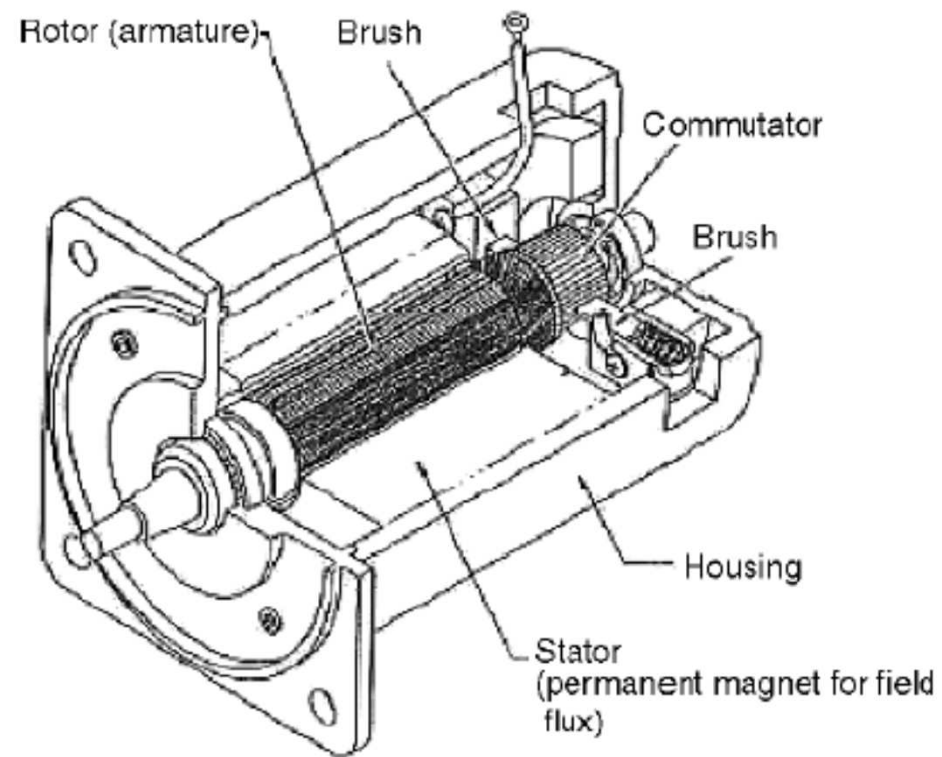
HEAT SINK: For proper heat dissipation, body of solenoid should be mounted on an equivalent of 4.0" x 4.0" x 1/8" aluminum plate in an unrestricted flow of air.

Oblik čela kotve bitno utiče na promjenu reluktanse tokom njenog kretanja –tako utiče i na karakteristiku *Sila -hod*

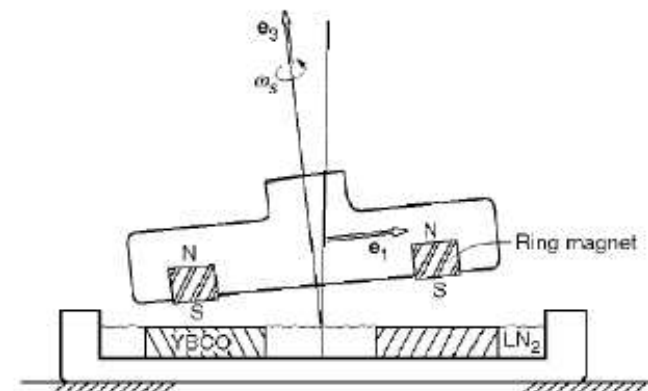
$$F = \frac{(N \cdot I)^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot g^2} \approx \frac{I^2}{g^2}$$



Elektromagnetski-elektromotori



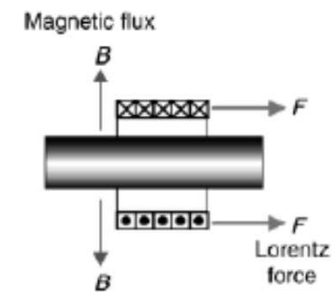
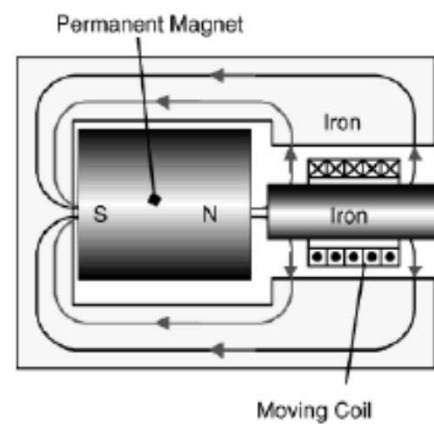
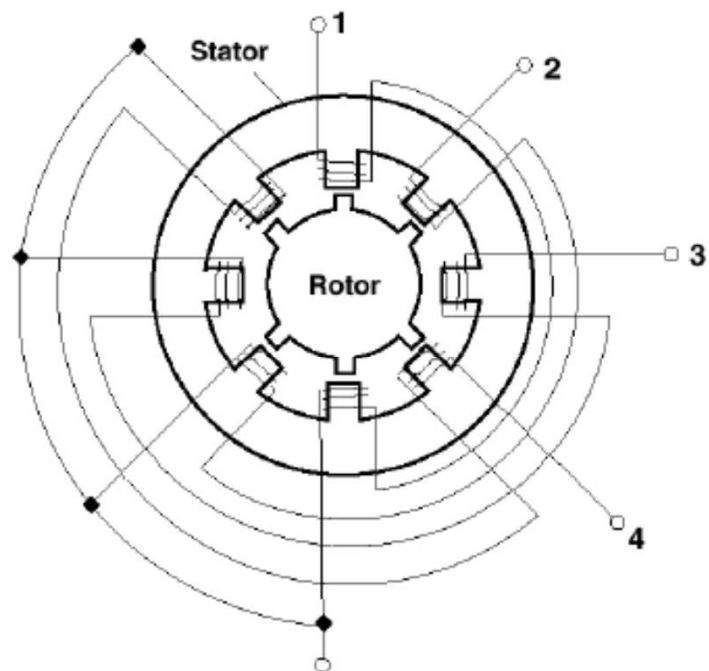
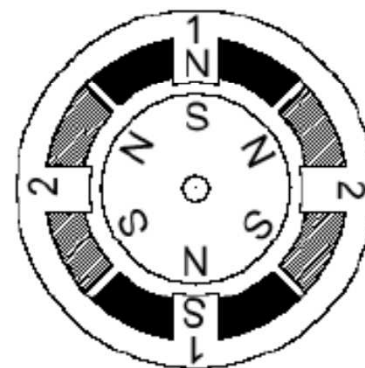
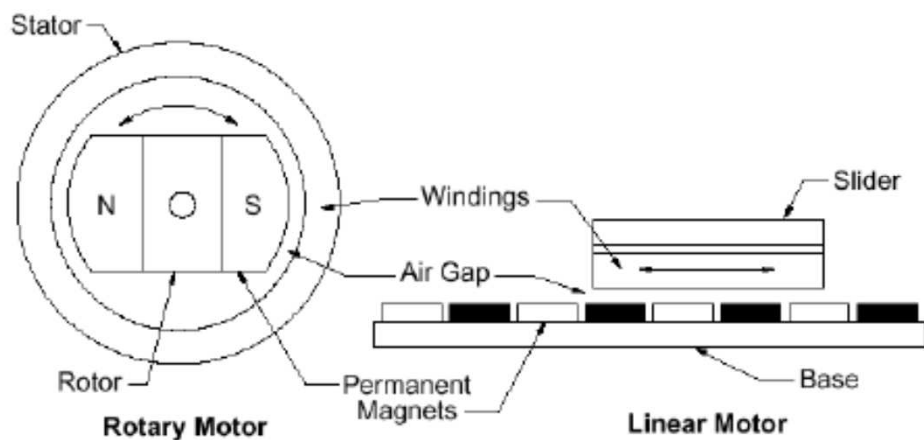
Linearni elektromotori



Linearni elektromotori



Linearni i step-motori



Ulazna energija: električna

Molekularne sile

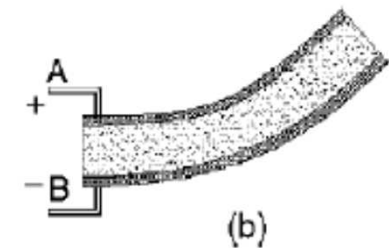
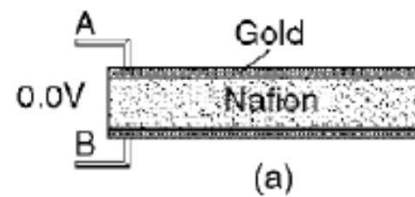
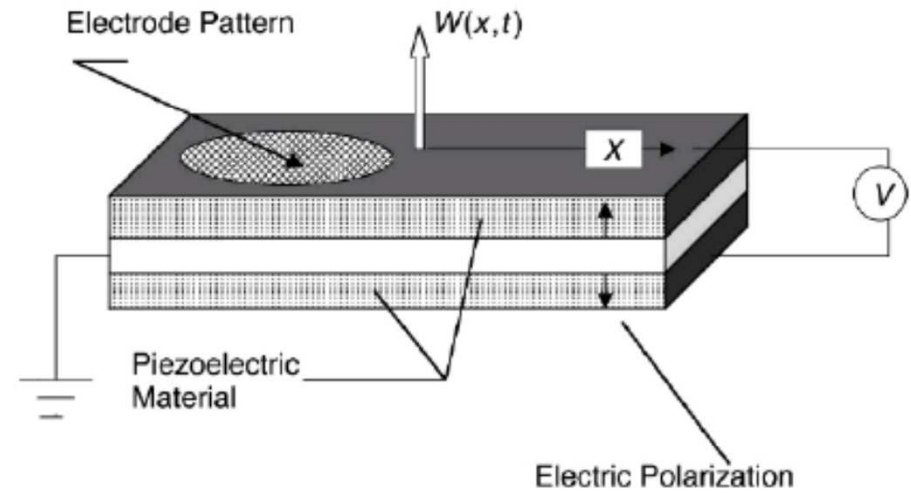
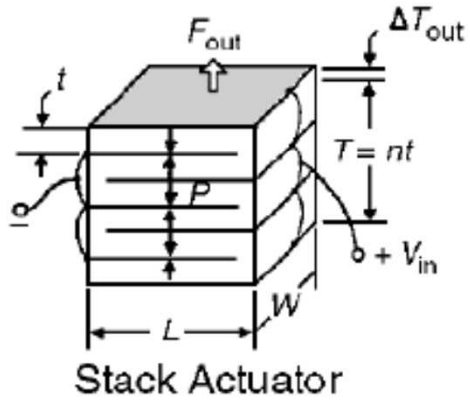
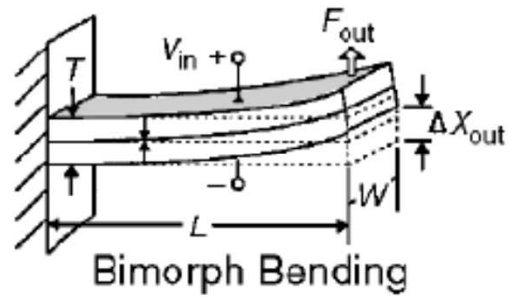
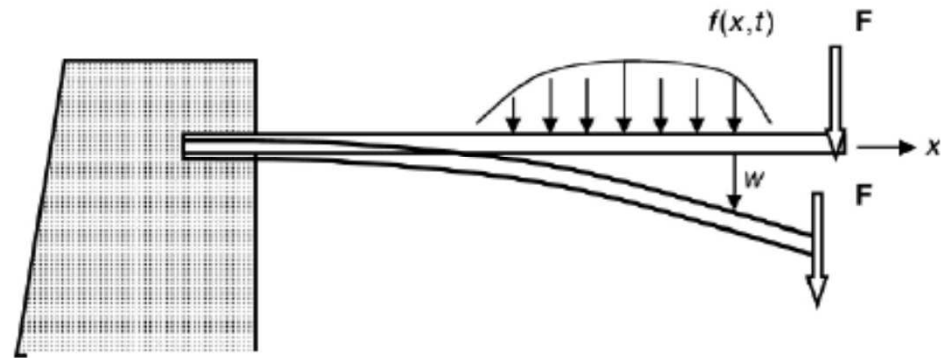
PIEZOELEKTRIČNI AKTUATOR



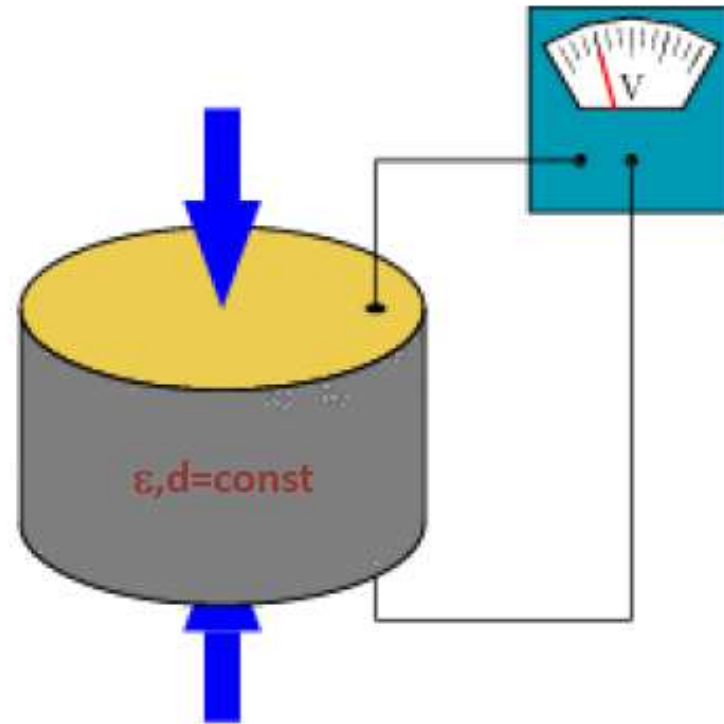
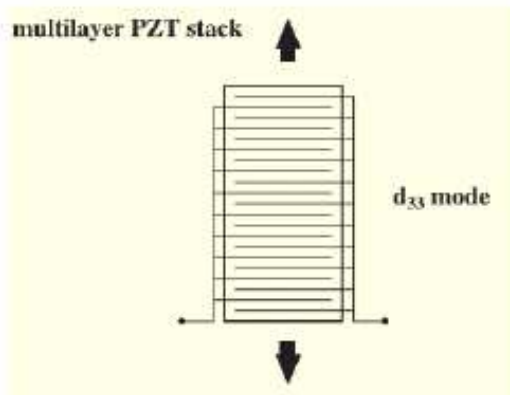
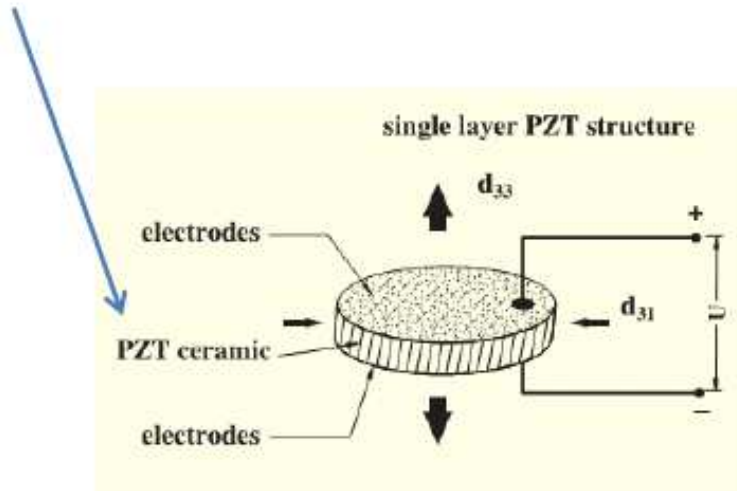
Stog piezo aktuatora



Piezelektrični-Bimorph



PZT (Pb) (Zr) (Ti)



$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d \cdot F}{\epsilon \cdot A} \cdot L = \frac{d}{\epsilon} \cdot \frac{L}{A} \cdot F$$

gdje je d piezoelektricni modul (karakteristika materijala – tipicno reda velicine 10^{-10} m/V – zavisi od pravca djelovanja) a^{50}
 C elektricni kapacitet [F]

PSt-HD 200/7x7/45, bare stack

Technical data:

Max. voltage range : (-) 50 V / (+)200V

Length L : 32.5 mm

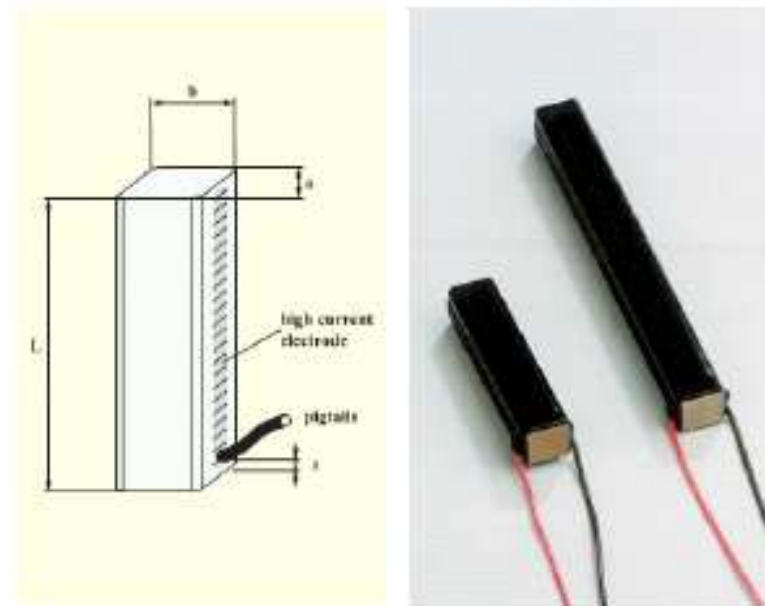
Strokes	-50V/200V	0V/200 V	0V/150V
(μm)	65 μm	45 μm	35 μm
Block. force	1800	1400	1100

Max. load : approx. 2800 Newtons

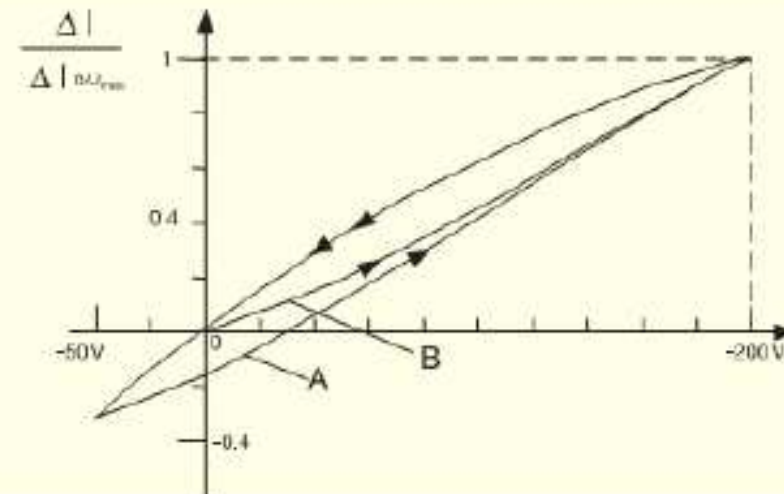
Stiffness : 33 N/ μm

El. capacitance : 4.5 μF effective for 0V/200V step

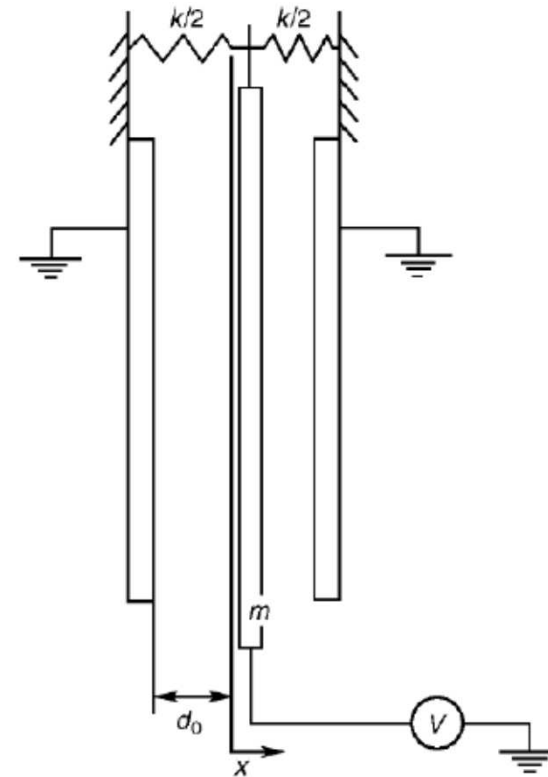
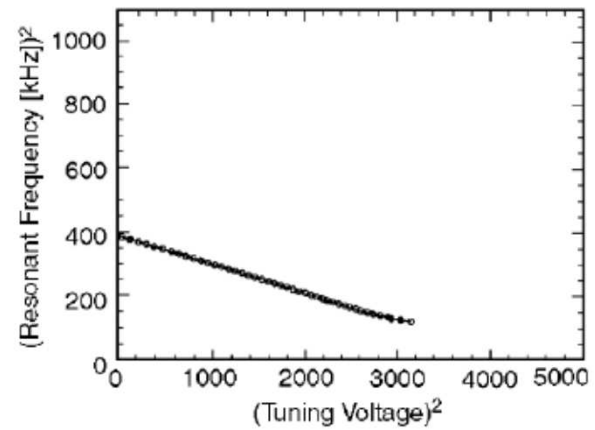
Resonance frequency : approx. 40 kHz



The new PSt-HD200 low voltage actuators are a spin-off of the novel fuel injection piezo actuators used together with the top modern Common Rail Systems in automotive cars and light trucks. They are operated there with 80 μsec rise-/fall-times with repetition rates up to 200 Hz. Because the actuators are located near the hot engine, a high temperature resistance is a must.

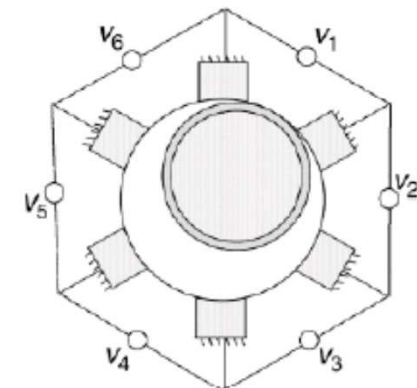
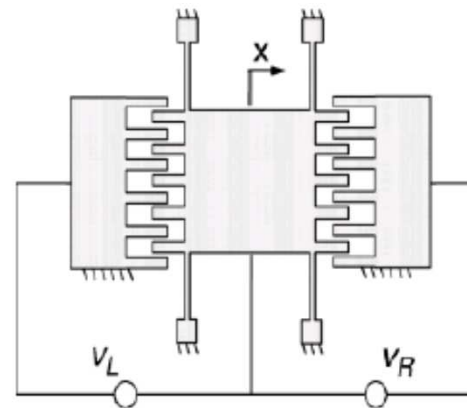
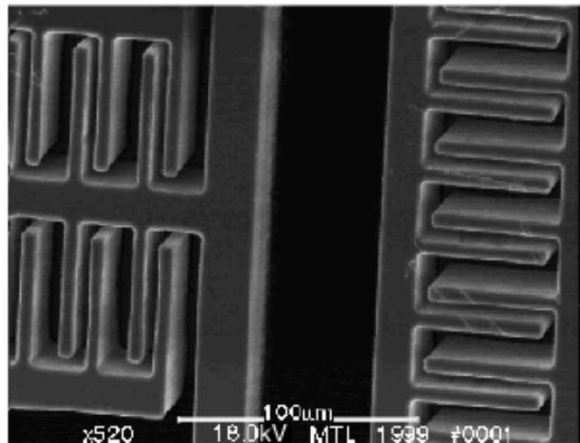
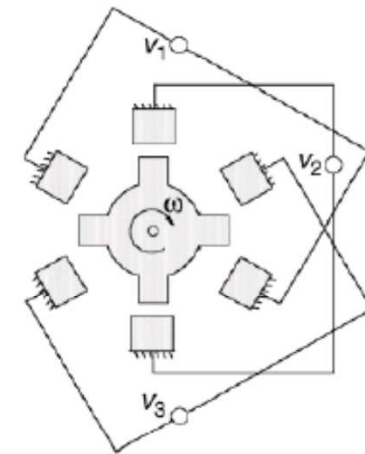
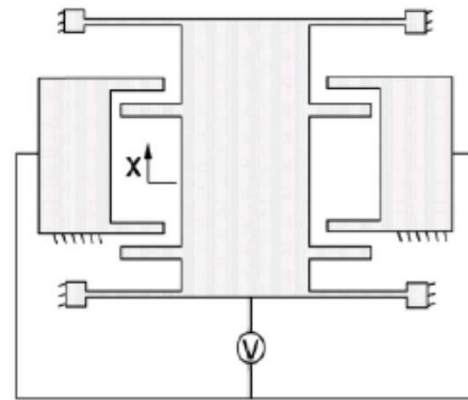
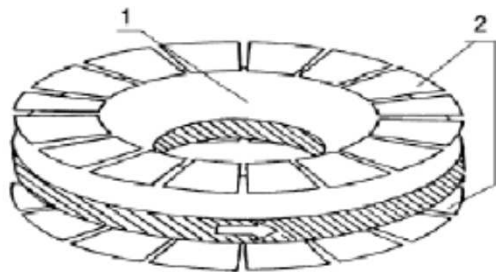


Elektrostaticki - zvučnici



Elektrostatički - motori

$$F = \frac{Q_1 Q_2 r}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (\text{newtons})$$



Ulazna energija: Hemijska Elektrolitičke sile

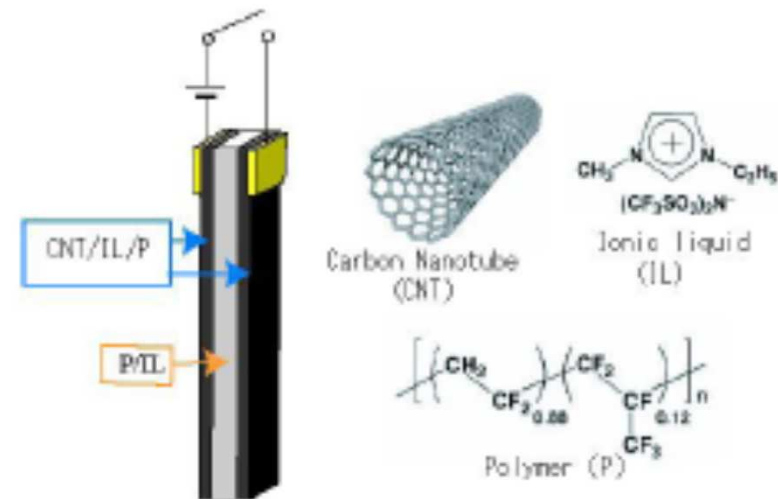
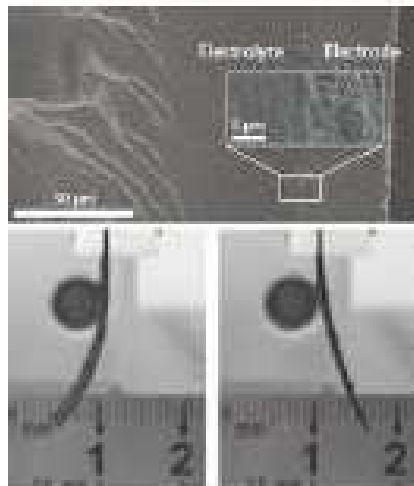


Fig. Schematic diagram of polymer actuator based on BN/IL set electrode.

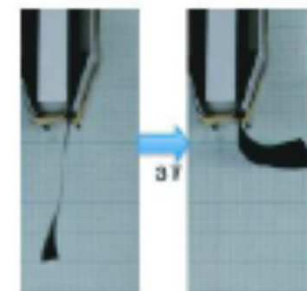
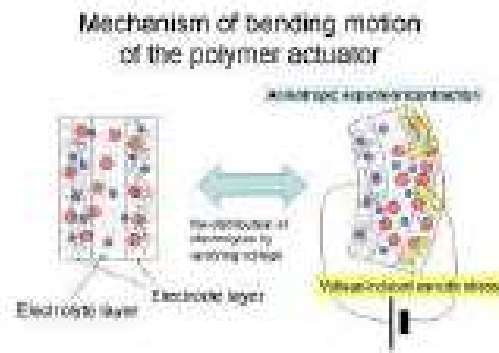


Fig. Photograph of the bending action of the BN polymer actuator driven by 3 V applied voltage.

Pneumatski aktuatori

- Pneumatski aktuatori koriste pritisak vazduha za pokretanje komponenti.
- Visoki iznosi sila i mali pomaci

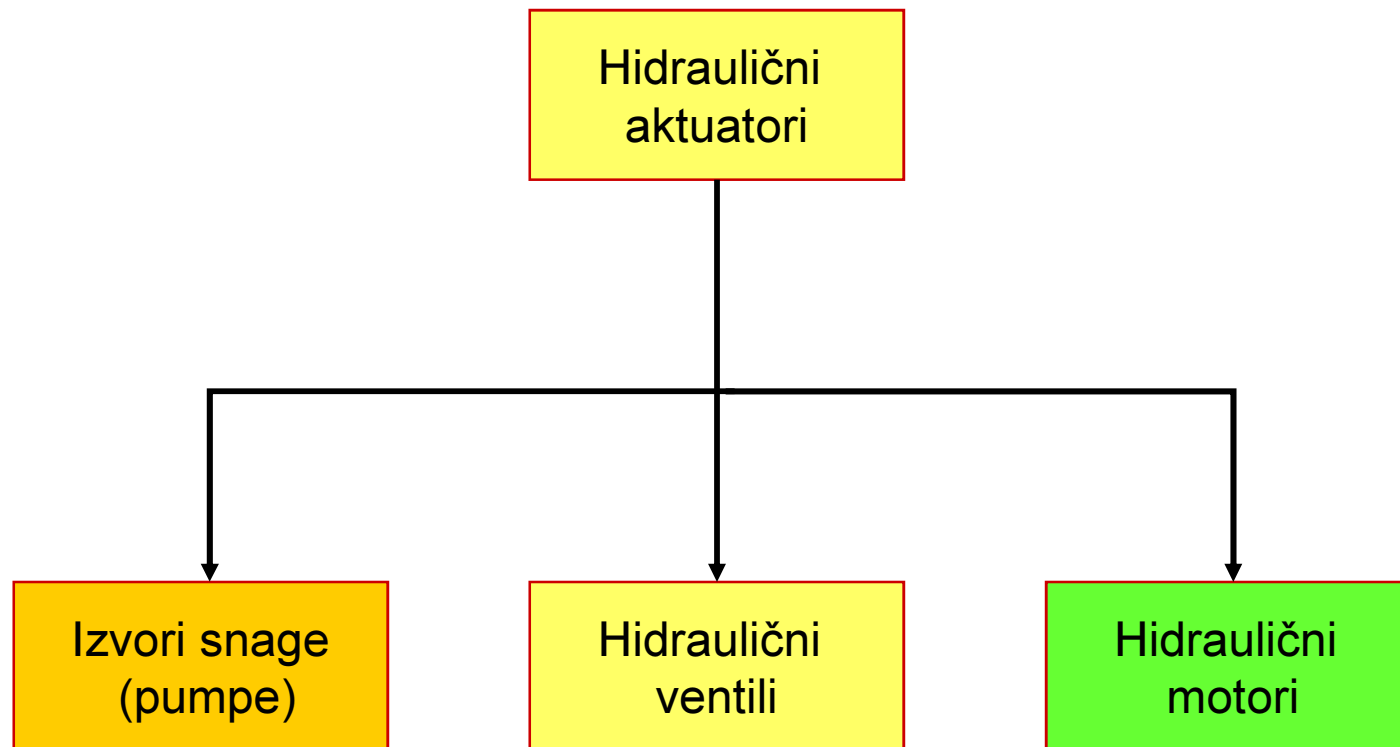


Pneumatski leptirasti ventil



Pneumatski cilindri

Podjela hidrauličnih aktuatora

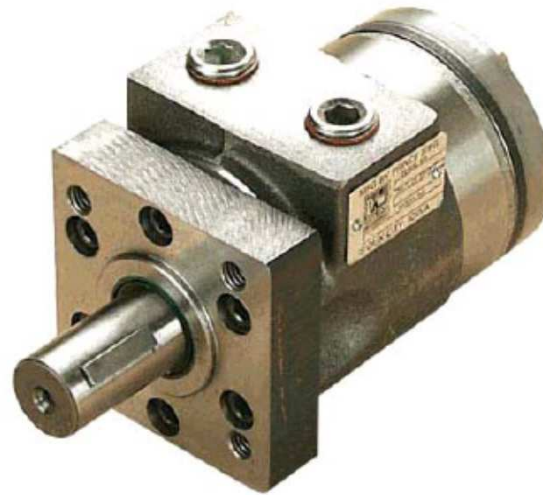


Hidraulični akuatori

- Hidraulični akuatori koriste pritisak tečnosti za pokretanje komponenti.
- Pogodni za generisanje velikih sila i srednjih pomjeraja.



Hidraulički cilindar



Hidraulički motor



Hidraulička disk kočnica

Hidraulični klip

Dinamički model:

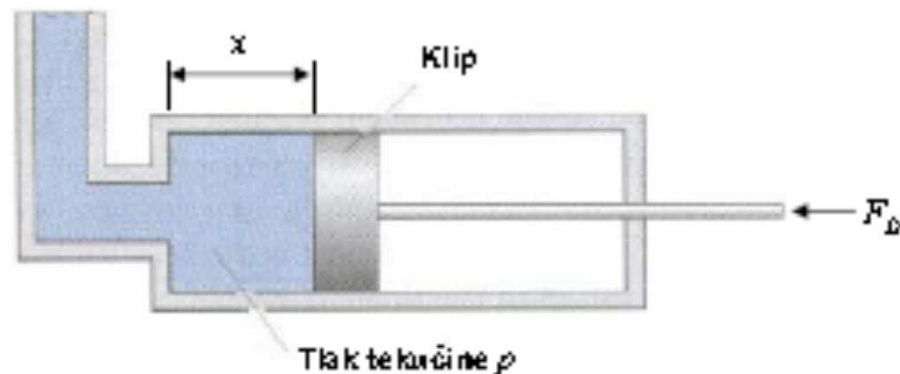
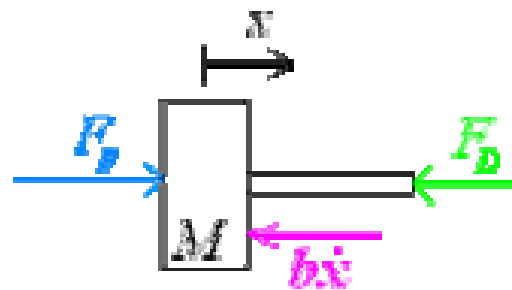
$$F_p - F_D - b\dot{x} = M\ddot{x}$$

gdje je

$$F_p = p \times \frac{\pi D^2}{4}$$

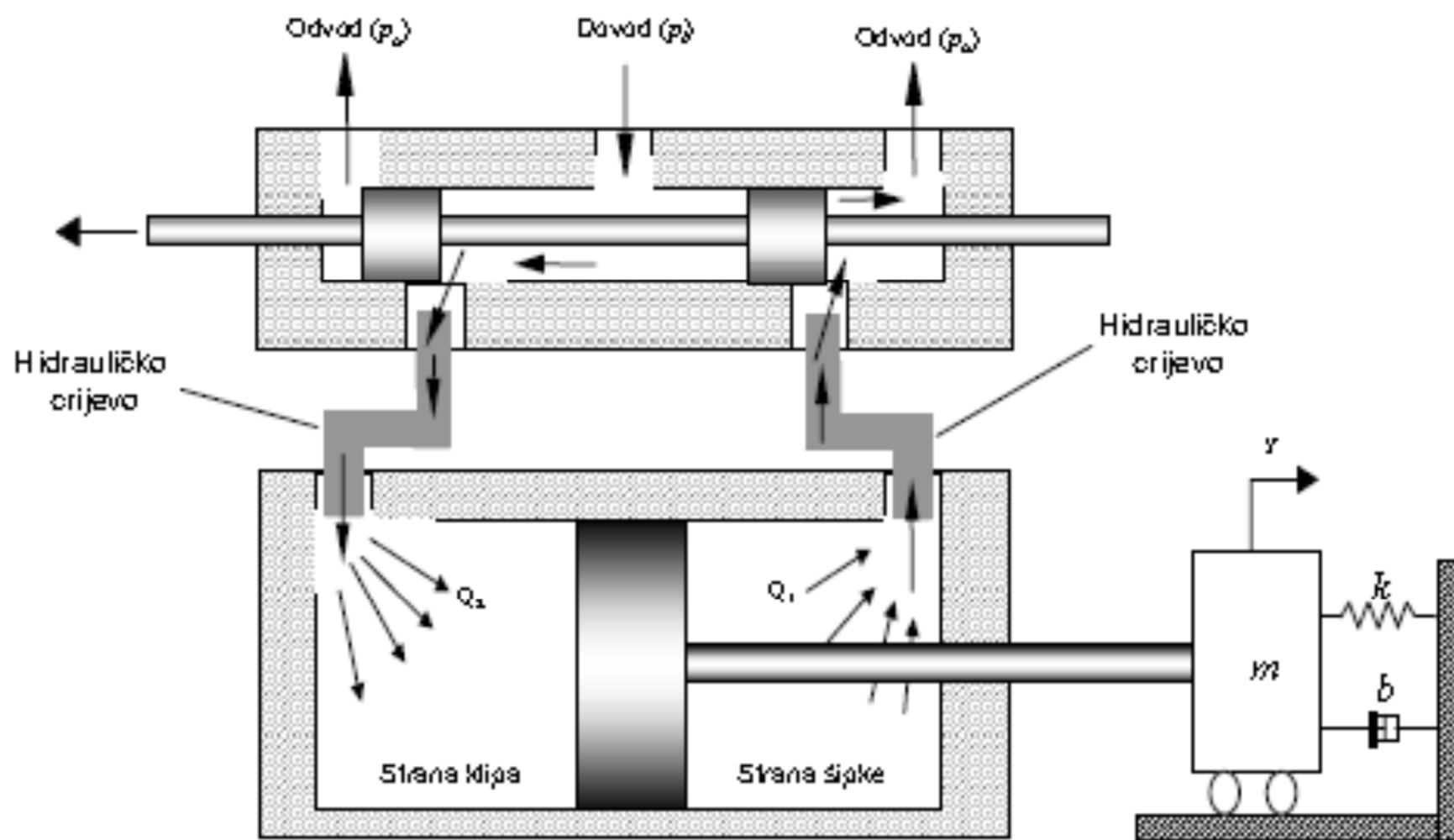
Slijedi:

$$M\ddot{x} + b\dot{x} = \frac{\pi D^2}{4} p - F_D$$

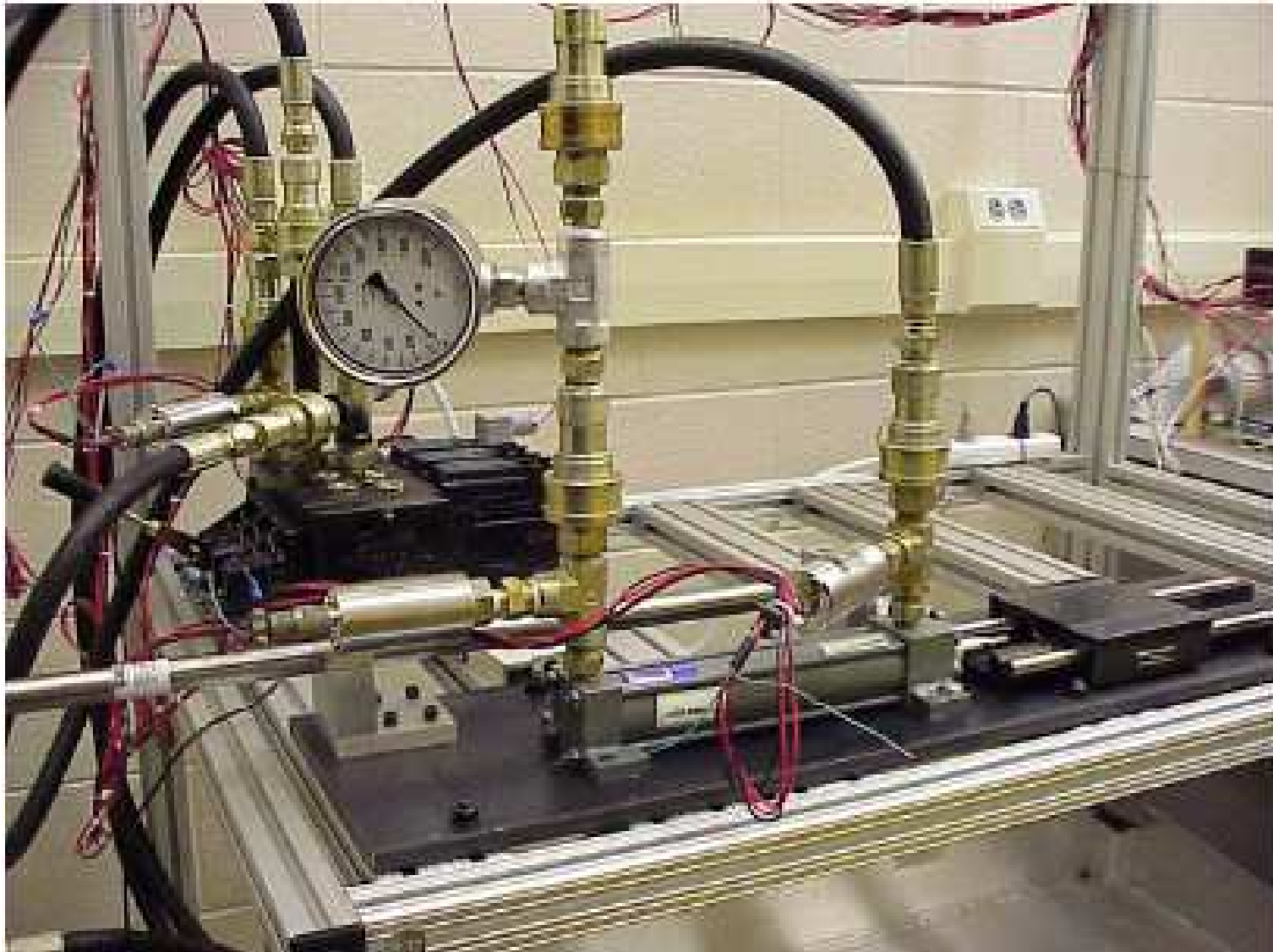


Hidraulični ventil

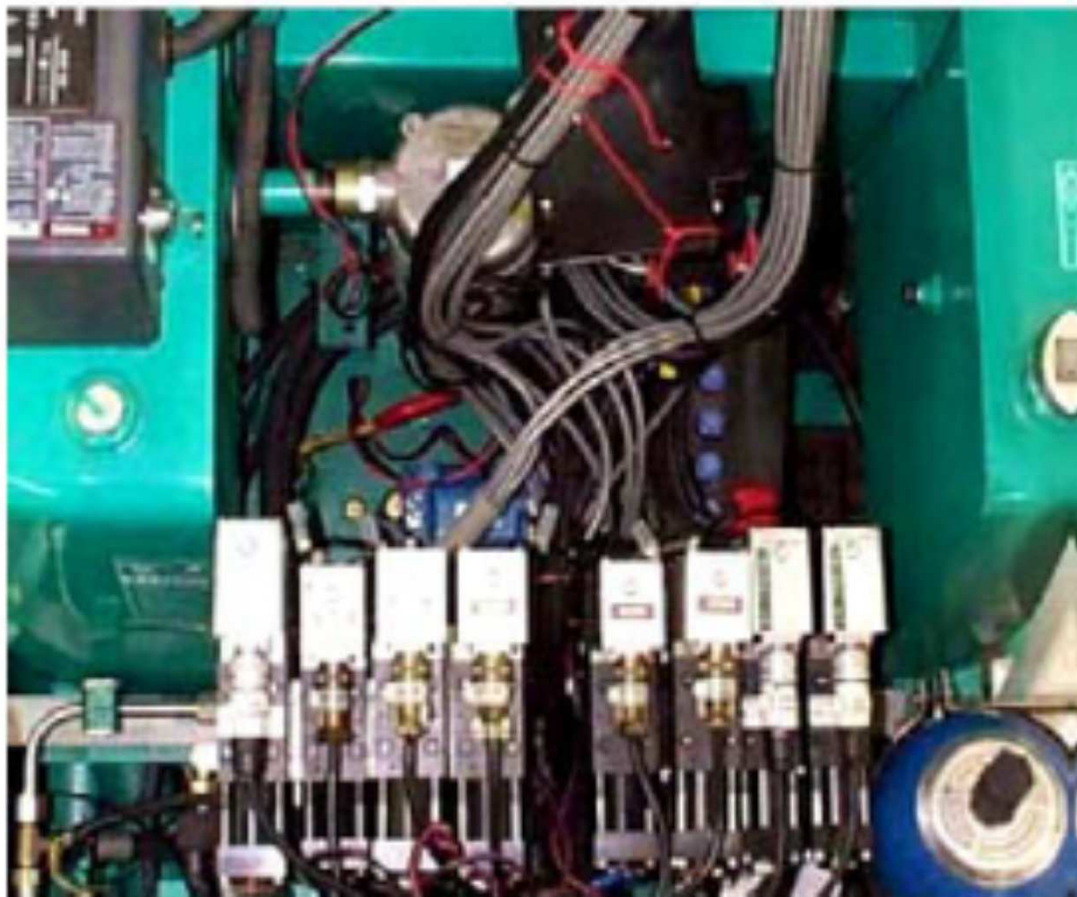
- Upravljaju protokom ulja od izvora energije (pumpe) do potrošača (motora).
- Karakteristične vrijednosti kod hidrauličkog ventila:
 - nazivni pritisak - do 40 MPa (maksimalni trajni pritisak, koji još omogućava besprijekorni rad),
 - nazivni promjer - 4 – 63 mm (unutrašnji promjer priključnog voda - maksimalno dozvoljena protočna količina),
 - način napajanja- ugradnja u cjevovod, baterijsko ili pločasto ulančenje.



Hidraulični sistem upravljanja



Primjer elektro-hidrauličnog sistema



Piezoelektrični aktuatori

- Piezoelektrični aktuatori koriste elektrostatički pritisak kristala za pomjeraj komponenti.
- Pogodni su za srednje sile i male pomjeraje.



Piezo aktuatori



Ultrasonični piezo motor



Glava printera

Termalni aktuatori

Koriste toplotu za pomjeraj komponenti

Pogodni za primjene u kojima su potrebne male sile i mali pomjeraji



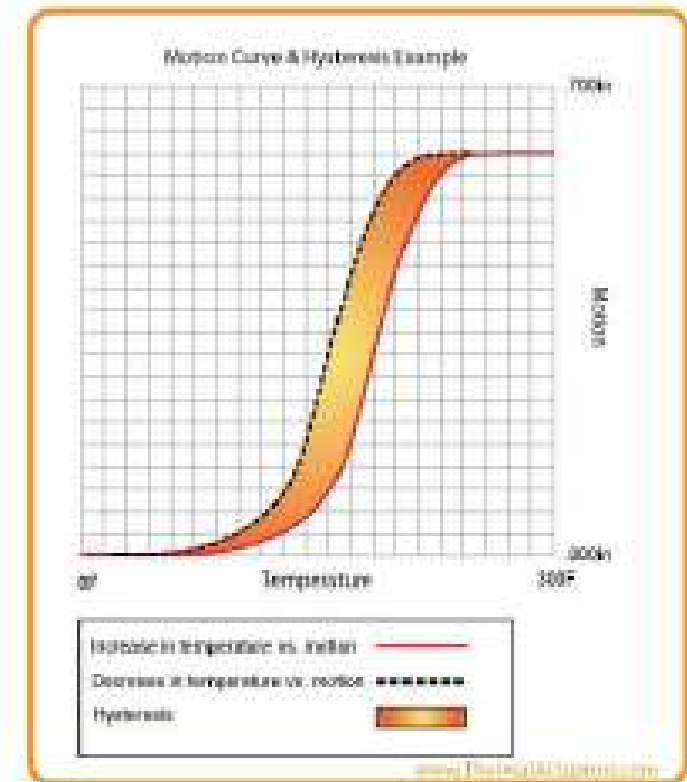
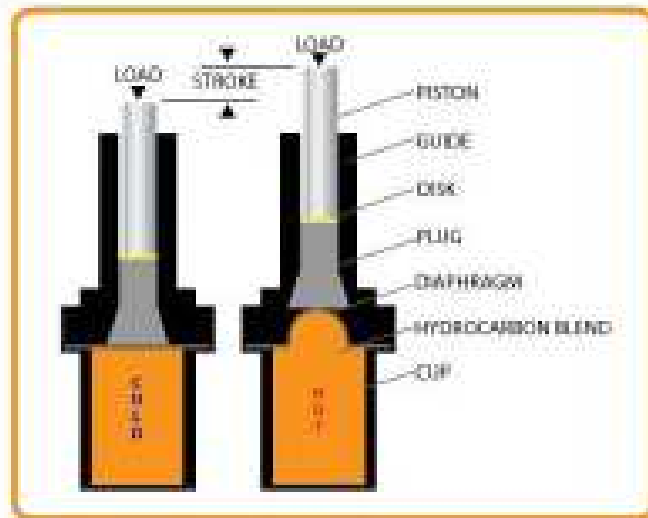
Termometri



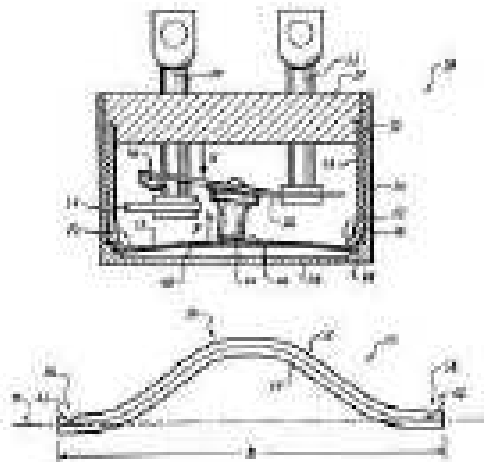
Glava ink-jet printera

ULAZNA ENERGIJA TOPLOTNA SILE TOPLOTNE EKSPANZIJA

Toplinski akuator



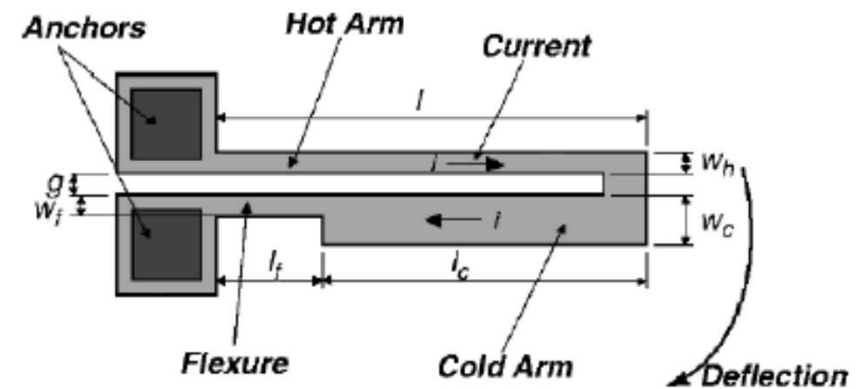
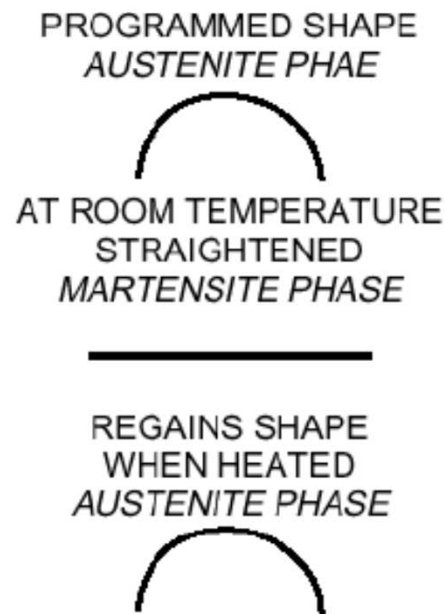
ULAZNA ENERGIJA TOPLOTNA SILE TOPLOTNE EKSPANZIJA BIMETALNI AKTUATOR



Ostalo-Nitinol i Termalni aktuatori

TABLE 8.4 Comparative Properties of EAPs, Shape Memory Alloy, and Piezoceramic Actuators

Characteristic Property	EAP	Shape Memory Alloy	Piezoelectric Ceramics
Achievable strain	more than 10%	up to 8%	up to 0.3%
Young's modulus (GPa)	0.114 (wet)	75	89
Tensile strength (MPa)	34 (wet)	850	76
Response time	msec-min	sec-min	μ sec-sec
Mass density (g/cm^3)	2.0	6.5	7.5
Actuation voltage	1-10 V	N/A	50-1000 V





Android facial expressions (photographed at JPL)
 Courtesy of David Hanson, U. of Texas at Dallas

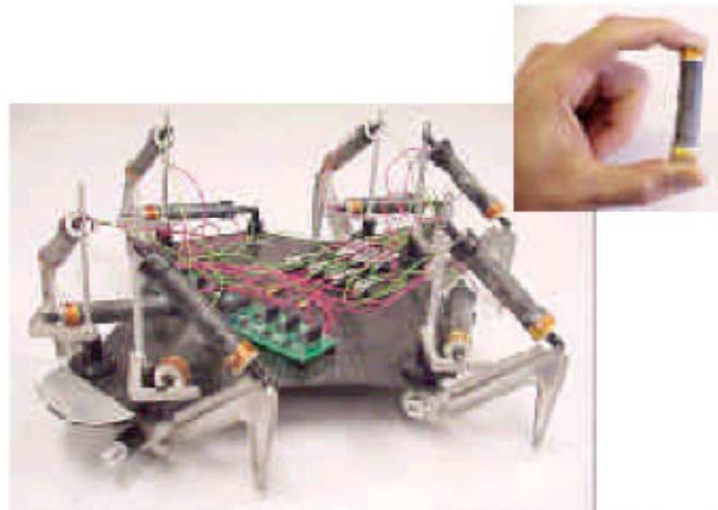
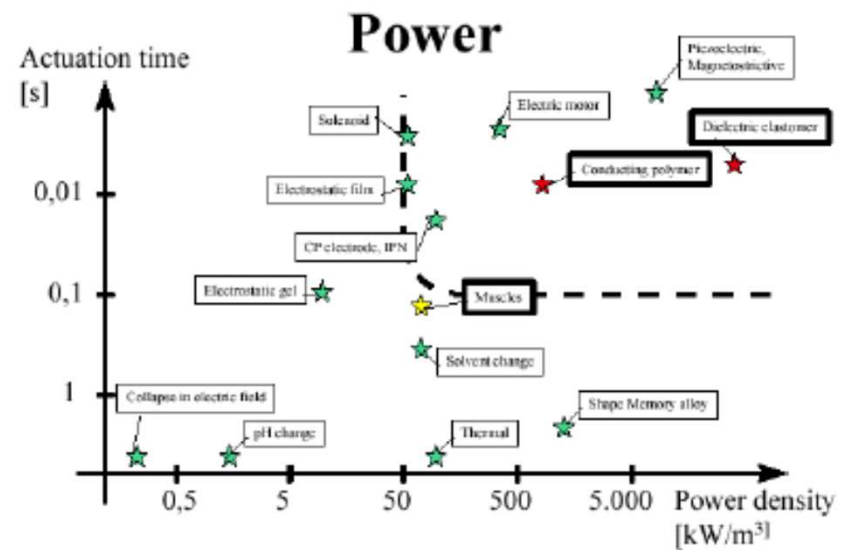
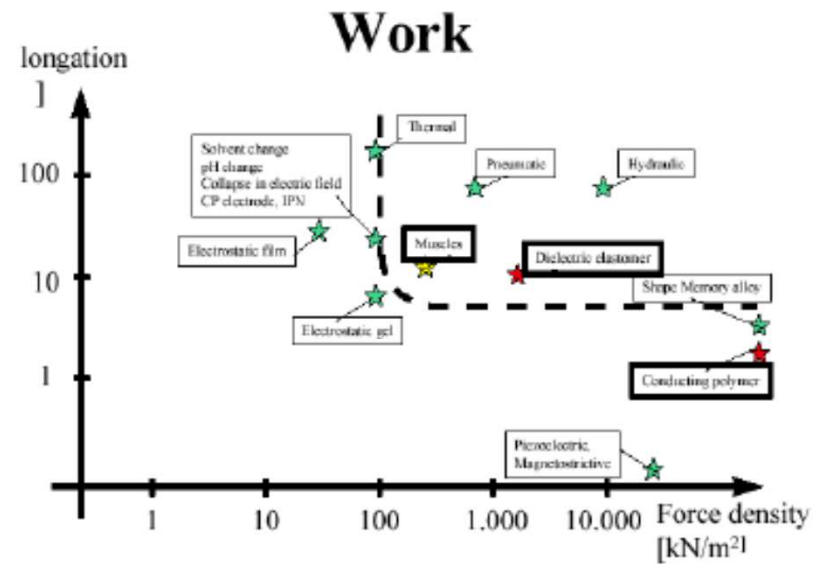
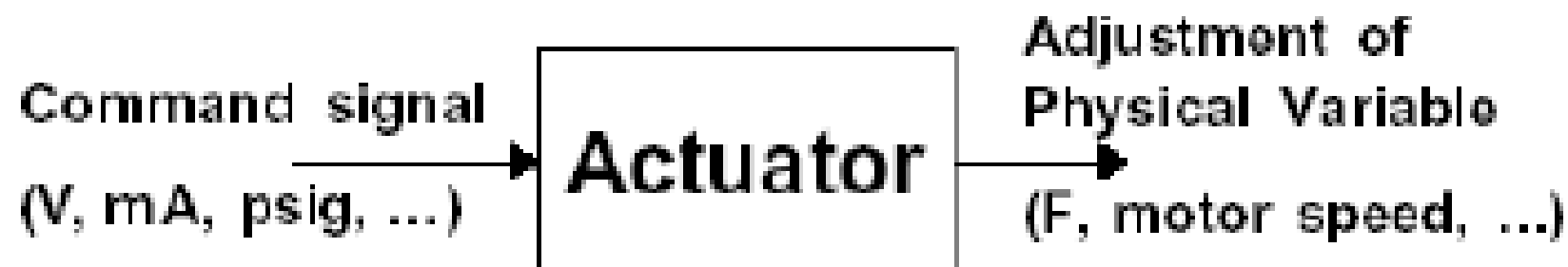


Fig. 7. Insect-like walking robot that incorporates dielectric elastomer artificial muscles (insert); adapted from Kornbluh et al. [41].



Šta je aktuator

- Aktuator konvertuje vrednost upravljačke veličine sa izlaza regulatora u fizičko dejstvo na neku podešljivu procesnu promenljivu



Aktuator

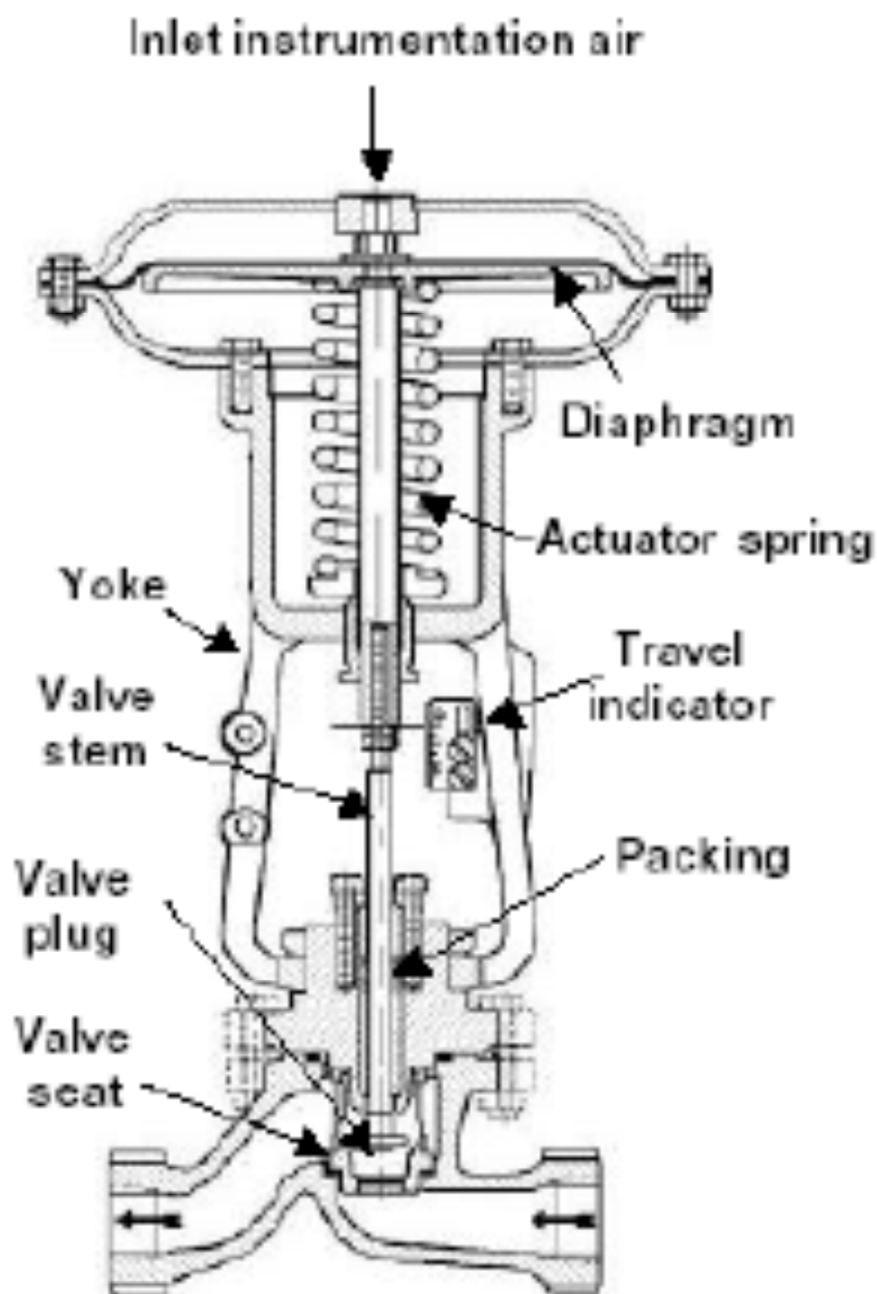
- Konvertuje standardne industrijske signale u akciju kao što je otvaranje ventila, nivo snage, pomeraj itd.
- Energija za pokretanje aktuatora:
 - Pneumatska: jednostavno, jeftino, brzo, mali momenat, histerezis
 - Električna: motor i reduktor, velik moment, spor
 - Hidraulična: velik moment, brz, skup

Primeri tipovi aktuatora

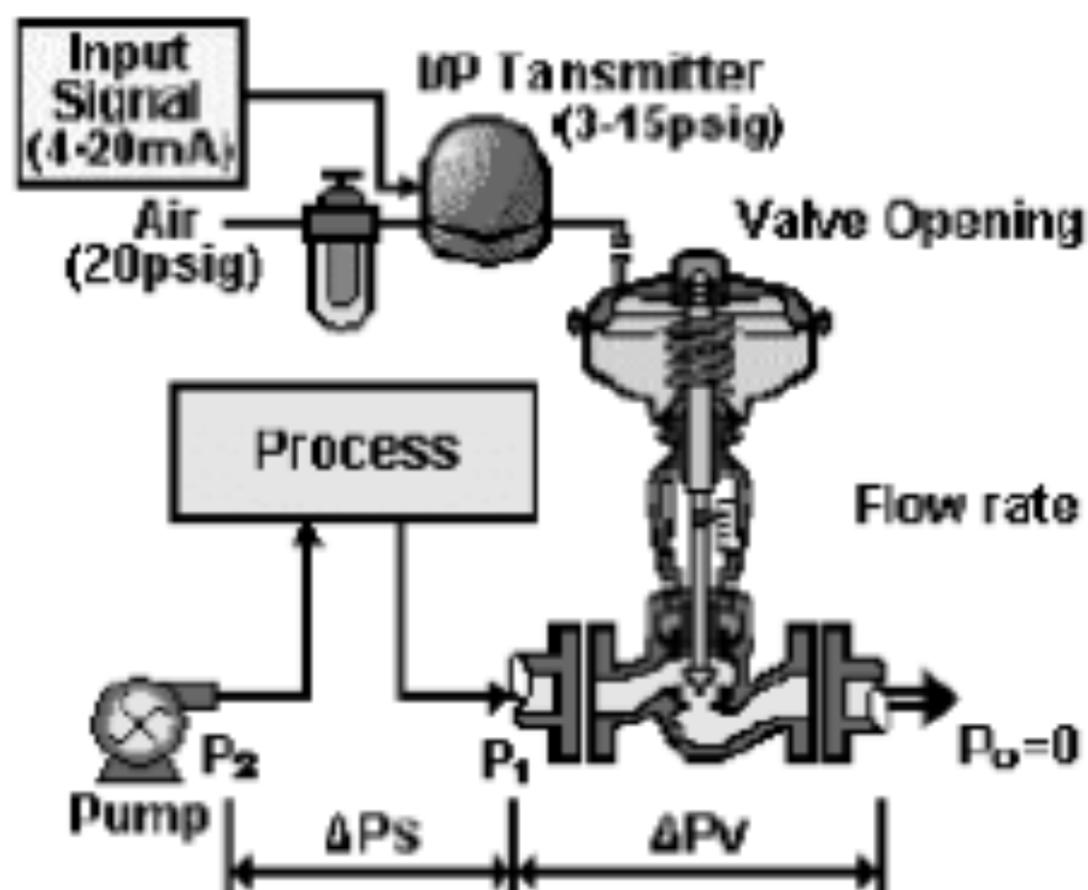
- Upravljivi ventili - aktuator
pneumatski, električni, hidraulični
- Električni grejači - aktuator tiristor
- Brzina pumpe / motora - aktuator
inverter
- Pomeranje - aktuator pneumatski,
električni ili hidraulični

Servoventil

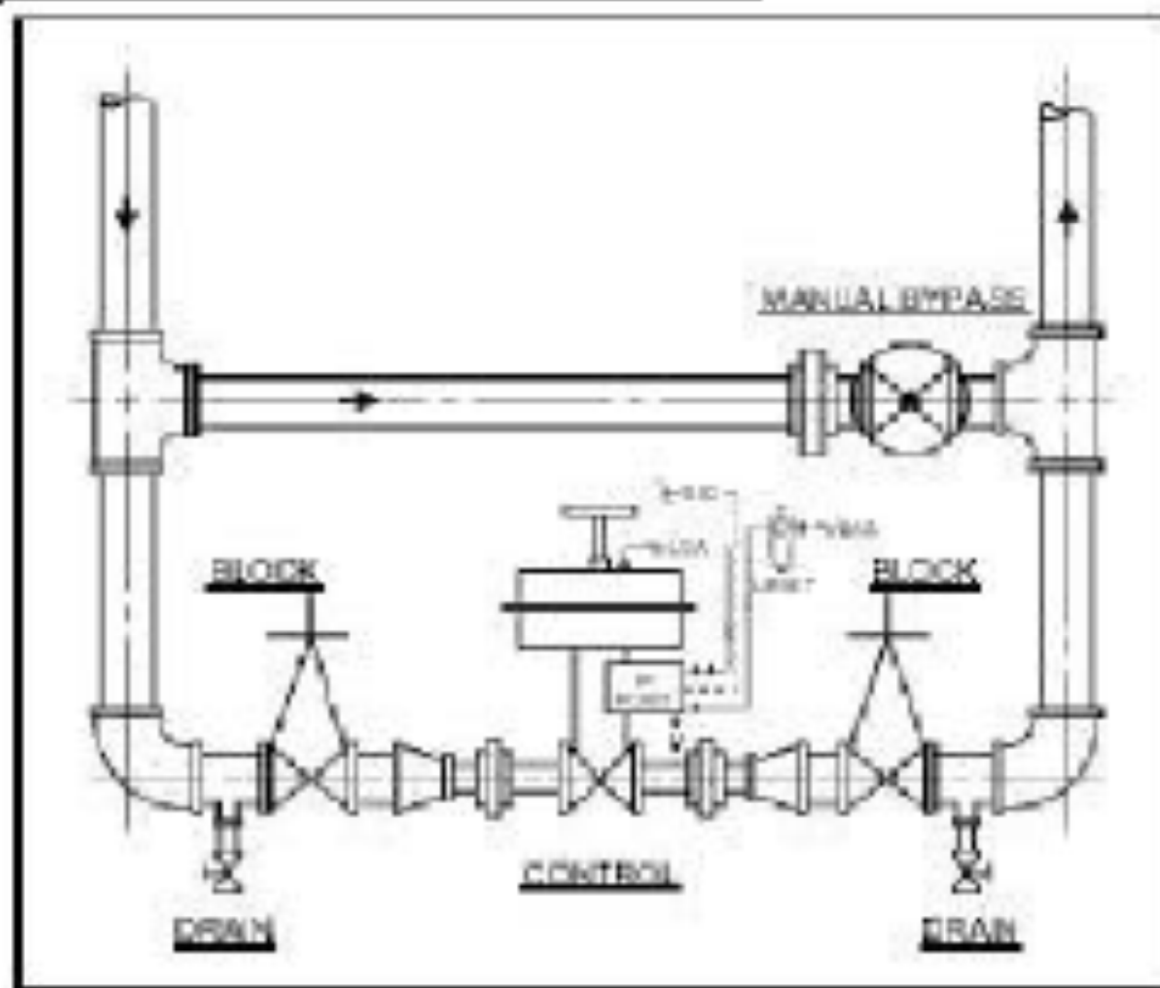
- Aktuator + ventil
 - Aktuator pneumatski
 - Električni upravljački signal se može konvertovati I/P pretvaračem
-



Upravljanje protokom



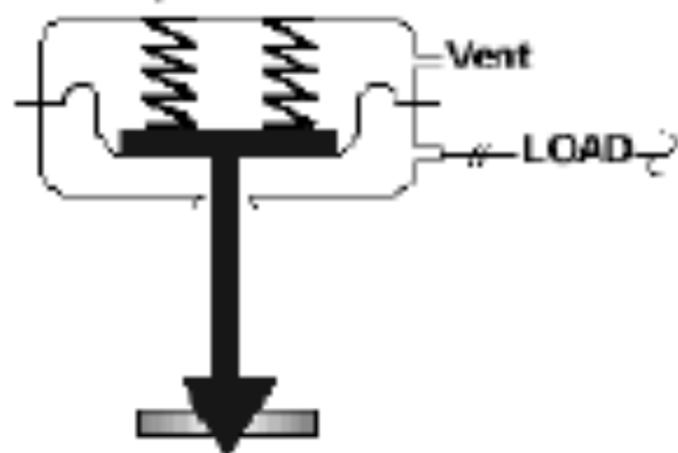
Upotreba servoventila



Normalno otvoreni i normalno zatvoreni servovalvuli

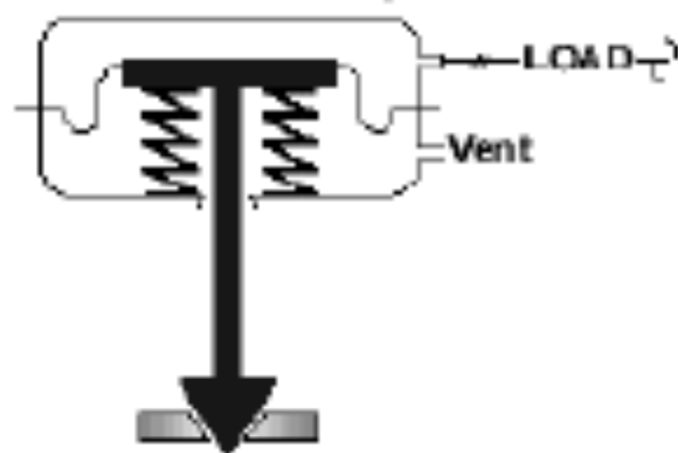
- Delovanje aktuatora može biti:
 - Pod dejstvom pritiska dolazi do otvaranja
 - Pod dejstvom pritiska dolazi do zatvaranja
 - Odabir se vrši na osnovu sigurnosnih parametara koji određuju stanje ventila u slučaju greške
 - Primeri:
 - Ventil za gorivo
 - Ventil za hlađenje nuklearnog reaktora
-

Air-To-Open / Fail Closed

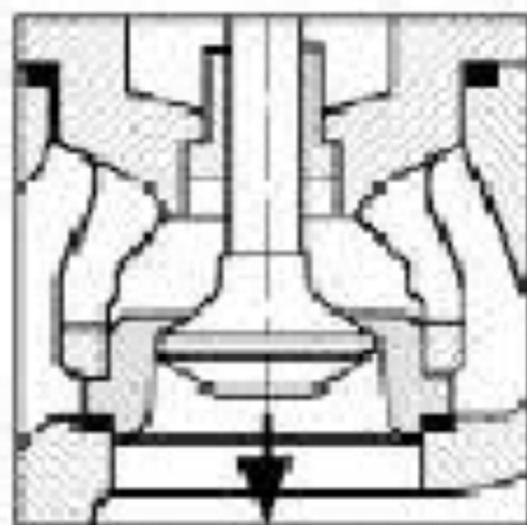


ATO-FC
(Reverse)
Stem "extends" on
loss of air pressure

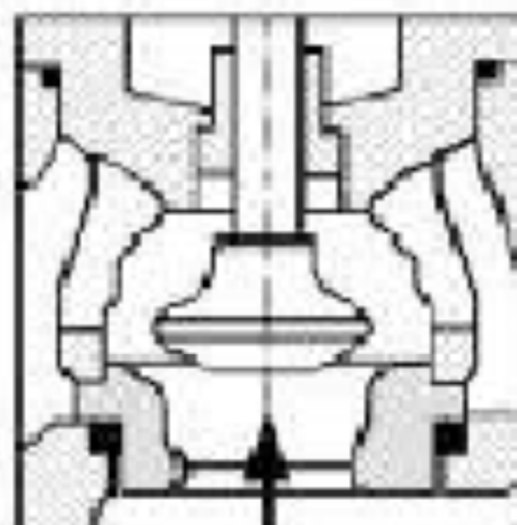
Air-To-Close / Fail Open



ATC-FO
(Direct)
Stem "retracts" on
loss of air pressure

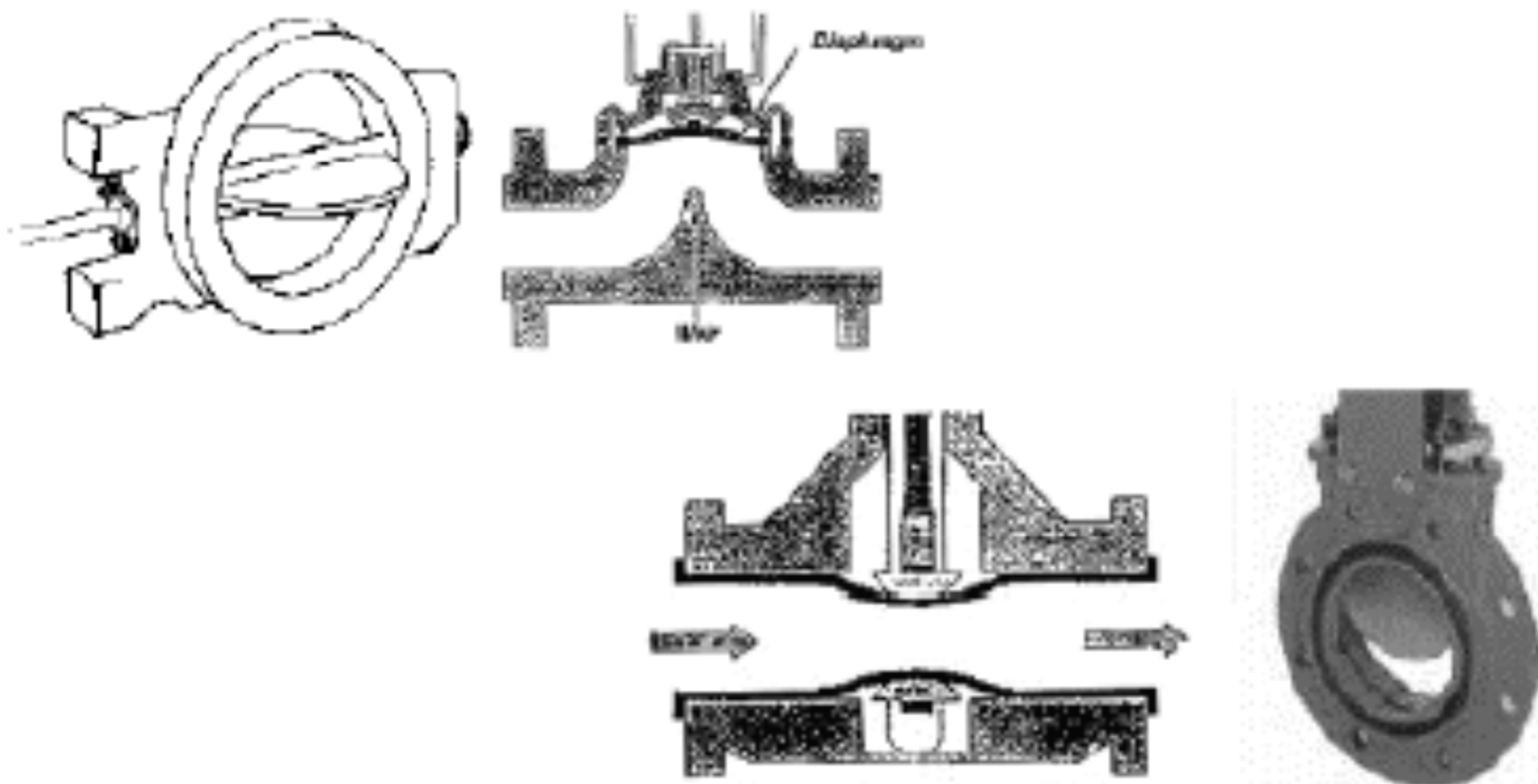


Metal Seat-Fail Close,
Air-to-Open

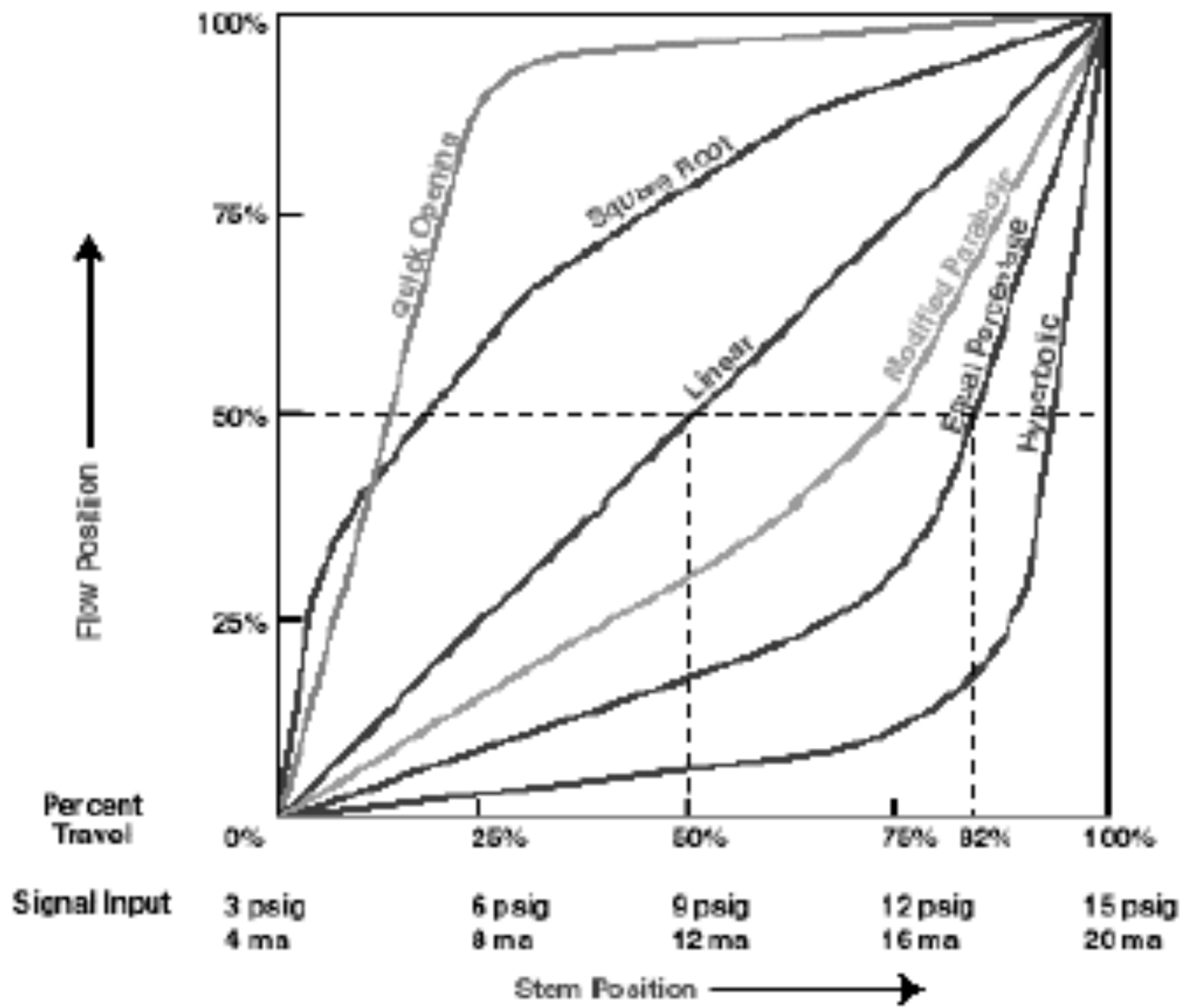


Metal Seat-Fail Open,
Air-to-Close

Primeri ventila



Karakteristike ventila



Karakteristike ventila



Aktuatori se mogu posmatrati i kao generatori sile i momenta.

$$F = F(p) \times I$$

$F(p)$ -racionalni operator

I – standardni strujni signal 4-20mA

U svim linearnim sistemima definiše se odnos ulaznog i izlaznog signala, koji zavisi od elemenata linearnog sistema. Od dvije moguće analogije u elektromehaničkim sistemima: napon - sila i napon – brzina, druga analogija se češće primjenjuje.

Mehanički otpor se može posmatrati kao odnos brzina/sila(moment)

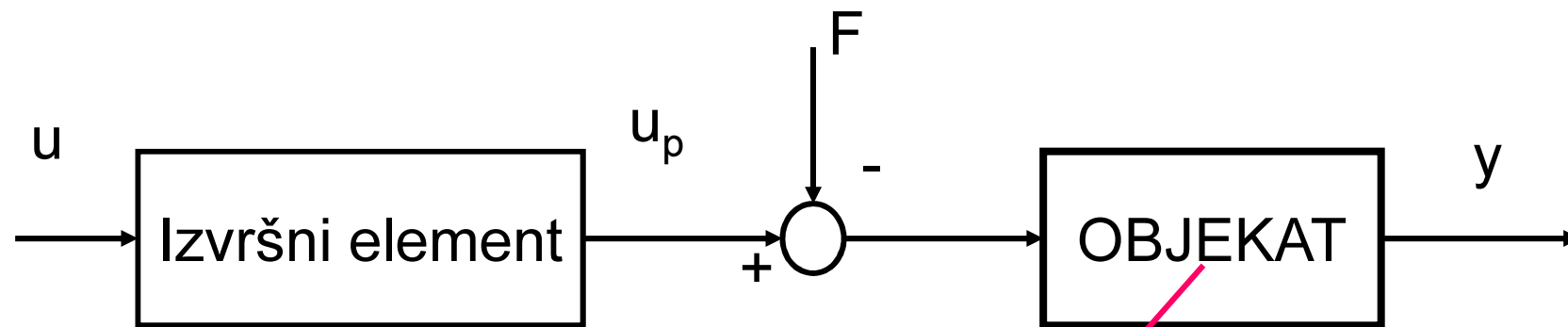
$$Z_M = \frac{\Omega_M}{C_M}$$

Ω_M maksimalna ugaona brzina

C_M obrtni moment pri ugaonoj brzini jednakoj nuli 80

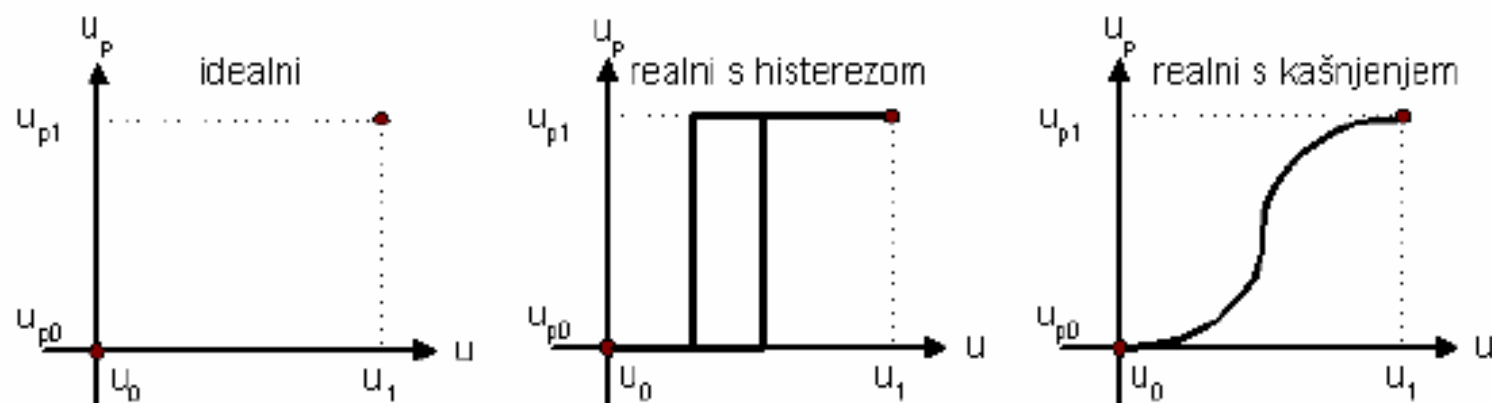
Statičke karakteristike su određene karakteristikama samog objekta upravljanja (OU)

Linearna statička karakteristika OU zahtijeva linearnu statičku karakteristiku izvršnog elementa, a nelinearna nelinearnu što je u praksi teško realizovati (npr. \cos i \arcsos).

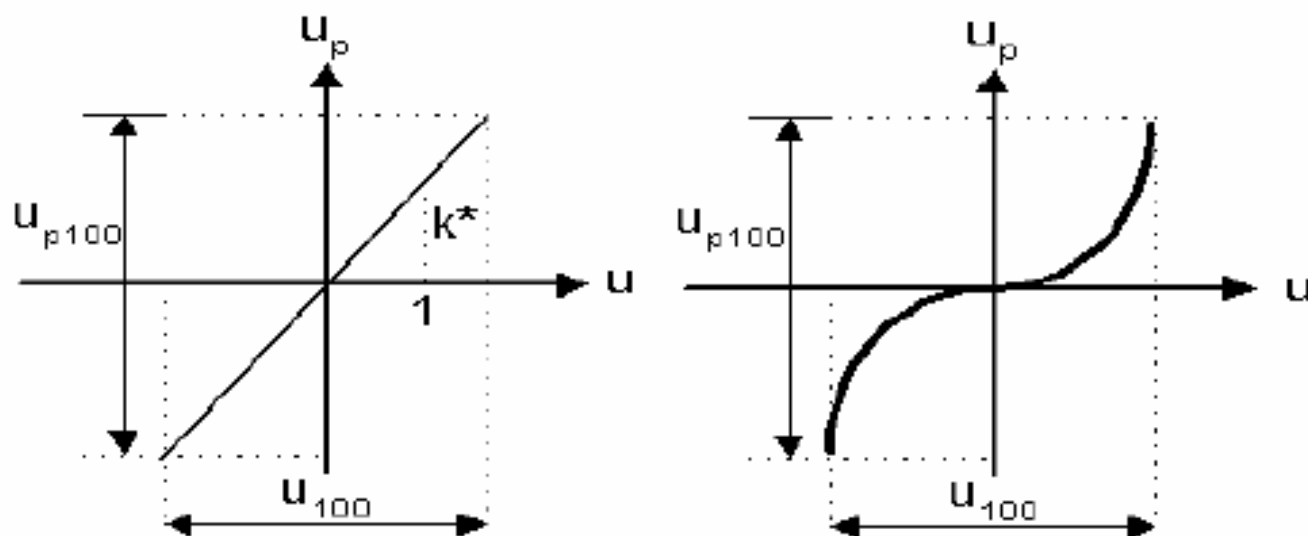


linearan ili nelinearan

● Diskretni izvršni članovi (dvopoložajni ili binarni), npr. pneumatski cilindar



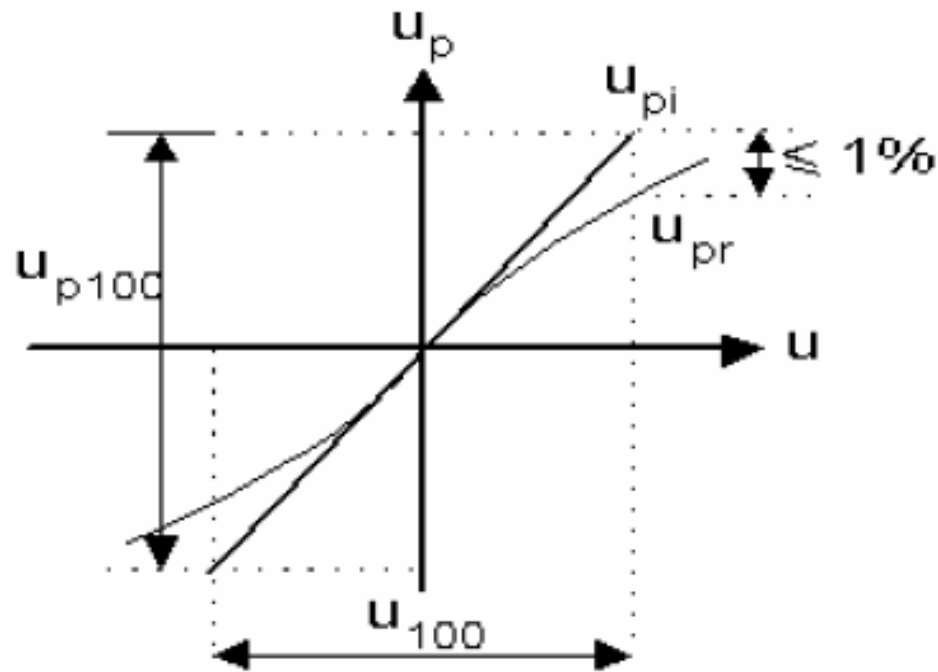
● Analogni izvršni članovi



Ako $y = ku$ i $y = k_i u_p \rightarrow u_p = k^* u$,

Ako $y = ku$ i $y = f(u_p) \rightarrow u_p = f^{-1}(u)$

Nelinearnosti u odabranoj radnoj tački moraju se nalaziti u određenim granicama



dozvoljena staticka pogreska

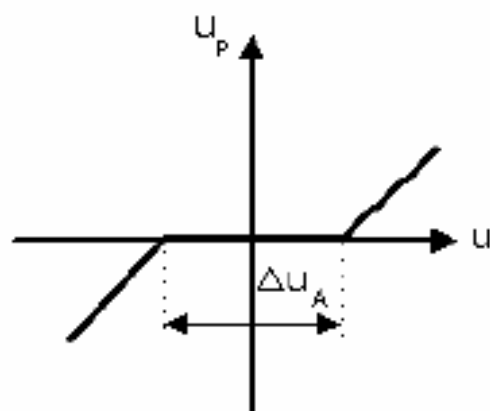
$$\frac{u_{pi} - u_{pr}}{u_{p100}} \leq 1\%$$

dozvoljena dinamička pogreska

$$\frac{\left(\frac{du_p}{du}\right) - \left(\frac{du_p}{du}\right)_0}{\left(\frac{du_p}{du}\right)_0} \leq 30\%$$

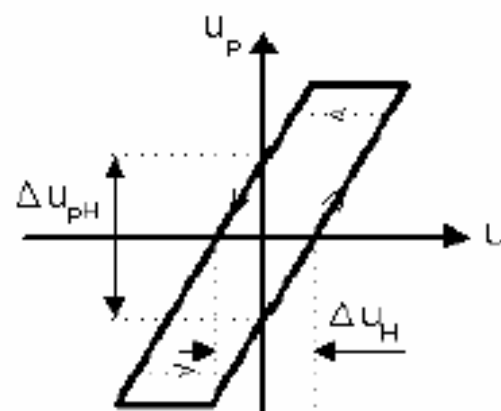
Tipični oblici nelinearnosti u izvršnim članovima i dopuštene granice

zona neosjetljivosti



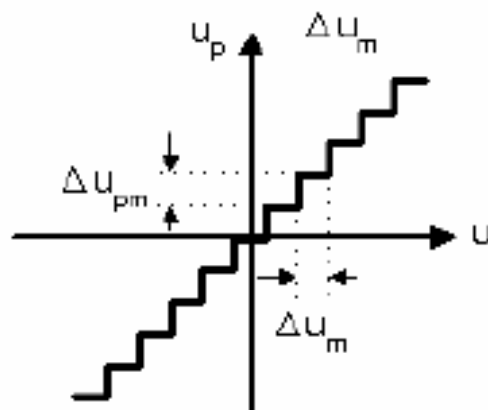
$$\frac{\Delta u_A}{\Delta u_{100}} \leq 0.1\%$$

histereza



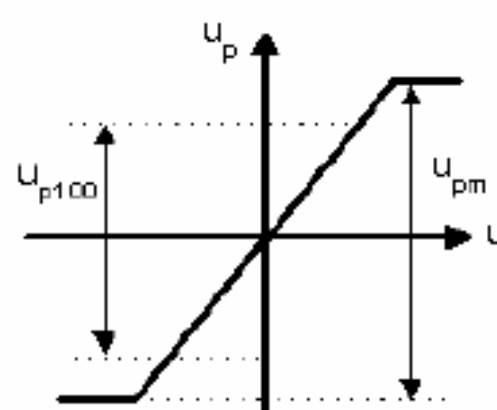
$$\frac{\Delta u_{pH}}{u_{p100}} \leq 0.5\%$$

zona diskontinuiteta



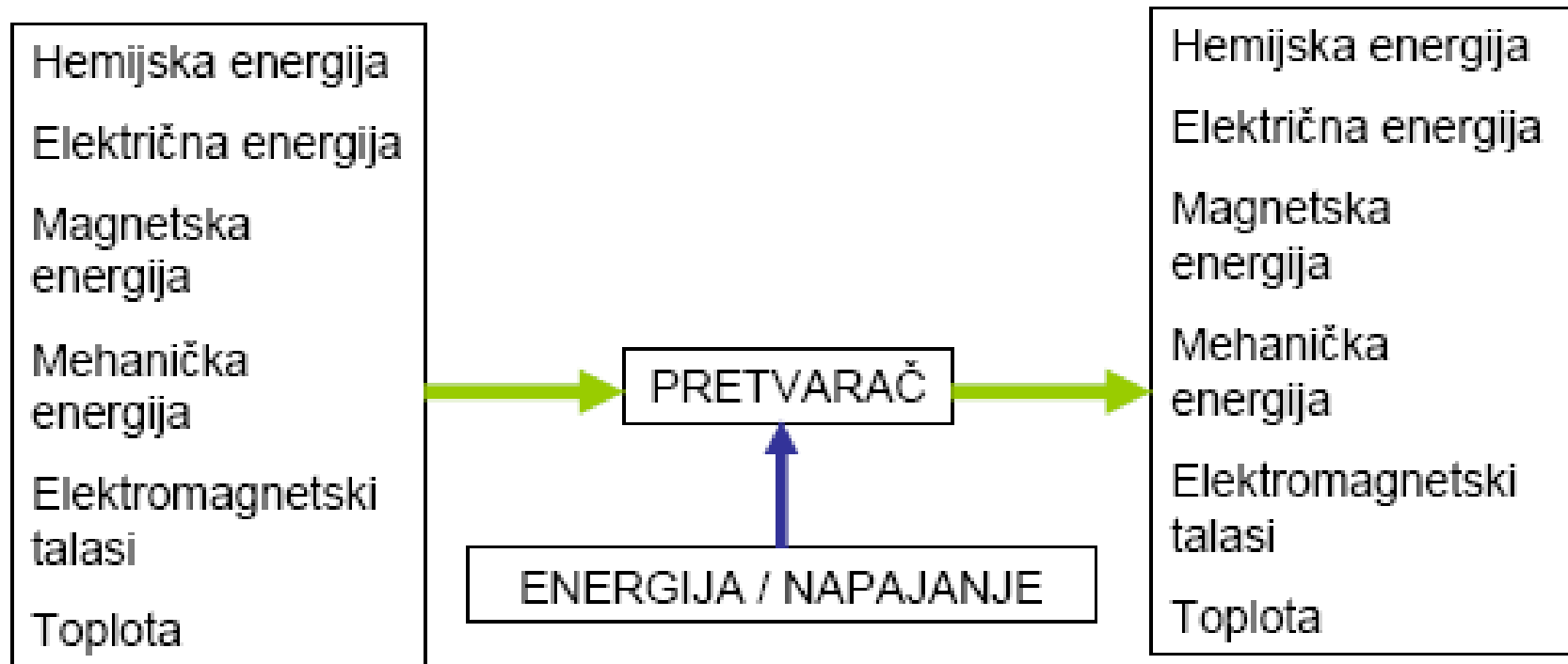
$$\frac{\Delta u_{pm}}{u_{p100}} \leq 1\%$$

ograničenje (limit)



$$u_{p100} \leq u_{pm}$$

SENZORI / AKTUATORI



IZVRŠNI MEHANIZMI

Za pokretanje tipova izvršnih organa mehaničkog ili drugog tipa koriste se razni tipovi izvršnih mehanizama. Na osnovi definicije izvršnog mehanizma kao i uvedene klasifikacije u Tabeli 1. daju se osnovne karakteristike najčešće korišćenih izvršnih mehanizama.

S obzirom na veliki broj različitih tipova aktuatora, ovdje će biti opisani samo oni tipični koji se danas sve više i češće susreću u tehničkoj praksi sistema upravljanja. Pri tome, ovi elementi SAU biće razmatrani sa upravljačke tačke gledišta a neće detaljnije biti razmatrani fizički fenomeni rada.

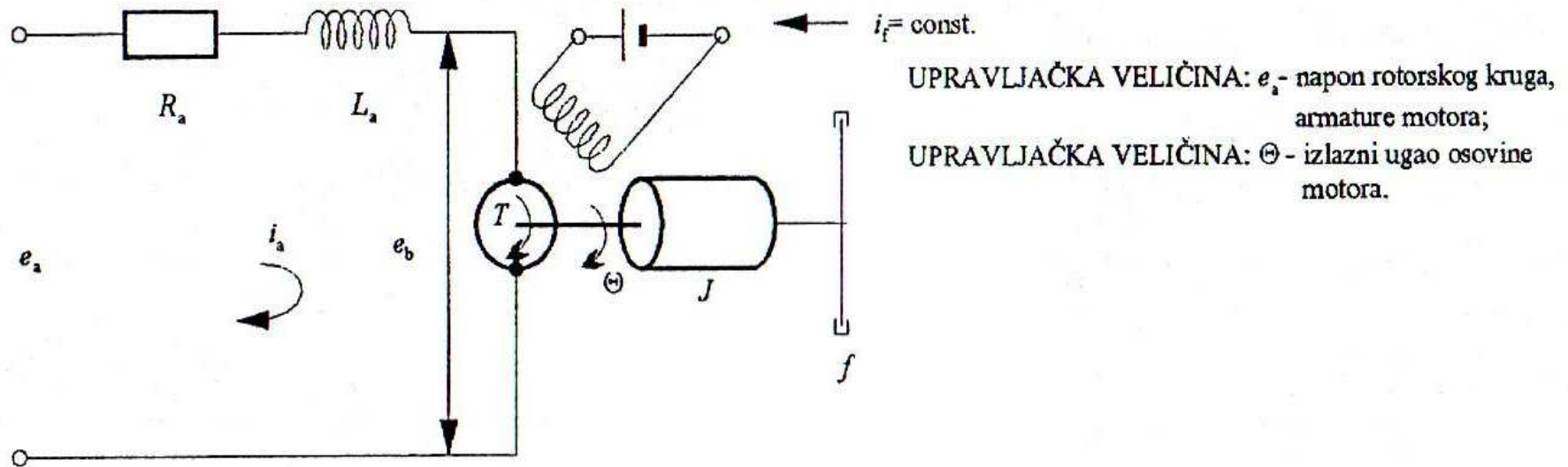
Tabela 1. - Karakteristike najcesce koristenih izvrsnih mehanizama (servomotora)

TIP	KONSTRUKCIJA	ULAZNI SIGNAL	D/A KONVERTOR	PRETVARAČ ULAZNOG SIGNALA	VREMENSKA KARAKTERISTIKA	TIPIČNA SNAGA (W)	VRIJEME HODA, s	u_R			u_A
PNEUMATSKI	MEMBRANSKI SA OPRUGOM	PRITISAK VAZDUHA 0,2-1,0 bar	D/A	ELEKTRO-PNEUMATSKI	PROPORCIONALNA SA VREMENSKOM ZADRŠKOM	0,1-2000	1-10	u_R			u_A
	VENTIL BEZ MEHANIČKE POVRATNE SPREGE	PRITISAK ULJA	D/A	ELEKTRO-HIDRAULIČKI	INTEGRALNA	100-750000	1-10	u_R			u_A
VENTIL SA MEHANIČKOM POVRATNOM SPREGOM	PROPORCIONALNA SA VREMENSKOM ZADRŠKOM				100-750000	1-10	u_R			u_A	
ELEKTROMEHANIČKI	ISTOSMJERNI MOTOR SA PARALELNO M POBUDOM	PROMJENLJIVI NAPON ARMATURE	D/A	ELEKTRONSKI POJAČAVAČ	INTEGRALNA SA REGULISANOM BRZINOM	10-4000	0,01-60	u_R			u_A
	DVOFAZNI MOTOR IZMJENIČNE STRUJE	PROMJENLJIVI NAPON	BLOK UPRAVLJANJA	TROPOZICIONI RELEJ	INTEGRALNA SA KONSTANTNOM BRZINOM	10-4000	1-60	u_R			u_A
	ISTOSMJERNI MOTOR SA PROMJENLJIVOM POBUDOM	PROMJENLJIVI NAPON POBUDE	D/A	ELEKTRONSKI POJAČAVAČ	INTEGRALNA SA REGULISANOM BRZINOM	10-4000		u_R			u_A
	KORAČNI MOTOR (STEP MOTOR)	NAPONSKI IMPULS		UPRAVLJAČKI BLOK STEP MOTORA	PROPORCIONALNO STEPENASTOG TIPA		0,02-60	u_R			u_A

u_R - UPRAVLJANJE, IZLAZ IZ REGULATORA, u_A -IZLAZ AKTUATORA, STANJE AKTUATORA

Jednosmjerni motor sa nezavisnom pobudom

Izvršni mehanizmi na bazi jednosmjernog motora sa nezavisnom pobudom veoma su često zastupljeni u tehničkoj praksi. Šematski dijagram ovog motora koji se često naziva i jednosmjerni motor upravljani strujom armature, dat je na slici.



Šematski dijagram istosmjernog motora sa konstantnom pobudom

Jednosmjerni motor sa konstantnom nezavisnom pobudom često se koristi kao izvršni mehanizam kada se zahtjeva određena snaga na njegovom izlazu koja treba da savlada neki teret okarakterisan momentom inercije i ekvivalentnim viskozno-frikcionim trenjem f .

Neka bude razmoren jednosmjerni motor sa slike 14. sa upravljansom strujom armature i_a . Oznake sa slike su:

R_a – otpor namotaja rotora, armature

L_a – induktivnost armature,

i_a – struja armature,

i_f – struja pobude,

e_a – napon armature, upravljački signal,

e_b – kontraelektromotorni napon,

θ - ugao zaokreta izlazne osovine motora,

T – obrtni momenat koji razvija motor,

J – ekvivalentni momenat inercije motora i opterećenja sveden na osovinu motora,

f – koeficijent ekvivalentnog viskozno-frikcionog trenja motora i opterećenja sveden na osovinu motora.

Obrtni momenat motora T , proporcionalan je proizvodu struje armature i_a i magnetnog fluksa u vazдушnom procjepu koji je srazmjernan struji pobude

$$\psi = K_f i_f, \text{ gdje je: } K_f - \text{konstanta.}$$

Momenat T može biti izražen sa $T = K_f i_f K_1 i_a$ gdje je: K_1 – konstanta.

Kod jednosmjernog motora upravljanoj strujom armature, struja pobude održava se konstantom. Kada je struja konstanta tada je i fluks konstantan, pa je obrtni momenat direktno proporcionalan struji armature tako da se ima

$$T = K i_a \text{ gdje je: } K = K_1 K_f - \text{konstanta motora.}$$

Kada rotor (armatura) rotira, tada se na krajevima rotora indukuje napon proporcionalan proizvodu fluksa i ugaone brzine. Za konstantan fluks, indukovani napon e_b direktno je proporcionalan ugaonoj brzini. Odatle je

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \text{ gdje je: } K_b - \text{konstanta.}$$

Brzina ovakvog motora kontrolisana je naponom armature e_a . Napon e_a dobija se iz pojačavača ili iz generatora, tj. odgovarajuće upravljačke strukture. Za kolo rotora važi diferencijalna jednačina koja opisuje električnu ravnotežu.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_o i_a + e_b = e_a$$

Struja armature proizvodi momenat koji treba da savlada opterećenje, ili

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = T = K i_a$$

Uz pretpostavku da su svi uslovi jednaki nuli, uzimanjem Laplasove transformacije dobija se sistem jednačina:

$$K_b s \theta(s) = E_b(s)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s)$$

$$(J s^2 + f s) \theta(s) = T(s) = K I_a(s)$$

Uzimajući da je e_a ulazni, upravljački, signal, a θ ugao pozicija motora, funkcija prenosa je

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s \left[L_a J s^2 + (L_a f + R_a J) s + R_a f + K K_b \right]}$$

Kako je induktivnost L_a obično mala, to ona može biti zanemarena pa prethodna relacija može biti napisana kao

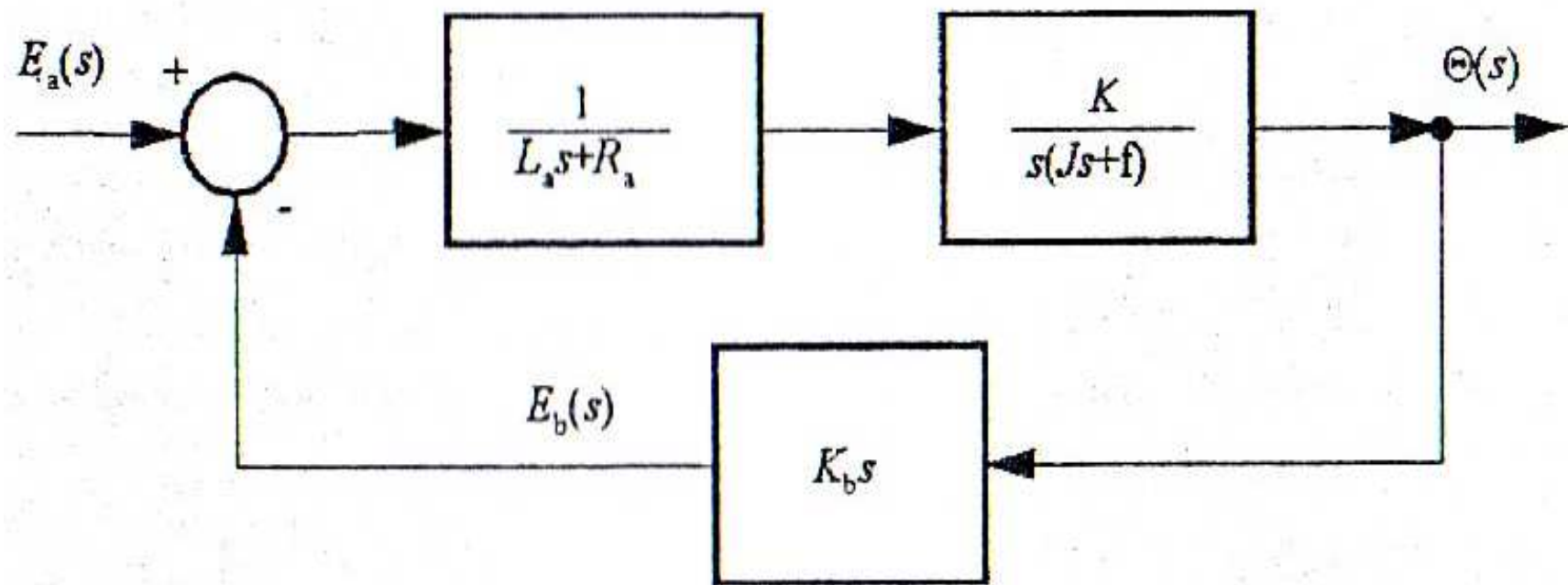
$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

$K_m = K / (R_a f + K K_b)$ – pojačanje motora, i

$T_m = R_a J / (R_a J + K K_b)$ – vremenska konstanta motora.

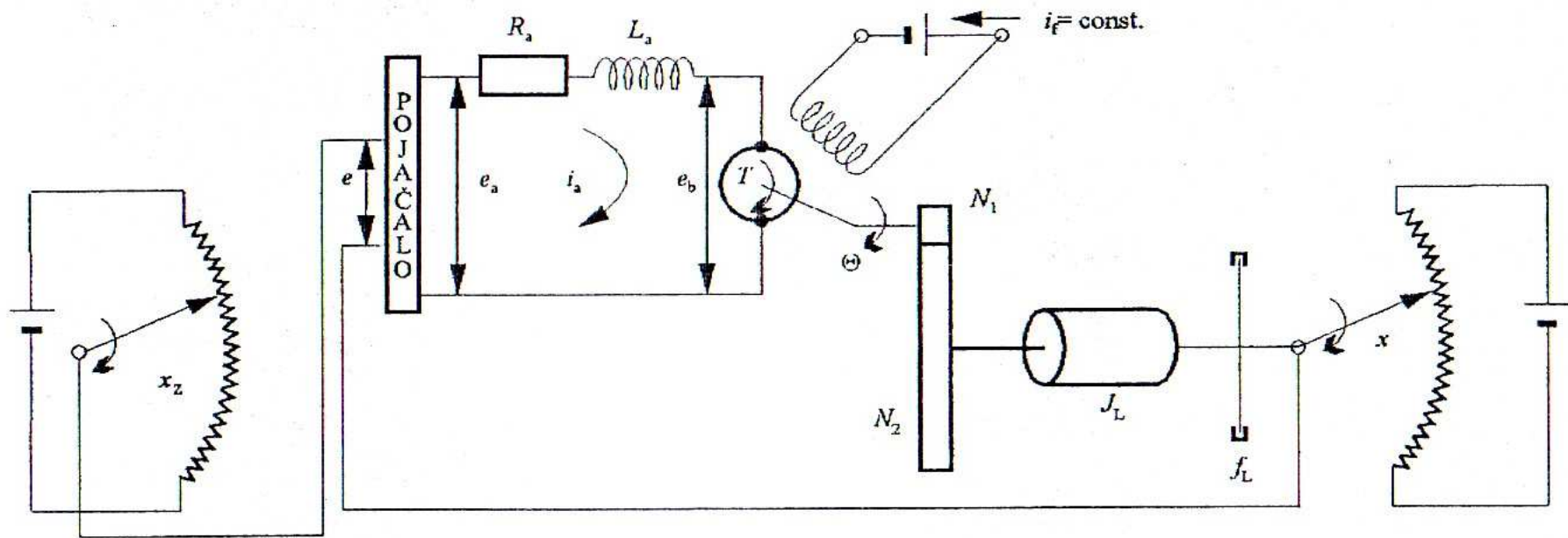
Iz jednačina se vidi da funkcija prenosa sadrže član $1/s$ što govori da je motor integrator u odnosu na ugaonu poziciju. Množeći sa s lijevu i desnu stranu dobija se da je

$$\frac{s\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{(T_m s + 1)}$$



Blok dijagram motora sa nezavisnom pobudom

Sada će biti izložen pozicioni servosistem (pozicioner) po uglu na bazi jednosmjernog motora sa nezavisnom pobudom. Šematski dijagram dat je na slici, što predstavlja pozicioni servosistem. Opterećenje koje je predstavljeno sa momentom inercije J_L i koeficijentom viskozno-friktionog trenja može za koordinatu stanja imati ugao x ili poziciju. Kada se radi o izlaznoj poziciji, tada mora postojati na izlaznoj osovini motora konvertor ugaonog kretanja u linerano kretanje, što se može ostvariti pužastim prenosom, zupčastom letvom itd.



Pozicioni servosistem

Potenciometarski detektor greške može se u s domenu opisati sljedećom jednačinom:

$$E(s) = K_1 [X_z(s) - X(s)]$$

gdje je: K_1 – pojačanje potenciometarskog detektora greške.
Pojačalo se može opisati jednačinom

$$E_a(s) = K_p E(s)$$

gdje je: K_p – pojačanje pojačala.

Ekvivalentni moment inercije motora i opterećenja sveden na osovinu motora je

$$J = J_m + n^2 J_L$$

gdje je: J_m – moment inercije motora,
 $n = N_1 / N_2$ – prenosni odnos reduktora broja obrtaja.

Ekvivalentni koeficijent vikožno-frikcionog trenja motora i opterećenja sveden na osovinu motora je

$$f = f_m + n^2 f_L$$

Polazeći od relacije
funkcije prenosa motora

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s [T_m s + 1]}$$

gdje je: $K_m = K / (R_a f + K K_b)$, a $T_m = R_a J / (R_a f + K K_b)$.

Prenosni odnos izlaznog zupčastog reduktora sa N_1 i N_2 zubaca je

$n = N_1 / N_2$, $N_2 > N_1$ pa se ulazni ugao x može napisati kao $x = n\theta$

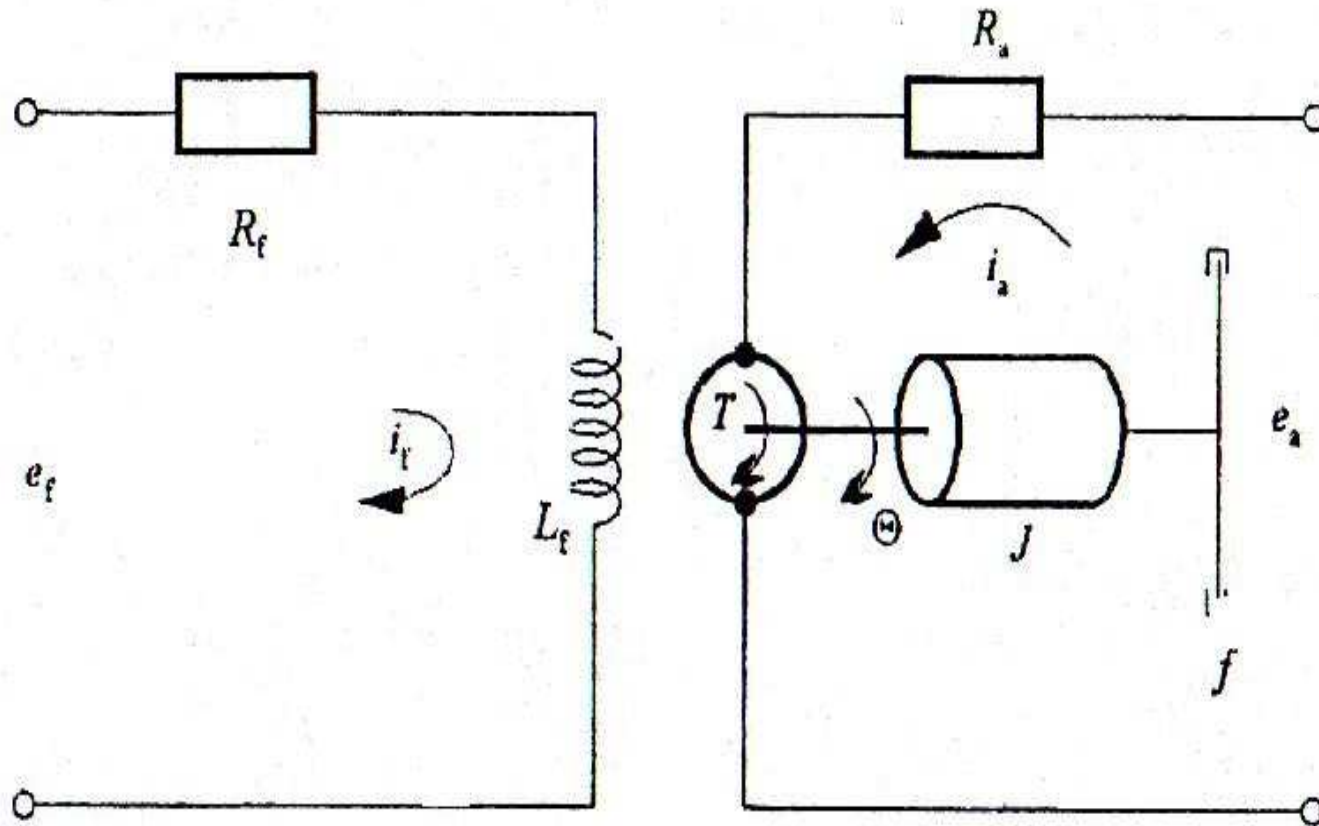
Na osnovu prethodnih relacija može se za funkciju prenosa u zatvorenom za pozicioni sistem sa slike napisati kao:

$$X(s) = X_z(s) \frac{nK_1 K_m K_p}{[T_m s^2 + s + nK_1 K_m K_p]}$$

na osnovi kojeg se može vršiti analiza odziva sistema na razne ulaze, frekventna propusnost, statička greška, itd.

Jednosmjerni motor sa upravljanom pobudom

Šematski dijagram jednosmjernog motora sa upravljanom pobudom dat je na slici



Oznake na slici su iste kao i na slici jednosmjernog motora sa nezavisnom pobudom, uz dodatak da je upravljačka veličina e_f – napon pobudnog namotaja, a R_f – otpor pobudnog namotaja i L_f – induktivitet pobudnog namotaja. Napon e_f dobija se iz odgovarajućeg pojačala koje daje snagu pobude. Struja rotora i_a održava se konstantnom. Ovo se postiže izvorom konstantnog napona e_a i ubacivanjem velikog serijskog otpora u red sa otporom R_a . Ako je pad napona na tom otporu veliki u poređenju sa indukovanim naponom e_b , tada je efekat e_b mali. Step en iskorišćenja ovakvog motora mali je, međutim, ovakav motor koristi se u sistemima za upravljanje brzine. Održavanje konstantne struje armature i_a složeniji je problem od održavanja konstantne struje pobude i_f radi toga što je prisutan uticaj indukovanog napona e_b , jer njegov iznos zavisi od brzine motora.

Obrtni momenat T koji razvija motor, proporcionalan je proizvodu magnetnog fluksa ψ i struje rotora

$$T = K_1 \psi i_a \quad \text{gdje je: } K_1 - \text{konstanta.}$$

Budući da je i_a konstantna, fluks ψ je samo funkcija struje pobude i_f , pa se izraz za obrtni momenat može napisati u vidu

$$T = K_2 i_f$$

Jednačine koje opisuju kretanje električnog i mehaničkog podsistema imaju oblik

$$L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = e_f$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = t = K_2 i_f$$

Uzimanjem Laplace-ove transformacije prethodnih jednačina uz nulte početne uslove, može se napisati funkcija prenosa

$$\frac{\theta(s)}{E_f(s)} = \frac{K_2}{s(L_f s + R_f)(Js + f)} = \frac{K_m}{s(T_f s + 1)(T_m s + 1)}$$

gdje je:

$K_m = K_2 / (R_f f)$ – pojačanje motora,

$T_f = L_f / R_f$ – vremenska konstanta pobudnog kruga, električna,

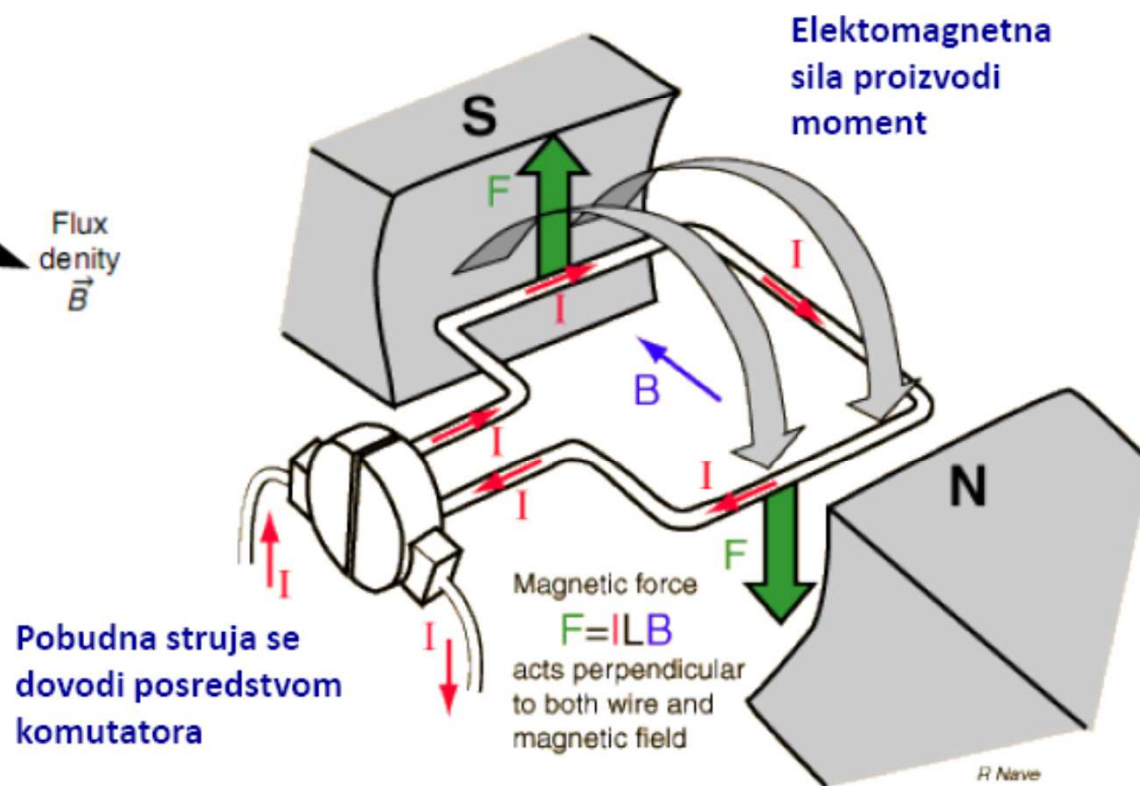
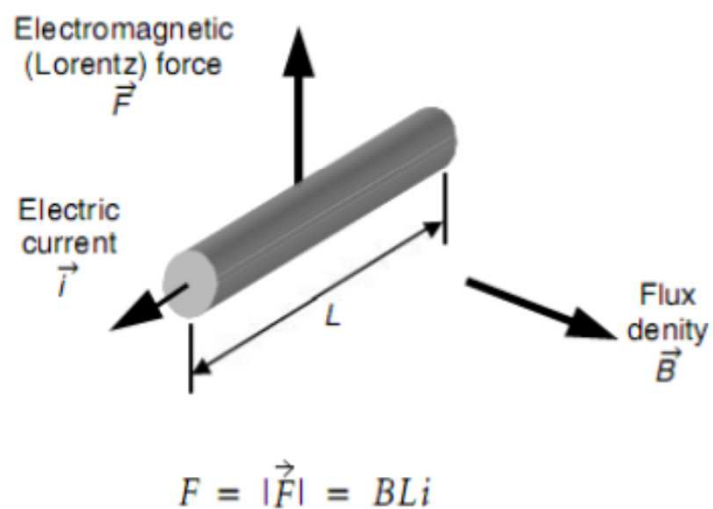
$T_m = J / f$ – vremenska konstanta motora, mehanička.

Kako vremenska konstanta pobudnog kruga T_f nije zanemarljiva, funkcija prenosa jednosmjernog motora upravljaniog pobudom je trećeg reda.

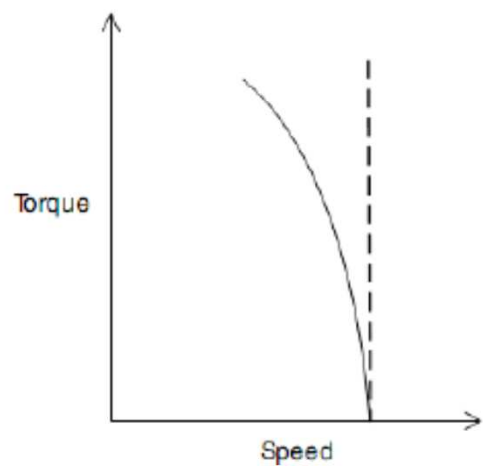
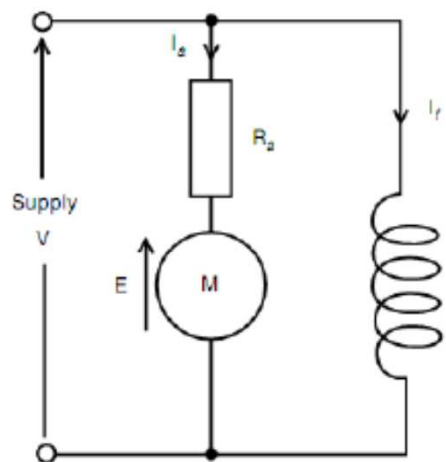
Prednost motora upravljano pobudom je u tome što je snaga pojačavača pobude mala jer je i snaga pobude mala. Međutim, zahtjev da struja pobude i_f bude konstantna je ozbiljan nedostatak, u odnosu na obezbjeđenje izvora konstantnog napona. Jednosmjerni motori upravljani pobudom imaju niz nedostaka u odnosu na jednosmjerne motore upravljane strujom rotora. Kod motora upravljano strujom rotora indukovani napon e_b djeluje prigušujuće na kretanje motora, dok u slučaju motora upravljano pobudom prigušenje se mora obezbijediti motorom i opterećenjem. Radi toga, motori upravljani pobudom imaju manji stepen korisnog dejstva i generišu veće toplotne gubitke u rotoru.

Vremenske konstante motora upravljanih pobudom u principu su veće od vremenskih konstanti motora upravljanih strujom rotora. Međutim, kod upoređivanja vremenskih konstanti kod oba motora treba uzeti u obzir i vremenske konstante odgovarajućih pojačavača.

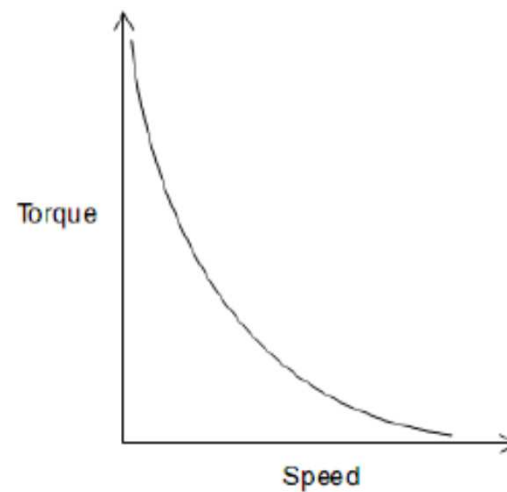
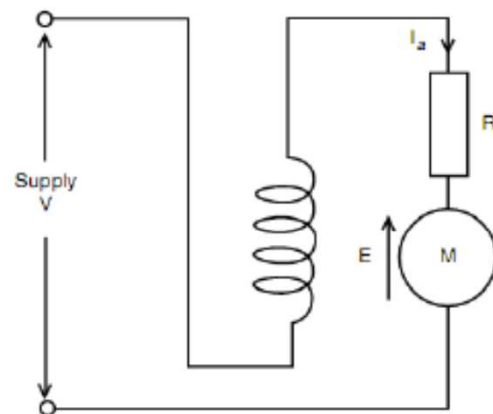
Osnovi elektromagnetizma



Paralelna veza statora



Redna veza statora

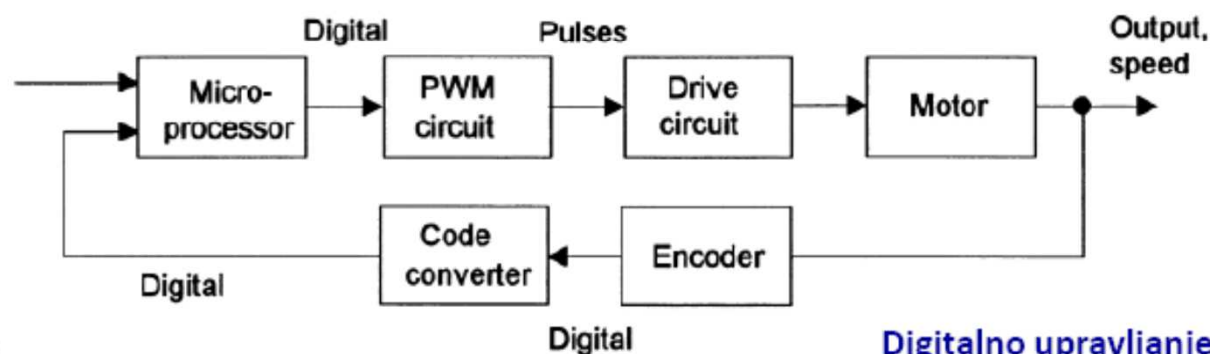
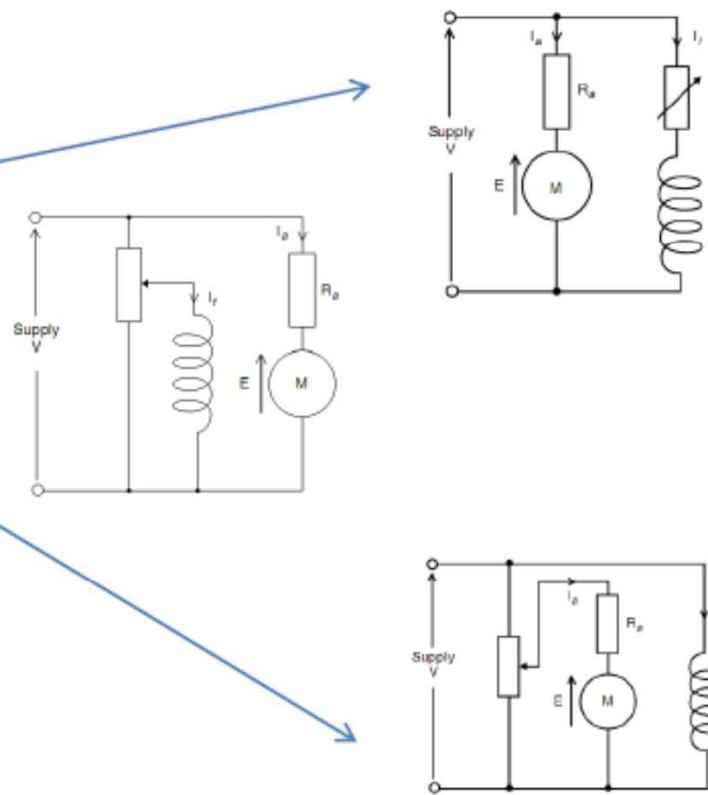
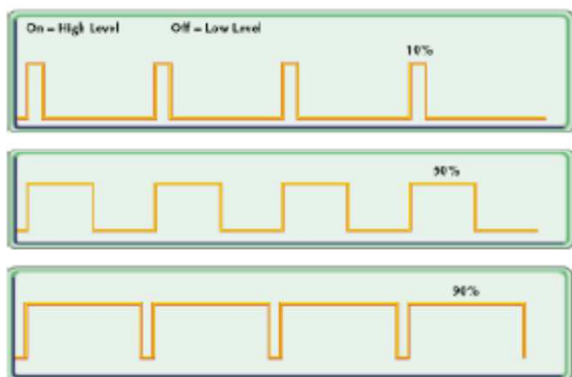


Elektromehanički aktuatori

DC Elektromotori

Upravljanje brzinom DC motora

- Redukcijom fluksa polja statora
- Redukcijom pobudne struje rotora
- **Digitalna kontrola PWM signalom**



(c)

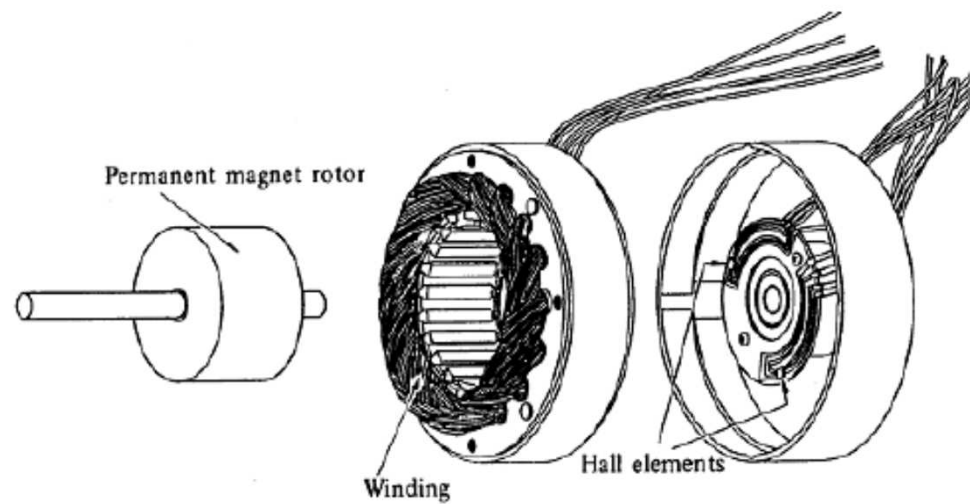
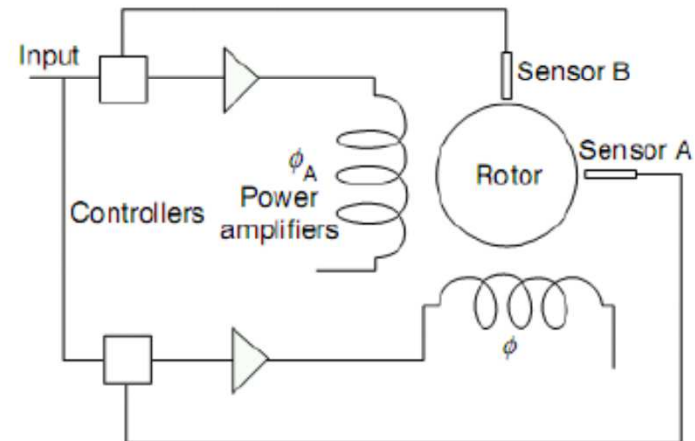
Digitalno upravljanje brzinom DC motora

Elektromehanički aktuatori

DC Elektromotori

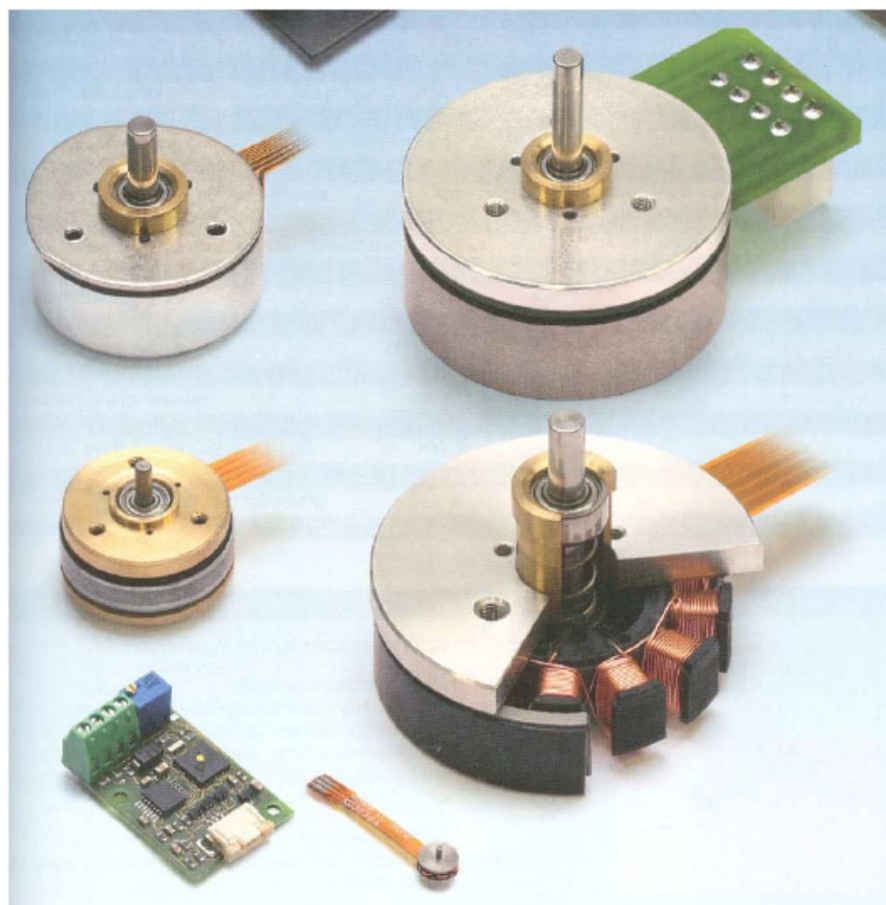
Brushless DC (BLDC)

- Veće brzine
- Veći momenti na višem broju obrtaja
- Nemaju komutator



Prednost DC motora:

- mogu biti jako mali (ϕ i do 1,9 mm s osovinom od ϕ 0,24 mm) ili plitki (2 (s osovinom 10) mm) i s već integriranim reduktorom i senzorom;
- mirni rad i uz velike brzine (više tisuća rpm) i snage (kW).



[www.maxonmotor.com]
[www.faulhaber.de]

smoovy
by RMB

the smallest commercially available brushless DC-motors

Best new product of 1997*

Step motor

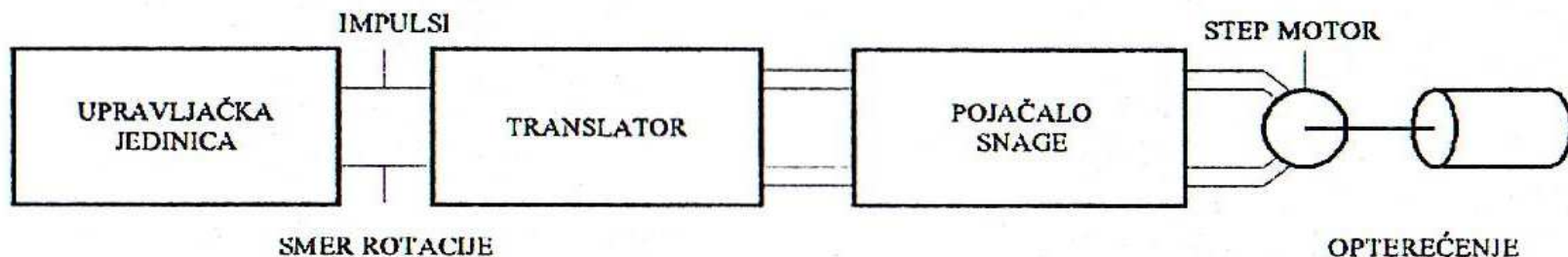
Step motor je elekromehanički inkrementalni aktuator koji konvertuje digitalne ulazne impulse u pomjeraj izlazne osovine motora. Svaki ulazni impuls proizvodi elementarni pomjeraj rotora koji se naziva step odakle i potiče naziv – step motor.

Većina električnih motora ima rotor koji kontinualno rotira kada je napajan električnom energijom, i postoji direktan odnos između brzine rotacije i parametra napajanja (napon, struje, frekvencija). Rotor može biti stacionaran samo ako je ostvareno upravljanje sa povratnom spregom. Nasuprot tome, kod step motora postoji direktan odnos između fiksne, stabilne pozicije rotora i konfiguracije napajanja. Pomjeraj između dvije stabilne pozicije postiže se sa jednom ili više modifikacija napajanja namotaja motora. Kod ovog motora, dakle, moguće je upravljanje pozicije i brzine u otvorenoj petlji, bez povratne sprege, ulaznim upravljačkim impulsima.

Struktura motora i konfiguracija napajanja određuju broj ravnotežnih stanja, pozicija, rotora motora. Broj ravnotežnih stanja u jednom obrtaju može biti veoma velik (12, 24, 48, 100, 200, 800, itd.) i veći od ovog broja. Greška u poziciji nije kumulativna, tako da je step motor podesan za numeričko upravljanje alatnih mašina i robota. Radi toga što savremeni SAU često imaju potrebu za inkrementalnim kretanjem, step motori postaju sve važniji aktuatori. Inkrementalno kretanje susreće se kod svih tipova periferijske opreme računara kao što su printeri, trake, diskovi, zatim sistemi procesnog upravljanja, itd.

Postoje razni tipovi step motora, zavisno od principa rada. U tehničkoj praksi susreću se dva tipa motora: motor sa promjenljivom reluktansom i motor sa permanentnim magnetom. Matematička analiza ovih motora veoma je kompleksna, budući da su ovi motori jako nelinearni.

Za razliku od istosmjernih i asinhronih motora, linearna predstava step motora je nerealna. Radi toga se neće razmatrati ova problematika.

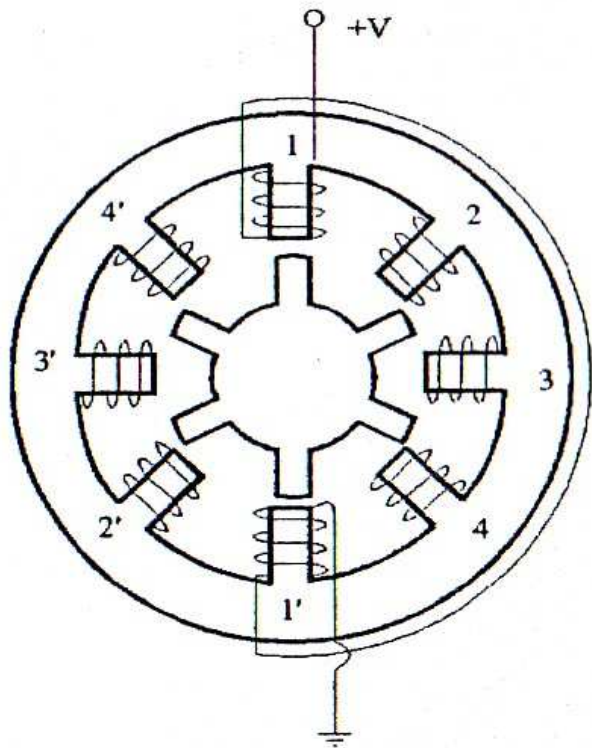


Blok šema upravljanja step motora

Upravljačka jedinica koja je obično mikroprocesorski bazirana, proizvodi upravljačke impulse i signale za smjer rotacije saglasno datom broju stepova (koraka) ili brzini. Translator transformiše ulazne informacije u logičku kombinaciju koja onda određuje odgovarajuću konfiguraciju napajanja. Pojačalo snage direktno napaja namotaje motora sa odgovarajućim naponima ili strujama. Funkcija translatora može se realizovati pomoću logičkih digitalnih modula. Primjećuje se da koračni motor nema povratnu spregu po poziciji, međutim on omogućava i bez povratne snage, precizno pozicioniranje. Ovakav rad motora bez informacije o trenutnom položaju vratila motora, moguć je samo ako su promjene opterećenja neznatne. Tada brzina ponavljanja upravljačkih impulsa motora mora biti usaglašena sa prelaznim procesom u svakom koraku.

Da se poboljša dinamički rad step motora, uvodi se digitalna povratna sprega po poziciji vratila step motora. Osnovna korist od ovakve povratne sprege ogleda se u mogućnosti da se motor okreće brzinom koja je u sinhronizaciji sa trenutnom brzinom obrtaja. U prisustvu povratne sprege motor će raditi uspješno i u uslovima znatnih promjena opterećenja na izlaznom vratilu. Prisustvo digitalne povratne sprege omogućava daleko bolje karakteristike, jer se tada brzina ponavljanja upravljačkih impulsa podešava automatski u zavisnosti od trenutne brzine motora i karakteristika opterećenja. Takođe, povratna sprega omogućava maksimalnu brzinu ponavljanja upravljačkih impulsa u toku procesa ubrzavanja motora i u toku regulacije neke konstantne brzine obrtanja vratila motora.

Step motor sa promjenljivom reluktansom



Step motor sa promjenljivom reluktansom dat je na slici na statoru ima Z_s zubaca, a na rotoru Z_r , $Z_s \neq Z_r$. Upravljački namotaji postavljeni su prema slici na dijametralne zupce statora. Kada se dovede napon napajanja V , rotor motora rotira sve dok se ne postavi u poziciju najmanjeg magnetnog otpora (poklope se ose odgovarajućih zubaca statora sa odgovarajućim zubcima rotora). Slika pokazuje poprečni presjek jednog reluktantnog step motora za $Z_s = 8$ i $Z_r = 6$. Ravnotežni položaj ovog motora ima se kada teče struja kroz namotaj j i j' , $j, j' \in \{1, 2, 3, 4\}$, a u ovom slučaju to je struja I_1 koja teče kroz namotaj 1 i 1'.

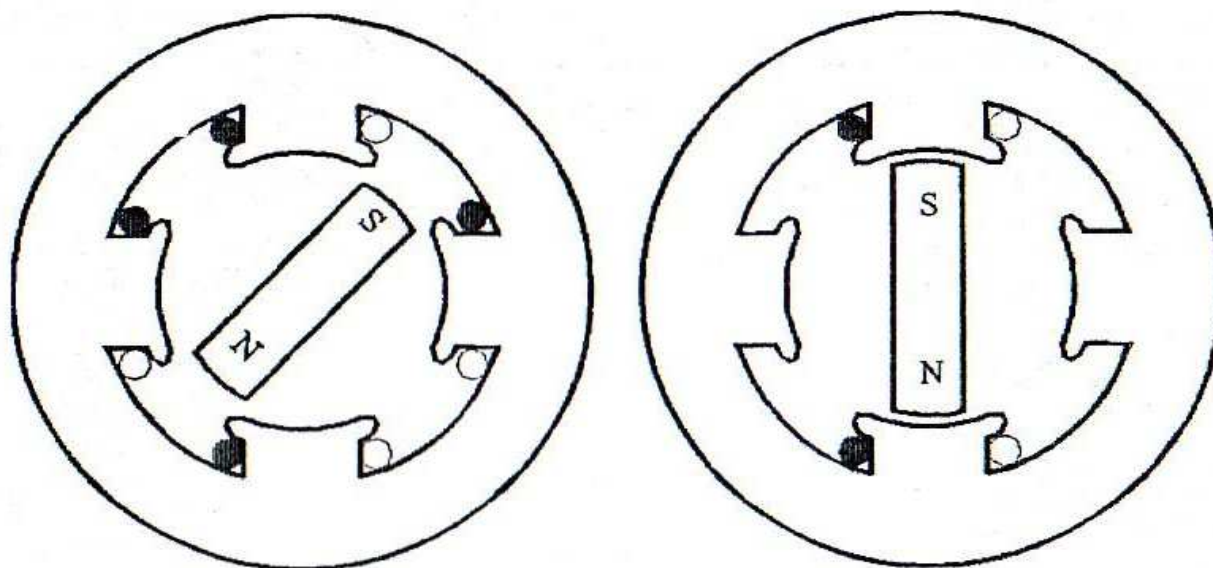
Kada je $I_1 = 0$, tada teče samo I_2 i rotor step motora zaokrene se za korak (mehanički step ugla).

$$\theta_p = 2\pi (Z_s - Z_r) / Z_r Z_s$$

Za ovaj slučaj je $\theta_p = 15^\circ$. Za vrijeme rotacije rotora, mijenjaju se reluktansa i induktivnost namotaja. Ove varijacije utiču na moment koji razvija motor. Step motori sa promjenljivom reluktansom imaju visok broj koraka po obrtaju i mali moment inercije, ali njihovi vazdušni zazori moraju biti veoma mali kako bi se dobio veliki moment. Odatle, njihova konstrukcija je složena, a izrada skupa, pa imaju ograničenja u primjenama.

Step motor sa permanentnim magnetom

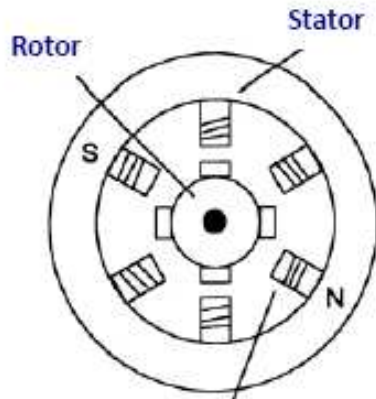
izveden je iz sinhronog motora. Rotirajuće magnetno polje formirano je statorskim namotajima i magnet rotora rotira usmjeravajući se prema polju statora. Uprošćena slika step motora sa permanentnim magnetom data je na slici.



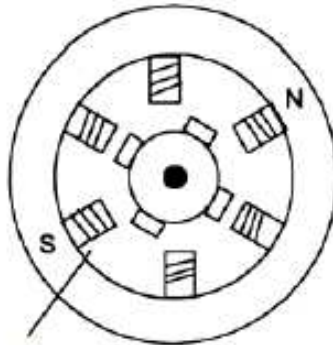
U cilju da se dobije veći broj koraka po obrtaju, koriste se višepolni rotori čime se broj koraka dobija kao multipl para polova. Ako se ima motor sa 5, 12 ili 24 pari polova, broj koraka po obrtaju je 20, 48 ili 96, respektivno. Za pokretanje regulacionih ventila kako je već rečeno koriste se i pneumatski i elektropneumatski pozicioneri i servomotori.

Koračni motori **varijabilne reluktanse**

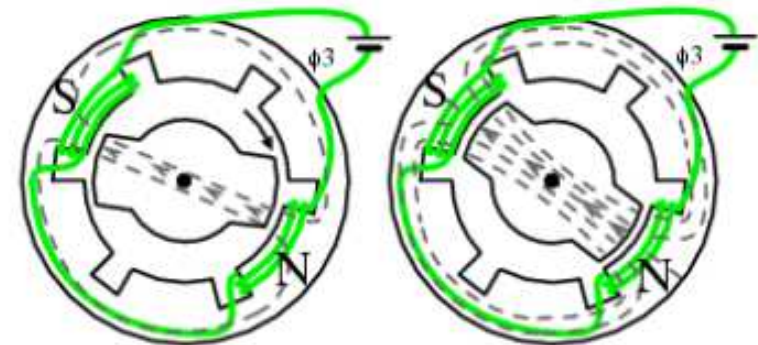
(7.5°, 15°)



Pobuđeni namotaji generišu magnetno polje koje dovodi do zakretanja rotora (slika desno) u cilju smanjenja reluktanse



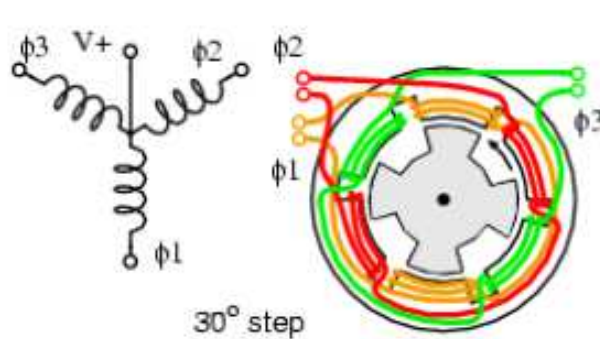
Sledeći par namotaja statora koje treba uključiti kako bi se rotor pomerio za jedan korak



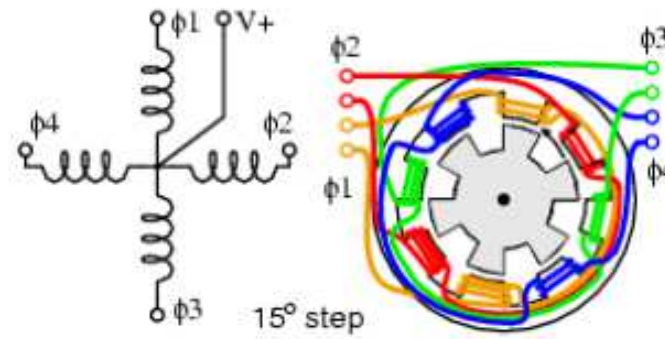
high reluctance

low reluctance

Pokretanje rotora naizmeničnim uključivanjem namotaja

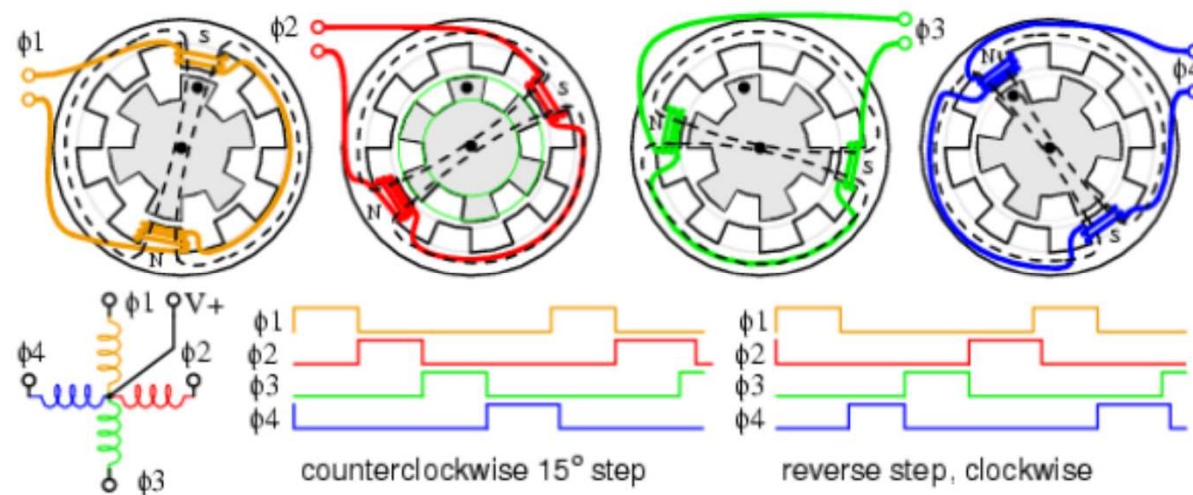


30° step

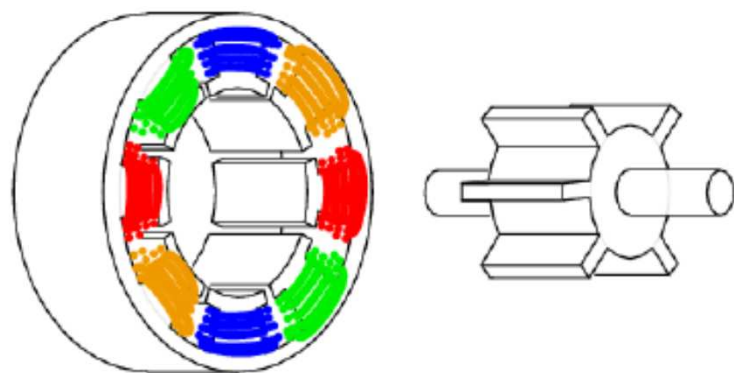


15° step

Koračni motori varijabilne reluktanse



Pokretanje rotora naizmeničnim uključivanjem namotaja

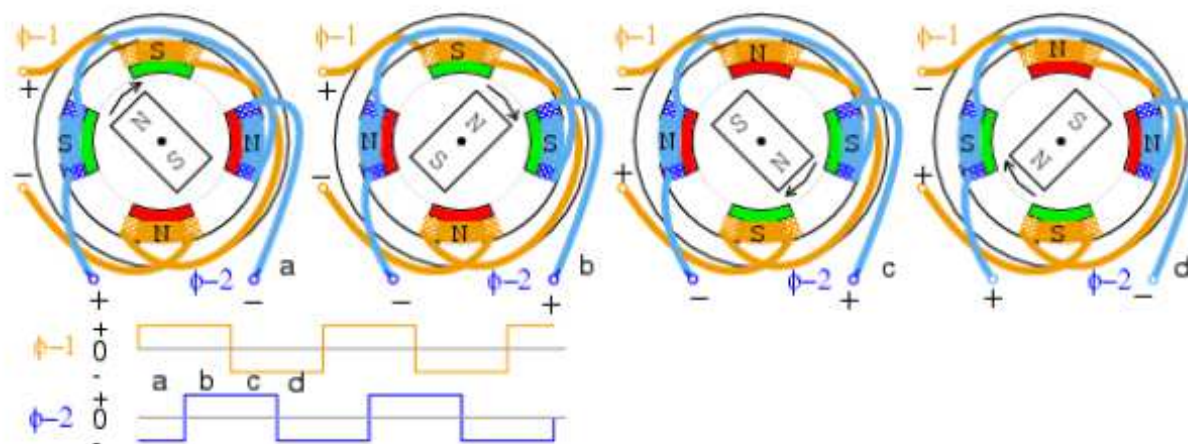


Koračni motor sa stalnim magnetom

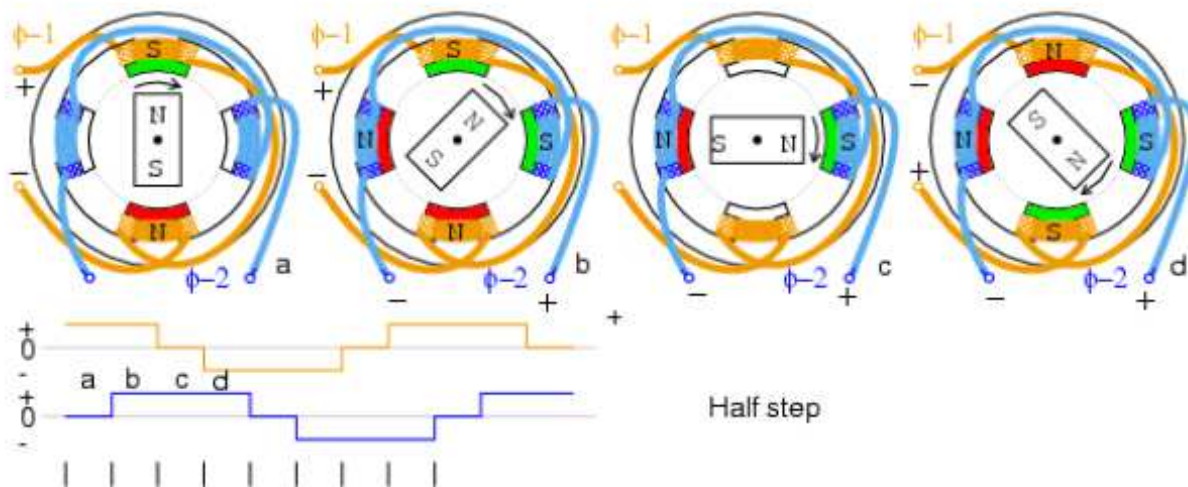
(1.8°, 7.5°, 15°, 30°, 34°, 90°)

Full step upravljanje

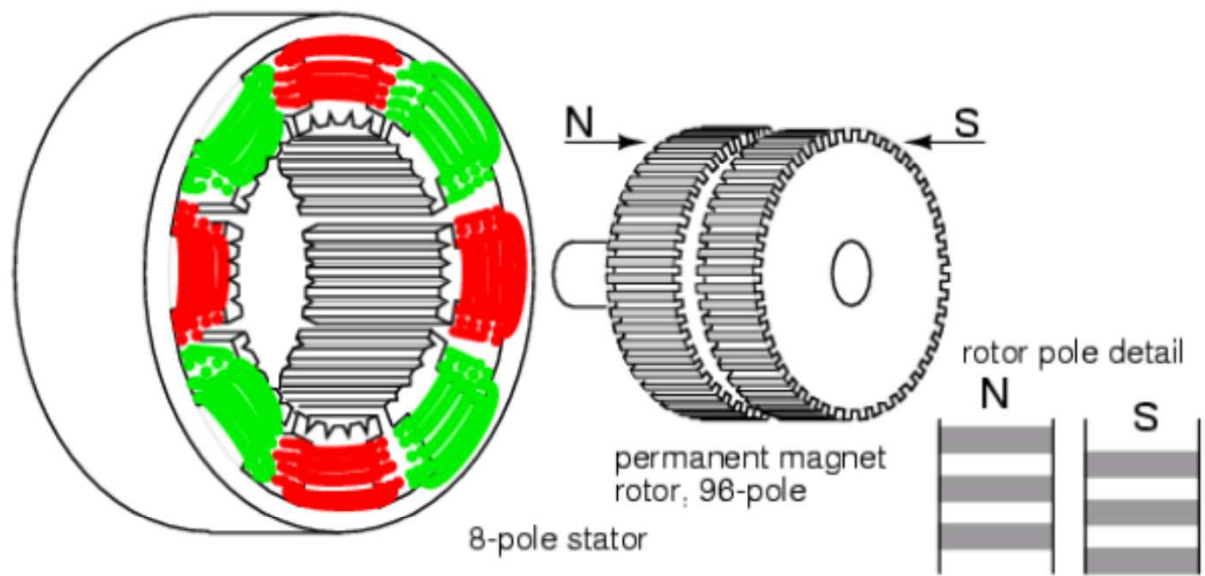
(Veći moment !)



Half step upravljanje



Koračni motor - hibridni



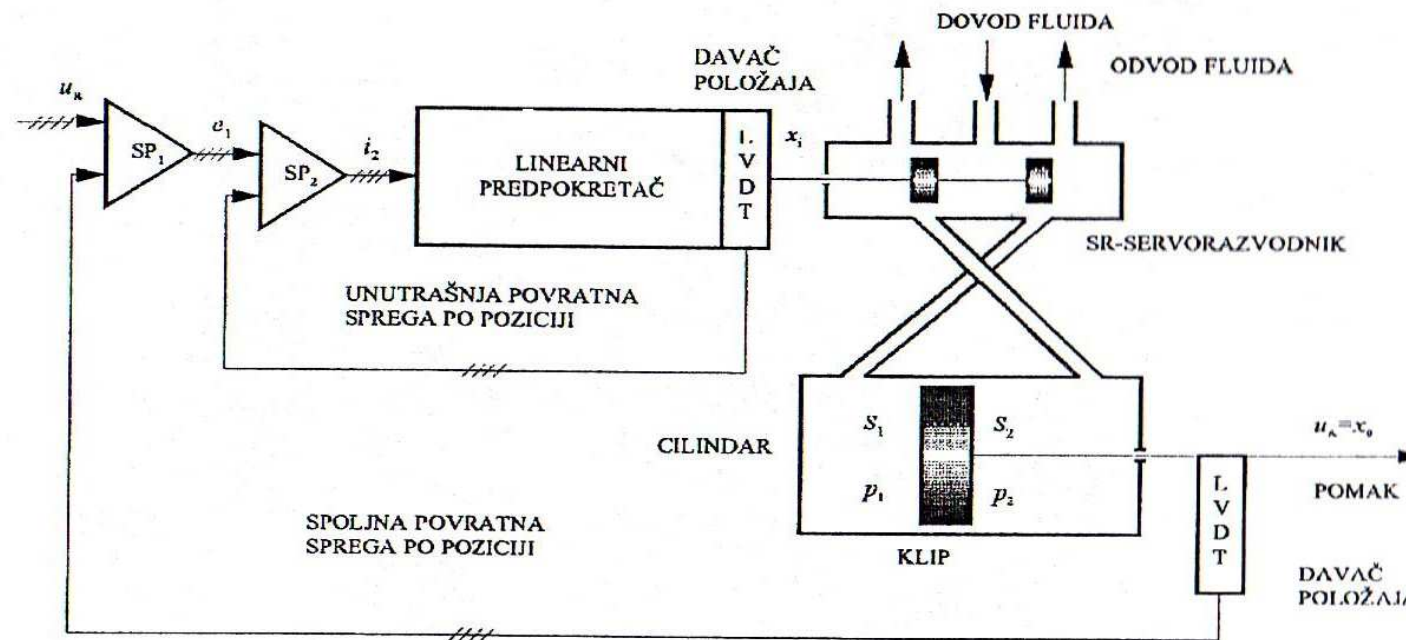
Rotor sa 2x 48 polova fazno smaknutih 192 koraka (1.875 °/koraku)

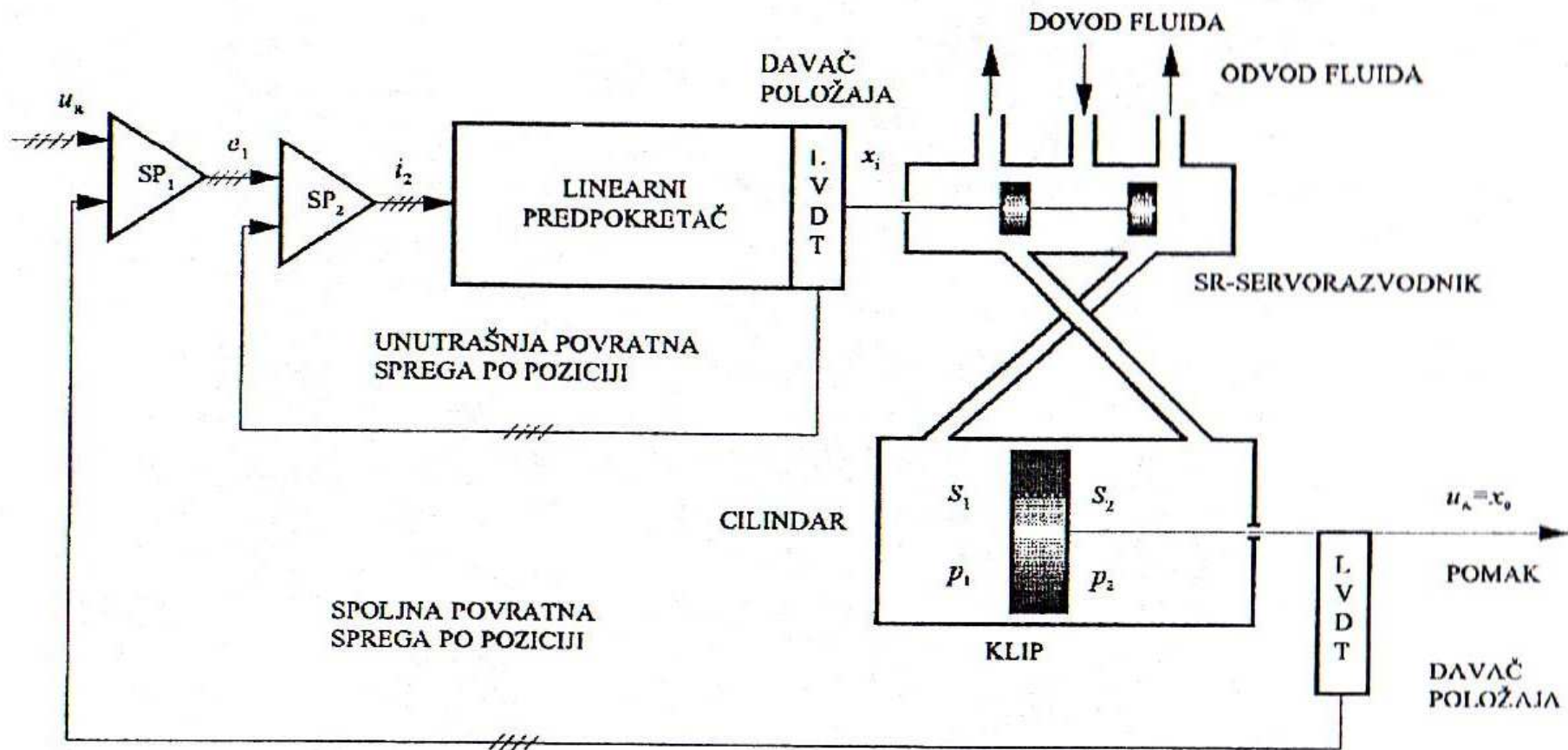
Hidraulički pokretač sa linearnim predpokretačem

Kada se zahtjevaju veće snage za pokretanje izvršnih organa kao što su komandne površine na savremenim borbenim i putničkim avionima, kao pokretači se koriste elektroservohidraulični pokretači, koje karakteriše kompaktivnost i velika gustina snage po jedinici volumena. Pri tome, u praksi se susreću različite izvedbe.

Za pokretanje komandnih površina u poslednje vrijeme koriste se aktuatori koji se satoje iz dva dijela: linearnog predpokretača koji ulazni električni signal (koji je obično višestruk) pretvara u pomjeraj, i hidrauličkog pojačivača koji pomjeraj klipa servorazvodnika pretvara u izlazni pomjeraj hidrauličnog pojačivača uz generisanje neophodne snage na svom izlazu. Blok šema takvog jednog pokretača data je na slici. Ovaj pokretač namijenjen je sistemima električnih komandi kod savremenih aviona (tzv. Fluy-By-Wire (FBW sistemi).

Upravljački signal koji je naponski upoređuje se sa signalom iz davača položaja pomaka klipa glavnog cilindra i razlika se obrađuje po nekom zakonu u servopojačavaču SP_1 . Signal iz SP_1 , e_1 upoređuje se sa signalom iz davača pozicije lineranog predpokretača i nakon upoređivanja i dinamičke obrade, dobija se strujni signal i_2 . Linearni predpokretač je elektromehanički konvertor koji na svom ulazu ima strujni signal, a na izlazu daje silu koja je praćena pomakom x_1 .





Ta sila može se izraziti u vidu

$$F_1 = B l i_2 N$$

gdje je: B – jačina magnetskog polja linearnog predpokretača (elektromehaničkog konvertora)

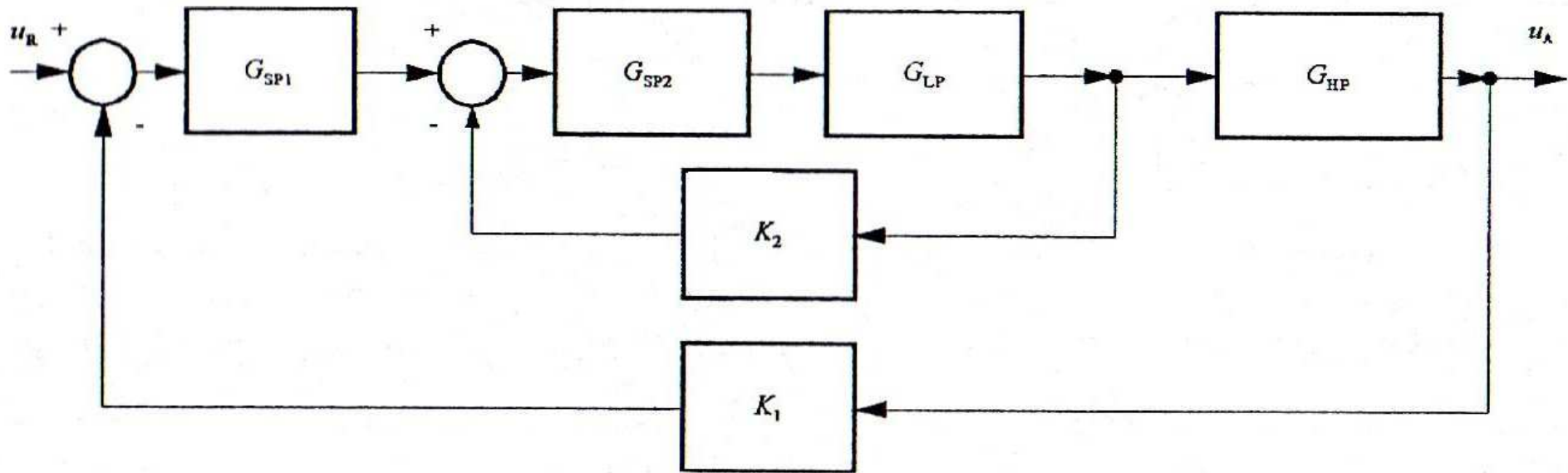
N – broja namotaja i

l – dužina namotaja u magnetnom polju.

Magnetno polje B ostvaruje se pomoću permanentnog magneta na bazi rijetkih zemalja radi veće gustine magnetene energije.

Informacije o poziciji linearnog pretpokretača i pozicije hidrauličnog cilindra dobijaju se pomoću linerno varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT).

Strogo razmatranje hidrauličnog pokretača (servorazvodnik sa hidrauličnim cilindrom), složeno je i kompleksno, i vodi do nelineranih diferencijalnih jednačina. Međutim, za dovoljno mali opseg promjena ulaza $x_i(t)$ i izlaza $x_o(t)$, hidraulični pokretač može se aproksimirati linearnim modelom.



Blok šema elektrohidrauličnog servopokretača sa linearnim predpokretačem;

G_{SP1} – funkcija prenosa SP_1 , G_{SP2} – funkcija prenosa $SP2$, G_{LP} – funkcija prenosa linearnog pretpokretača, G_{HP} – funkcija prenosa hidrauličkog pokretača, K_2 – funkcija prenosa davača pozicije, K_1 – funkcija prenosa davača pozicije

Sila pritiska $f_p = p_1 S_1 - p_2 S_2$, koja djeluje na klip glavnog cilindra, funkcija je pada pritiska fluida na klip, odnosno protoka fluida kroz cilindar. Ako je fluid nestišljiv, njegov protok kroz cilindar uglavnom zavisi od promjenljive $x_i(t)$, i brzine kretanja klipa $x_o(t)$. Radi toga je i sila pritiska na klip funkcija ove dvije promjenljive

$$f_p = f(x_1, x_o)$$

U linearnom režimu rada ova sila može se napisati u obliku

$$f_p(t) = a_1 x_1(t) - a_2 x_o(t)$$

gdje su: a_1 i a_2 – pozitivne konstante.

Jednačina dinamičke ravnoteže sila koja djeluje na klip ima oblik

$$m\ddot{x}_o(t) = f(x_1, x_o) - f\dot{x}_o(t)$$

gdje je: f – koeficijent viskoznog trenja klipa, m – masa klipa i opterećenja ako postoji.

Za male vrijednosti $x_i(t)$ i $x_o(t)$ u okolini $x_i(t) = 0$ i $x_o(t) = 0$, može se napisati

$$m\ddot{x}_o(t) \approx a_1 x_i(t) - a_2 x_o(t) - f\dot{x}_o(t)$$

Funkcija prenosa je :

$$G_{HP}(s) = \frac{a_1}{ms^2 + (a_2 + f)s} = \frac{a_1}{s[ms + (a_2 + f)]}$$

U slučaju da se mase koje učestvuju u kretanju mogu zanemariti, $m \approx 0$, funkcija prenosa je:

$$G_{HP}(s) = \frac{a_1}{(a_2 + f)s} = \frac{1}{\left(\frac{a_2 + f}{a_1}\right)} = \frac{2}{T_1 s}$$

pa se tada hidraulički pojačivač može smatrati integratorom, a integralno vrijeme je

$$T_1 = (a_2 + f) / a_1.$$

Prenosne funkcije G_{SP1} i G_{SP2} biraju se iz uslova da sistem bude pozicioni sa odgovarajućom statičkom i dinamičkom karakteristikom, tj. frekventnom propusnošću. U cilju sprječavanja lijepljenja klipića servorazvodnika, na signal i_2 koji je sporopromjenljiv (odgovara dinamici u_R), superponira se jedan visokofrekventni šum koji se naziva signal podrhtavanja, s ciljem da se spriječi zalijepljivanje klipića. Amplituda tog signala je reda nekoliko procenata od i_2 , a frekvencija je reda 1-2 KHz.

Koliko "malo" je MALO? Od makro do nano sveta



MAKRO (m)

Mostovi

Avion

Automobili

Čovek

Ptice

MEZO (mm)

Puževi

Pirinač

Mravi

Delovi sata

Pesak

MIKRO (μm)

Kosa

Prašina

Polen

Ćelija

Bakterija

NANO (nm)

Virus

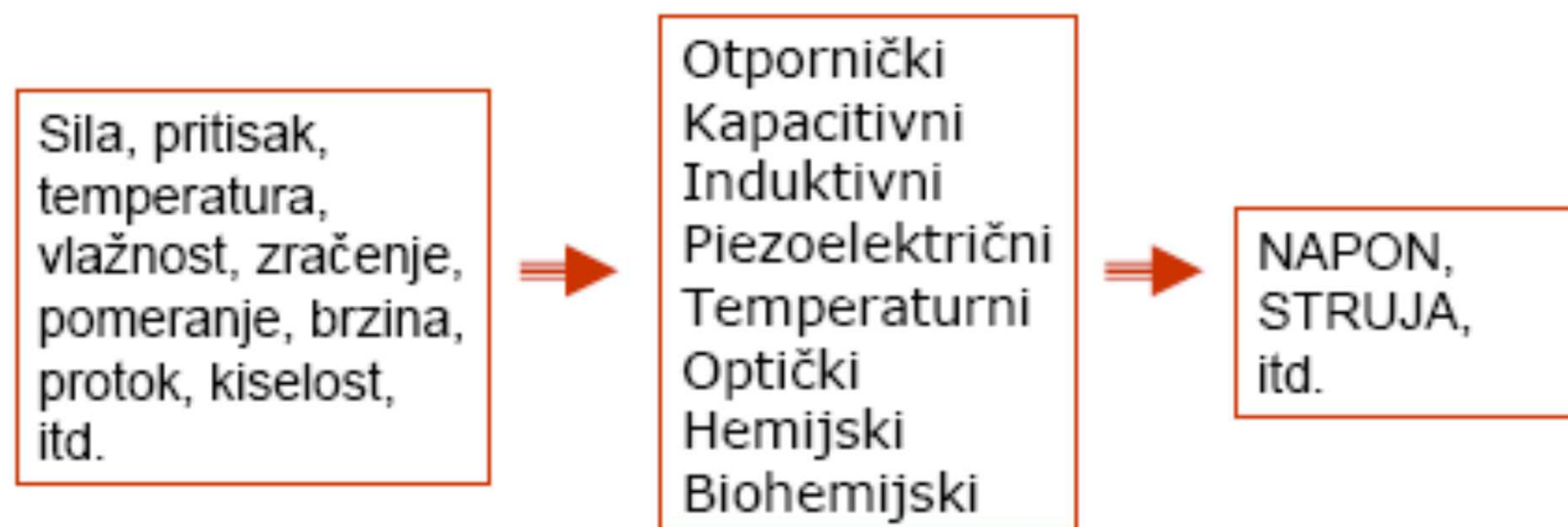
Jezgro

Tranzistor

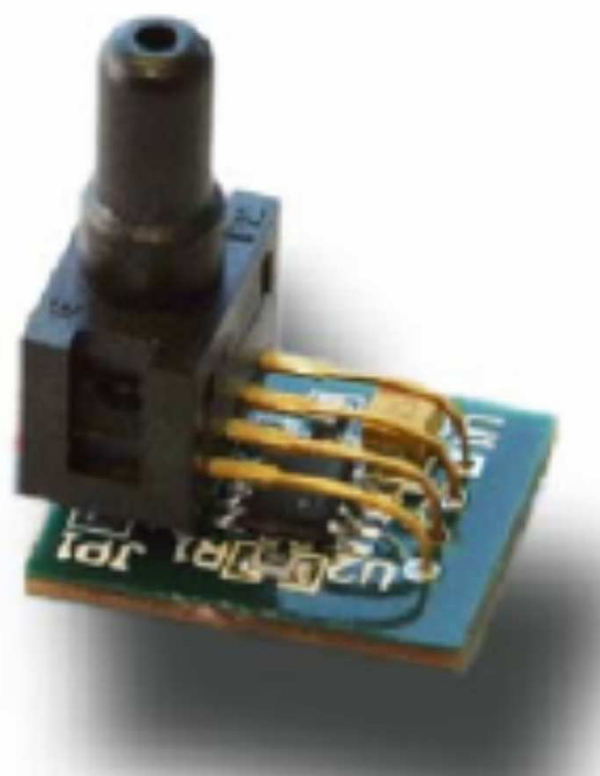
Ćelijski aparat

Proteini

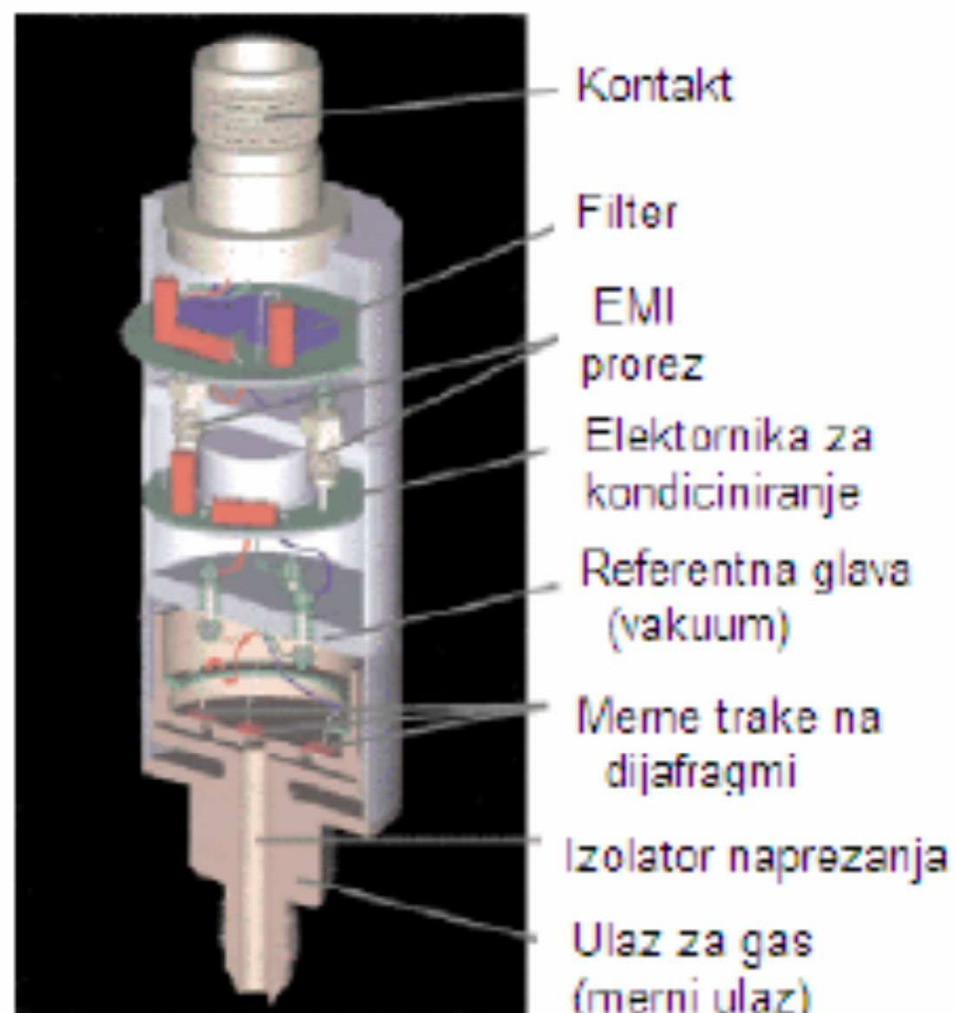
Senzori



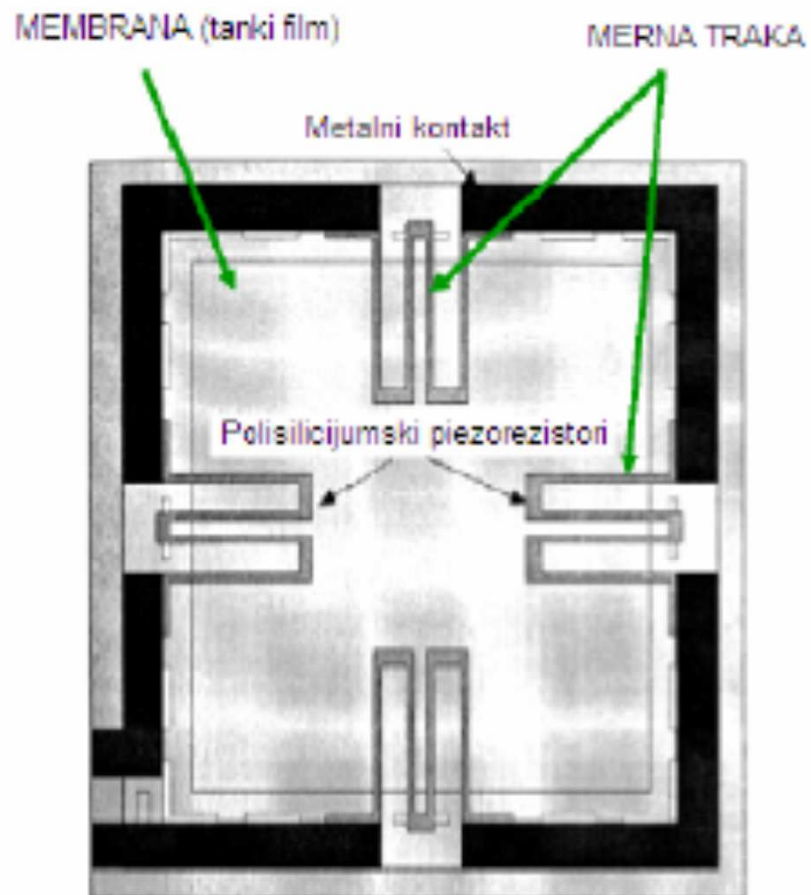
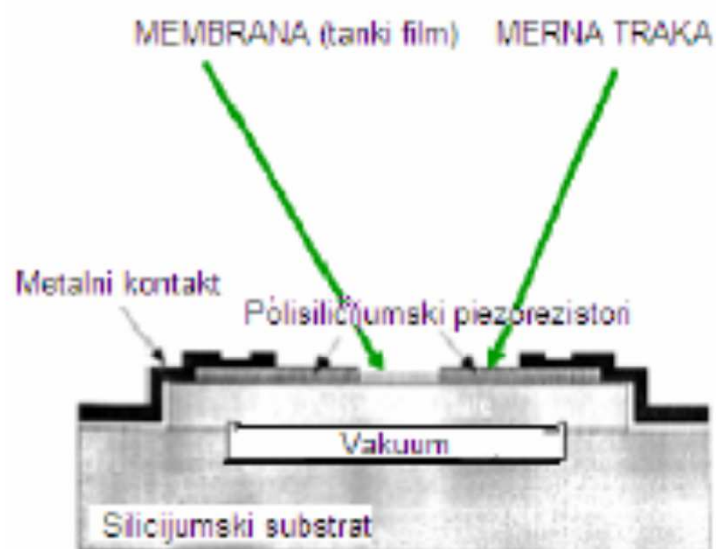
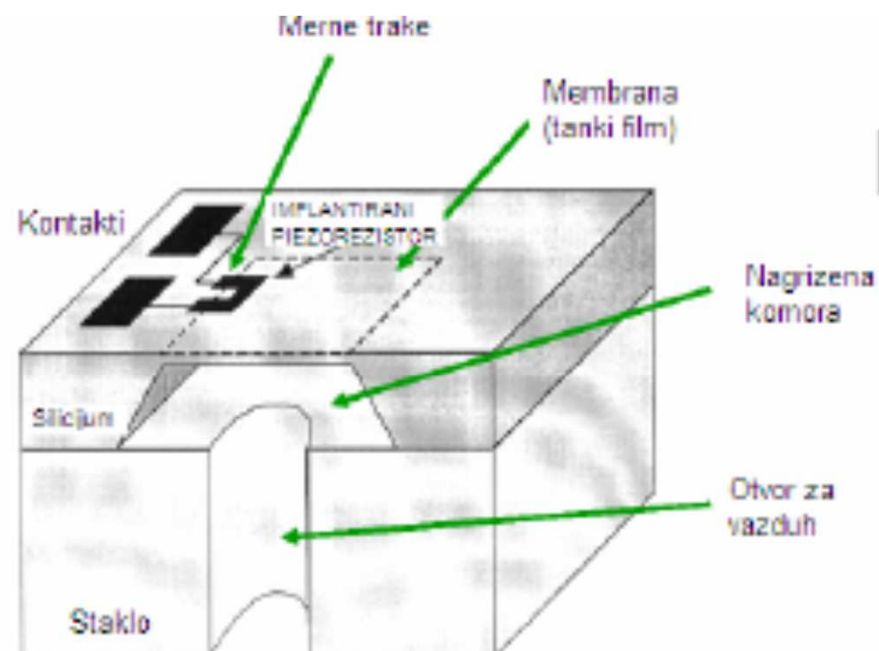
MEMS senzor pritiska



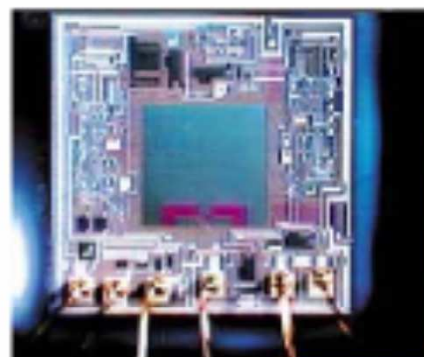
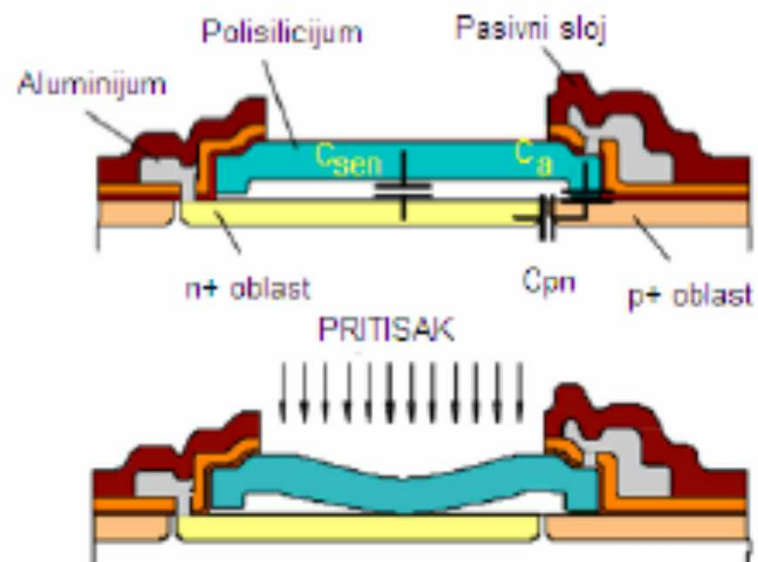
SENZORI PRITISKA



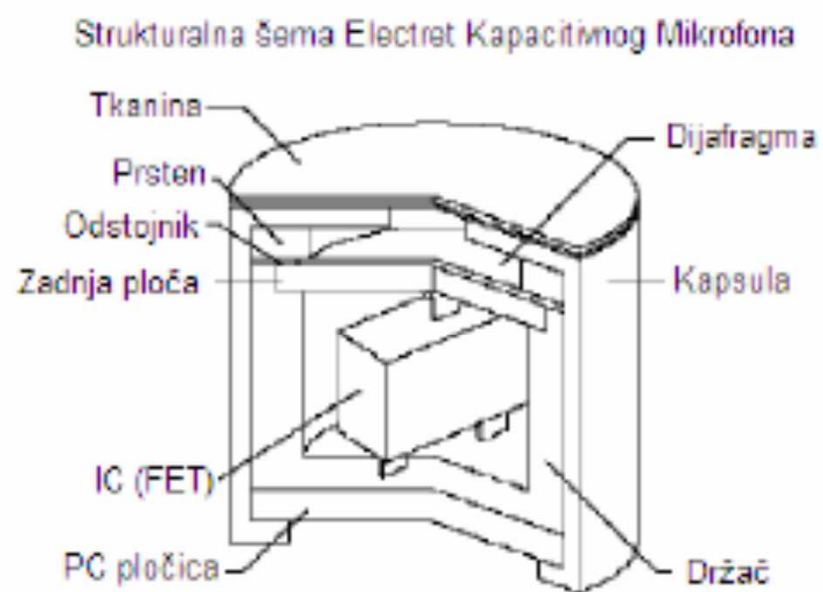
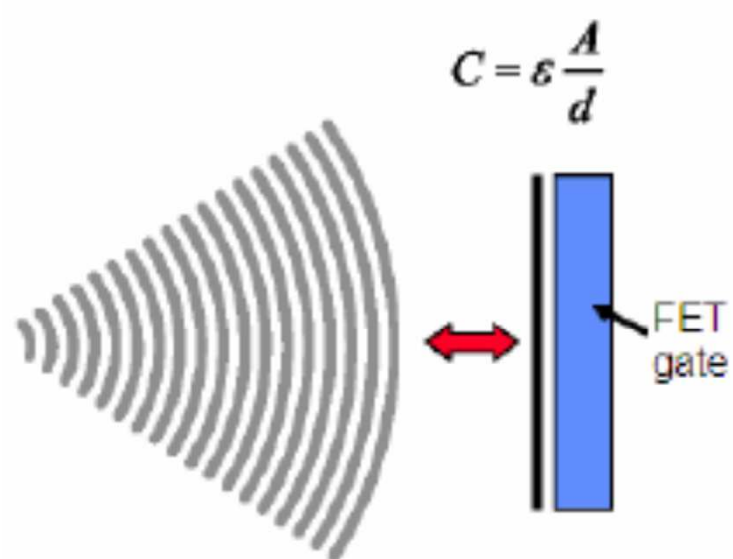
MEMS senzor pritiska



MEMS senzor pritiska

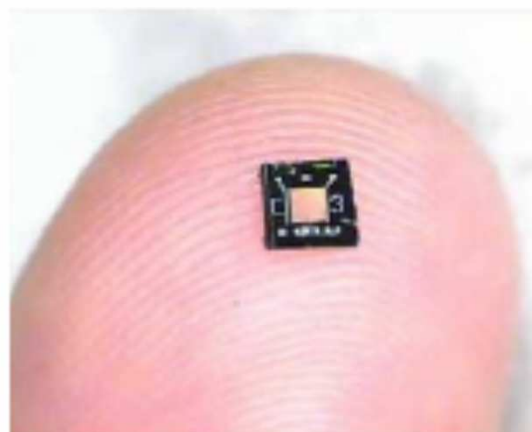
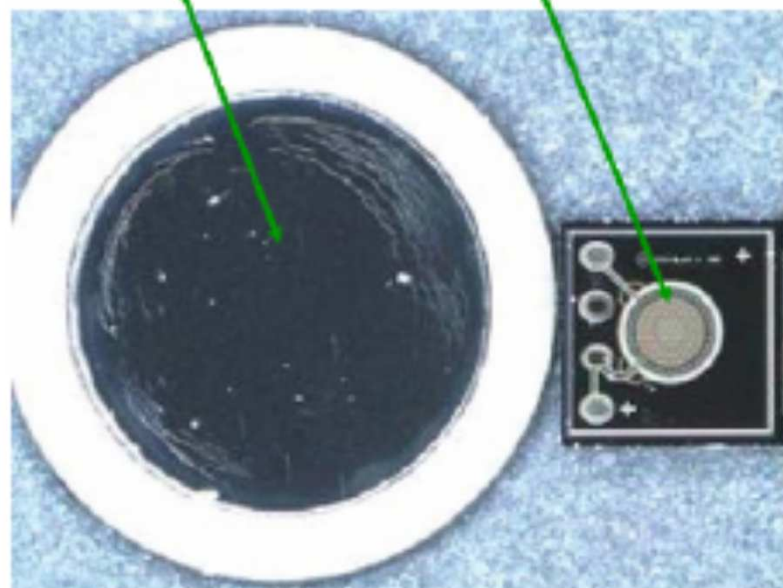


ELECTRET KAPACITIVNI MIKROFON



ECM mikrofon

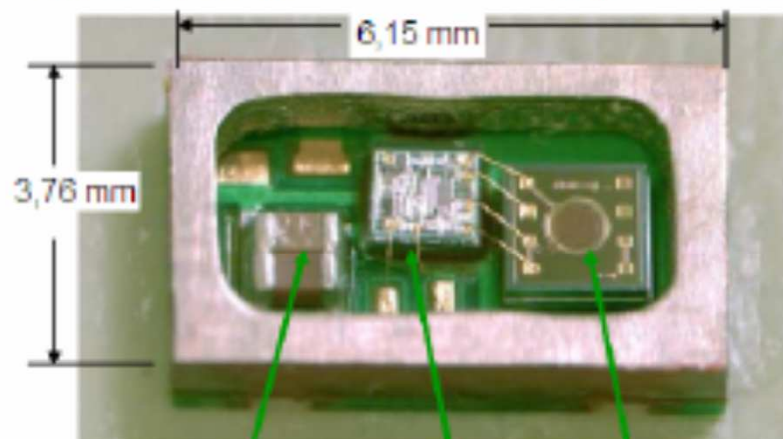
MEMS mikrofon



MEMS mikrofon

SiSonic SP0103N

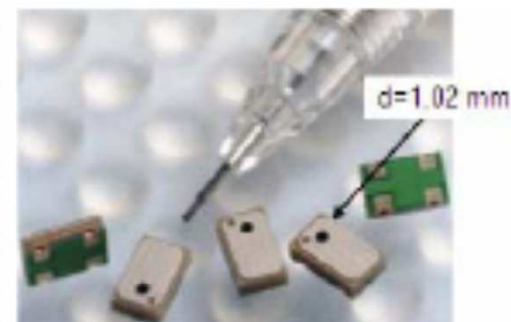
Visina = 1,45 mm



Pasivni filter

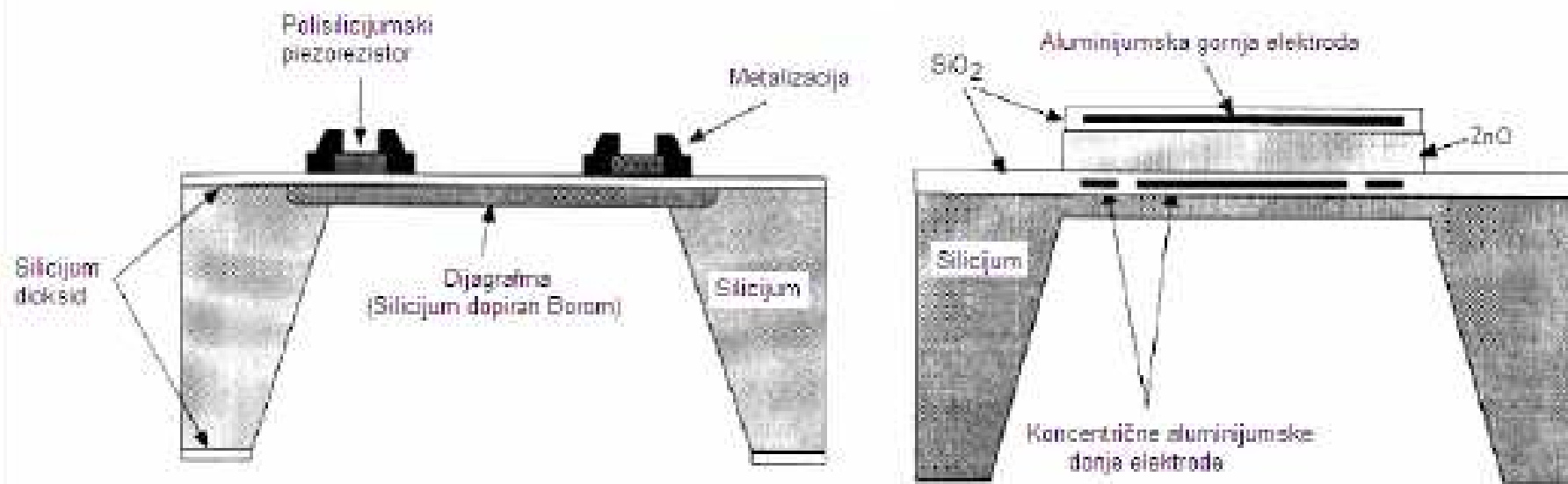
Aktivne komponente

MEMS dijafragma

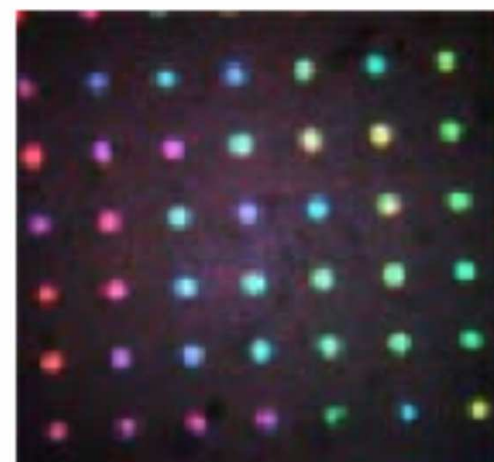
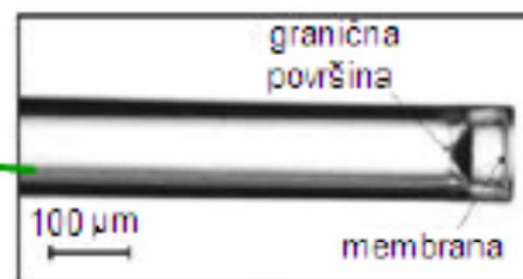
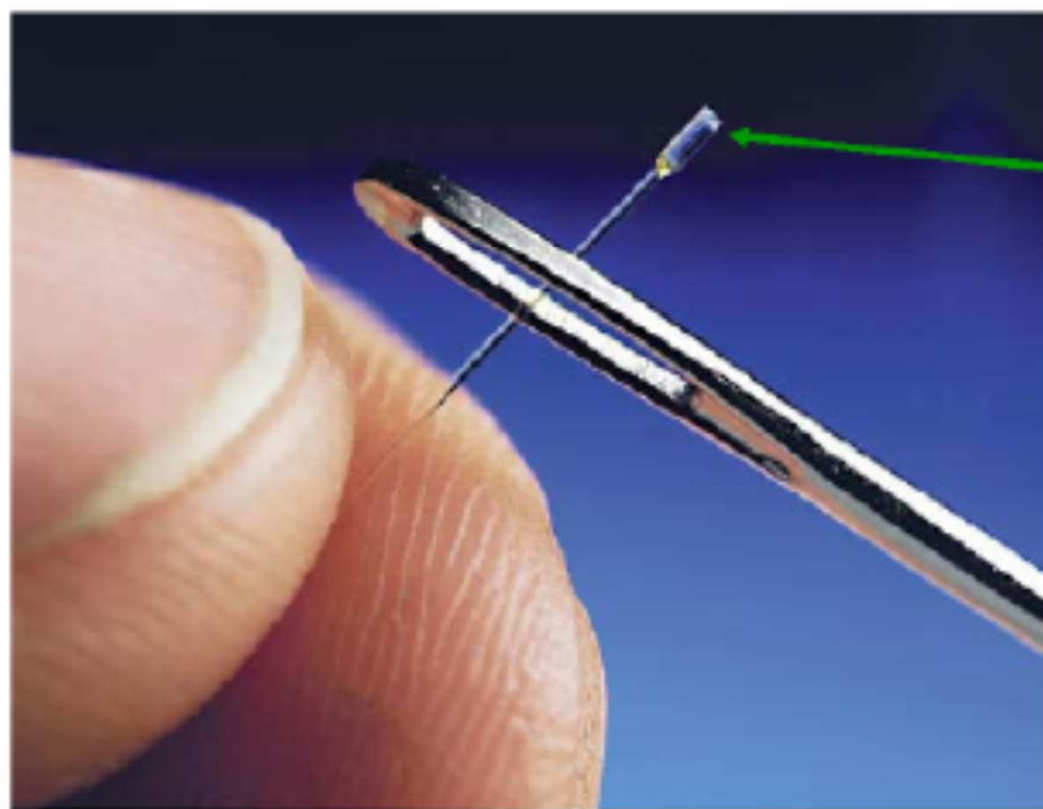


MEMS silicijumaka dijafragma 0.5 mm u prečniku, 1 μm debljine sa 4 μm procepom

MEMS mikrofon



Optički senzor pritiska



Matrica optičkih membranskih senzora

MEMS aktuatori

- **Mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS)** predstavljaju integraciju mehaničkih elemenata, senzora, aktuatora i elektronike na zajedničkom silicijskom supstratu, korišćenjem mikrofabričke (mikromašinske) tehnologije.
- Dok je standardna proizvodnja elektroniskih uređaja temeljena na integrisanim kolima, odnosno sekvencom njihovih procesa (npr. CMOS, bipolarni ili BICMOS procesi), *mikromehaničke komponente se proizvode korištenjem kompatibilnih “mikromašinskih” procesa koji selektivno ugraviravaju dijelove silicijumskih podloga (wafer-a) ili dodaju nove strukturne slojeve za formiranje mehaničkih i elektromehaničkih uređaja.*

MEMS aktuatori

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

Fenomeni koji omogućavaju razvoj mikro aktuatora.

Piezoelektrički efekat

- Sila se generiše piezoelektričkim kristalima koji energiju dobijaju uslijed primijenjenog napona.
- Sile su velike, vrlo mali pomaci.
- Potrebni su veliki naponi. Relativno su komplikovani za izgradnju.

Termalni bimorfizam

- Primjena fenomena da svaki materijal ima karakteristično širenje pri promjeni temperature.
- Generišu veliku silu i mogu imati veliko pomjeranje.
- Ovi aktuatori imaju veliku vremensku konstantu i njihov rad jako zavisi od temperature.
- Upravljanje ovim aktuatorima je komplikovano.

MEMS aktuatori

Elektrostatički (kapacitivni) efekat

- Sila se generiše promjenom elektrostatičke energije, tj. promjenom napona ili količine nalektrisanja.
- Generišu se male sile i mali pomaci.
- Potrebni su veliki naponi.

Elektromagnetski efekat

- Sila se generiše promjenom magnetskog polja koje deluje na magnetski materijal.
- Pogodni su sa male sile.
- Proizvodnja namotaja je komplikovana.

Poređenje MEMS aktuatora

■ Elektrostatički aktuator

- mala gustoća sile,
- ograničen broj stupnjeva slobode (DOF),
- jednostavni za proizvesti.

■ Piezo aktuator

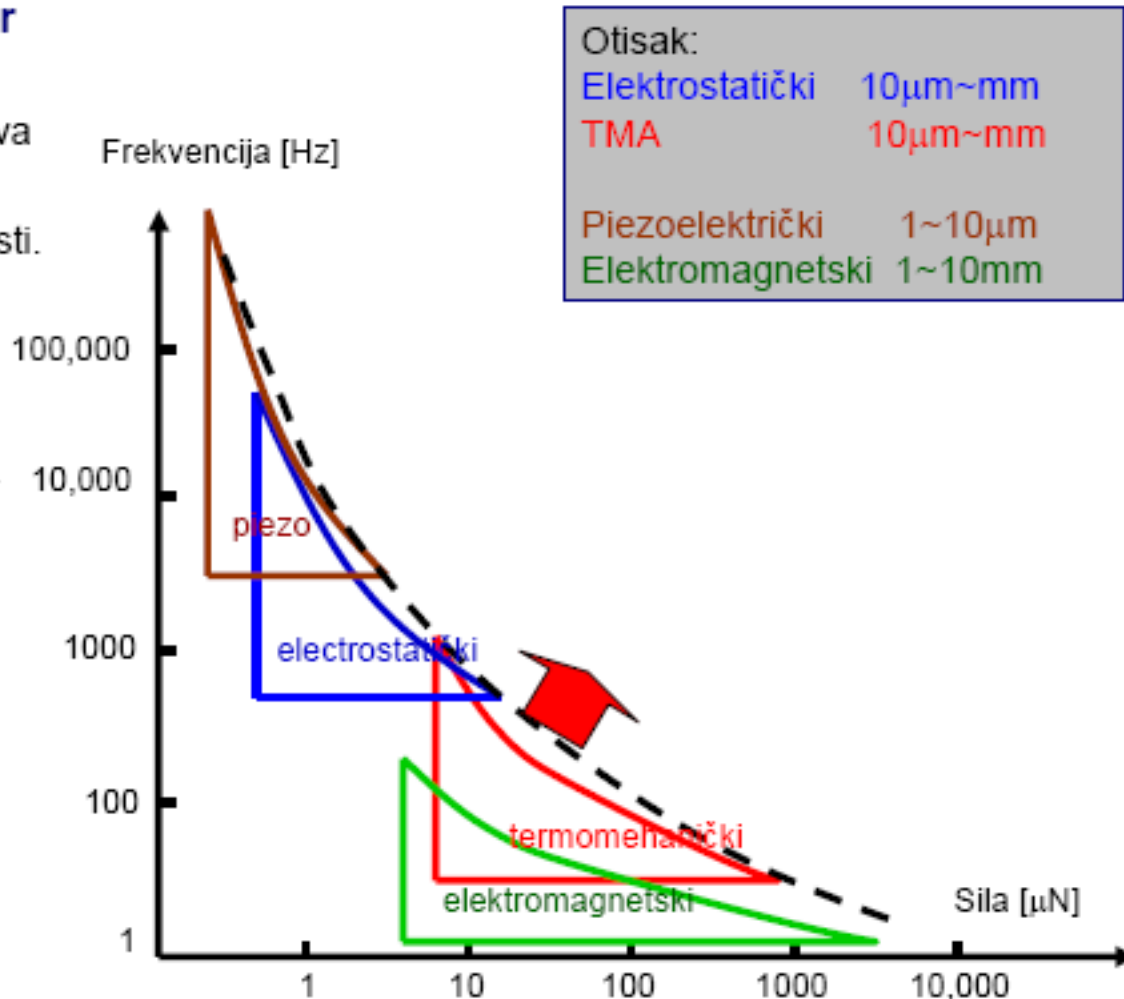
- mali pomaci uslijed djelovanja sile,
- obnovljiva proizvodnja.

■ Elektromagnetski

- složena proizvodnja.

■ Elektrotermalni

- mali propusni pojas,
- visok iznos sile,
- jednostavna proizvodnja.



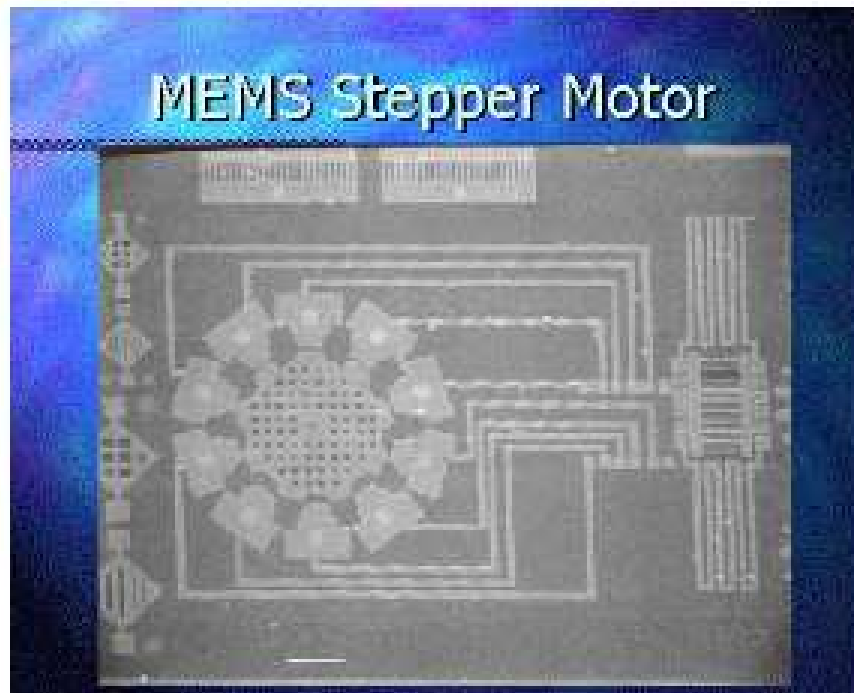
Poređenje MEMS aktuatora

Table 1: Energy and force density for different micro-actuators

Actuation type	Energy density	Force density	Energy density ratios	Ease of Fabrication
Electrothermal	$U = V^2 / \rho L^2$	$F = E_{\gamma} \cdot (\alpha \Delta T) / L$	1	+
Electrostatic	$U = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 / 2$	$F = n \cdot (\sigma \cdot E)$	$\sim 10^{-4}$	+
Electromagnetic	$U = B^2 / 2\mu$	$F = n \cdot \left(\frac{J}{c} \times B \right)$	$\sim 10^{-2}$	--
Piezoelectric	$U = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 / 2$	$F = n \cdot (\sigma \cdot E)$	$\sim 10^{-1} - 10^{-2}$	---

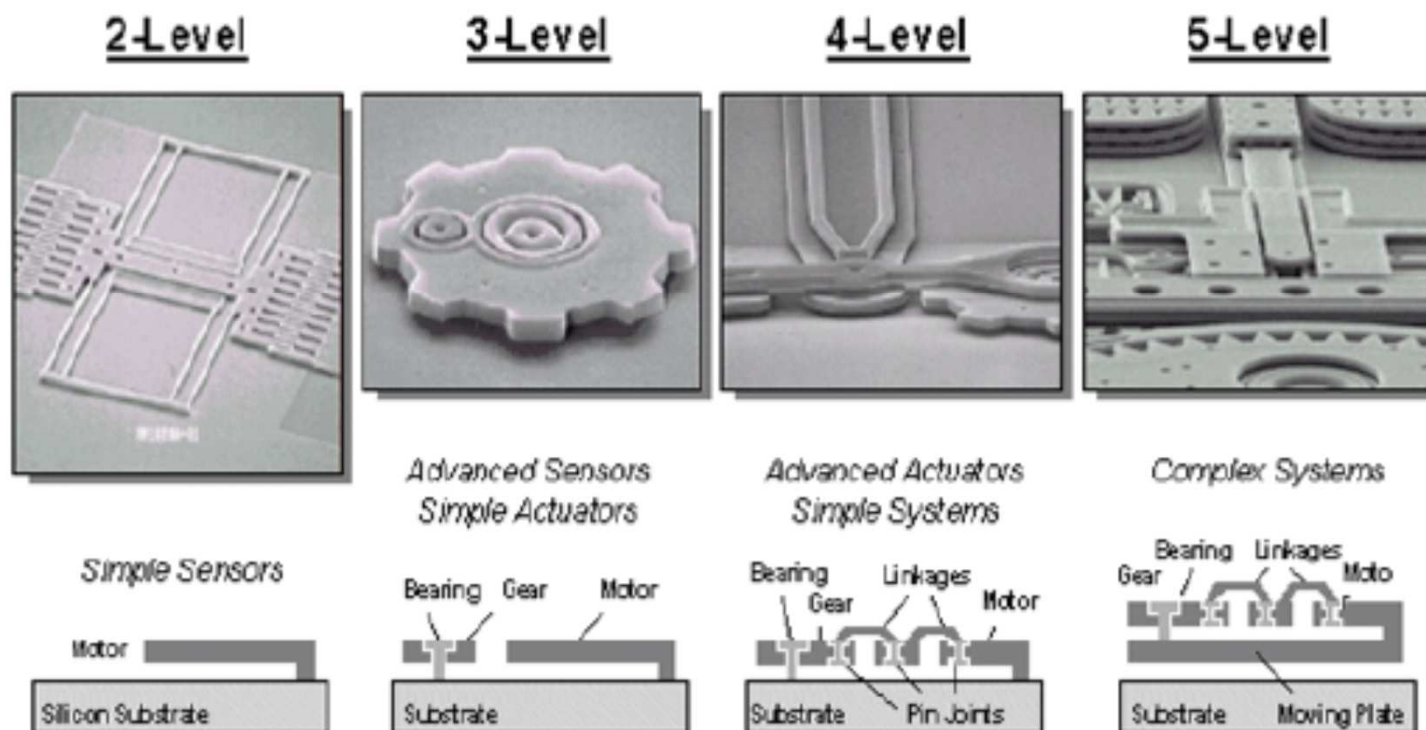
Vrsta mikroaktuatora	Max. pomak	Max. sila	Max. brzina	Sila/ područje	FAB	Napon
Termalni	$\sim 100 \mu\text{m}$	1-10mN	10s -1kHz	1	dobra	1-5V
Elektrostatički	1	10^{-2}	10^2	10^{-4}	dobra	$\sim 100\text{V}$
Elektromagnetski	10^{-1}	10^{-2}	10^1	10^{-2}	složena	1-5V
Piezo	10^{-2}	10^{-3}	10^2	10^{-2}	složena	10-100V

MEMS koračni motor



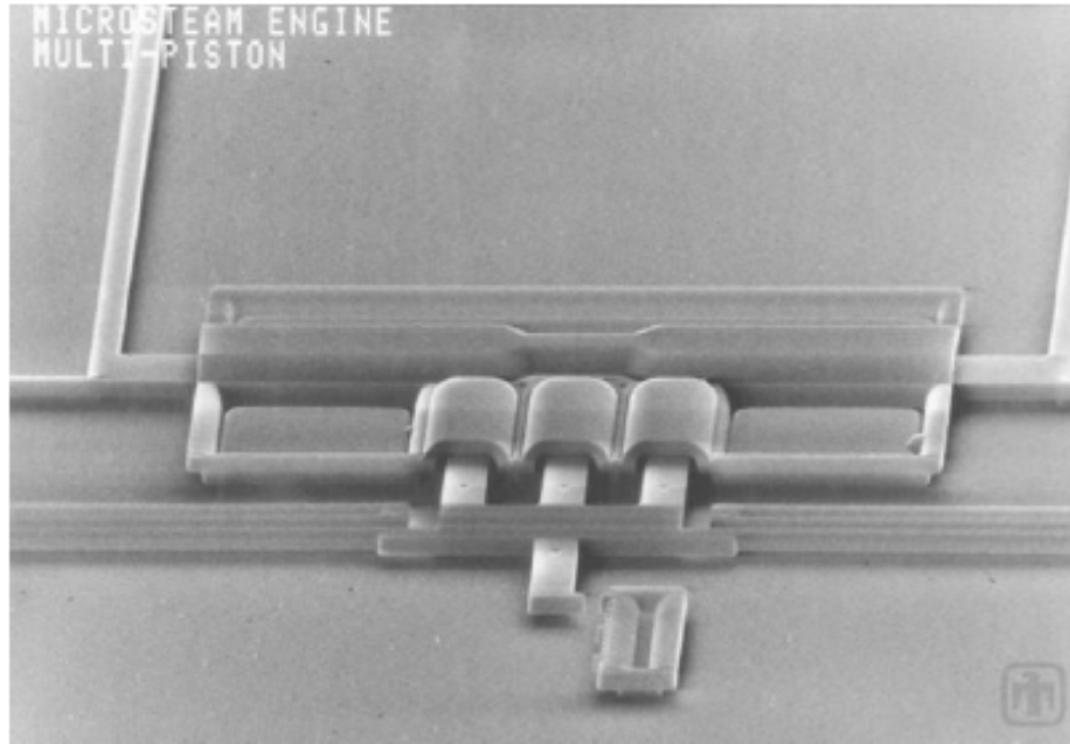
- Motor je veoma sličan standardnim koračnim motorima, izuzev što je dvodimenzionalan (2D) i veoma mali.

MEMS slojevi (razine)



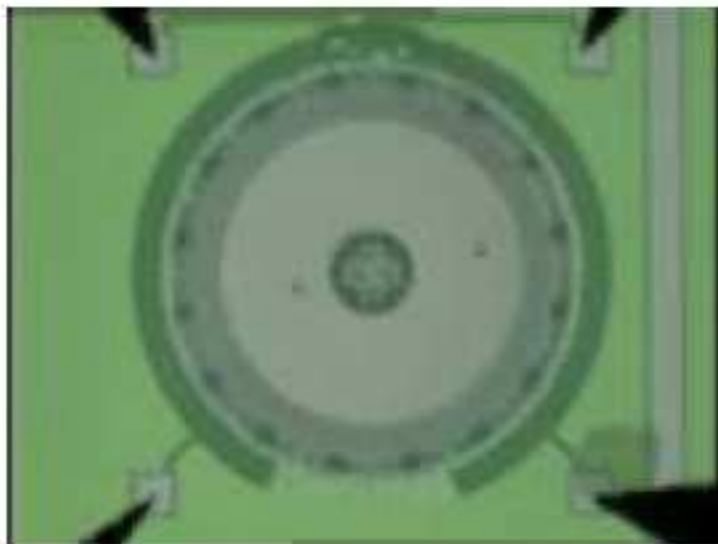
- Potencijalna složenost MEMS uređaja povećava se eksponencijalno sa brojem procesnih karakteristika i pojedinačnih strukturalnih slojeva.

MEMS parna mašina (višeclipna)

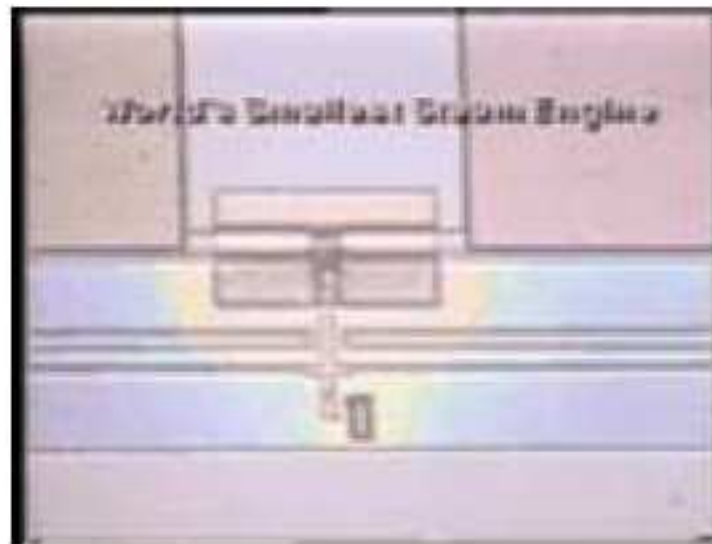


- Voda unutar tri kompresiona cilindra se zagrijava pomoću električne struje i isparava, izbijajući klip.
- Kada se prekine dotok struje, kapilarne sile uvlače klip.

MEMS rotacioni motor i parna mašina

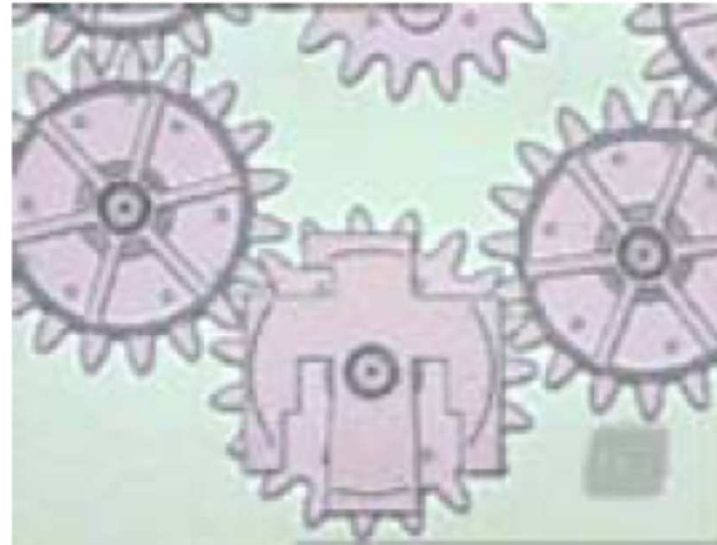
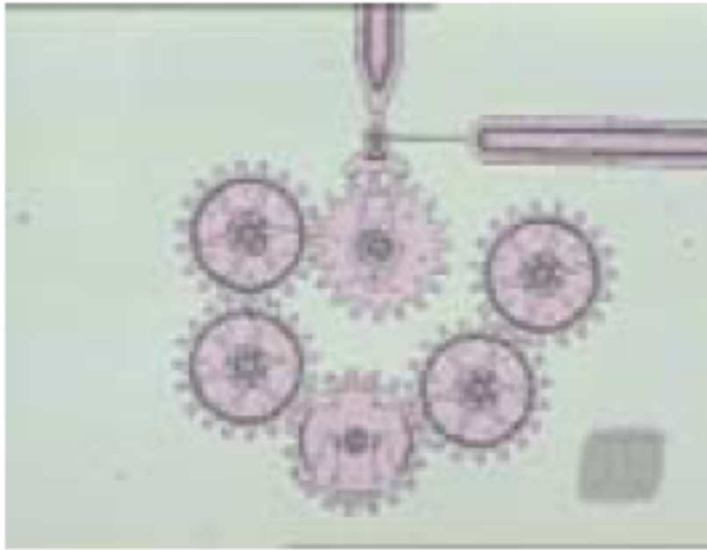


ROTACIONI MOTOR



PARNA MAŠINA JEDNOKLIPNA

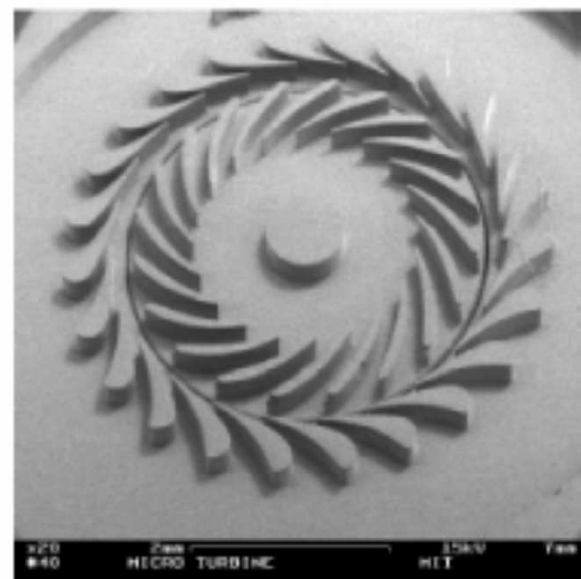
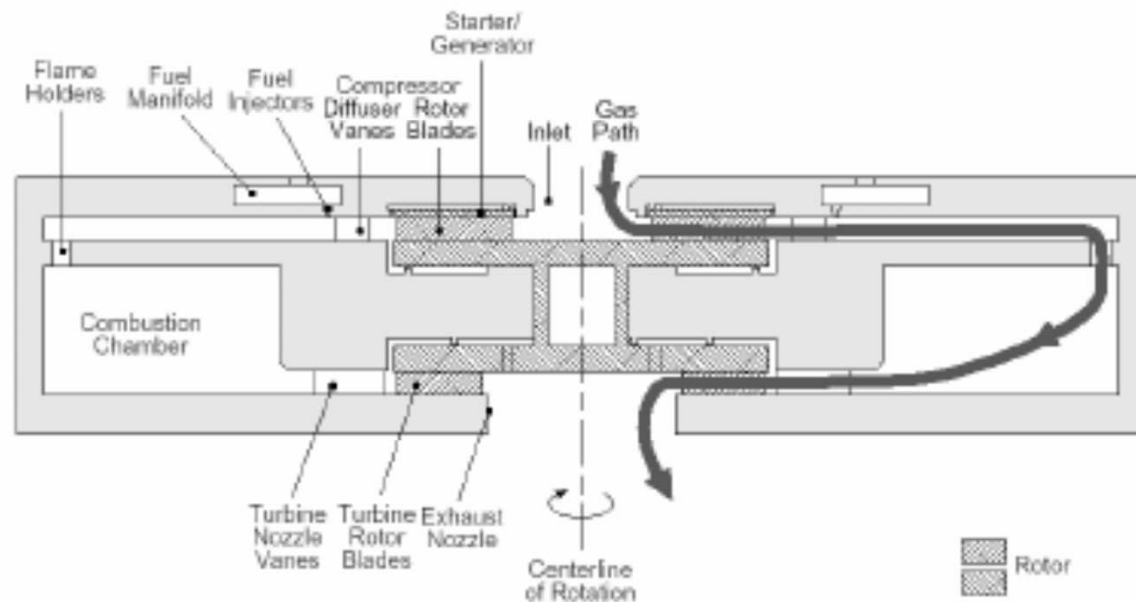
MEMS prenosni mehanizam



Planarni prijenosni mehanizam
sa 6 zupčanika.



MEMS mikroturbina

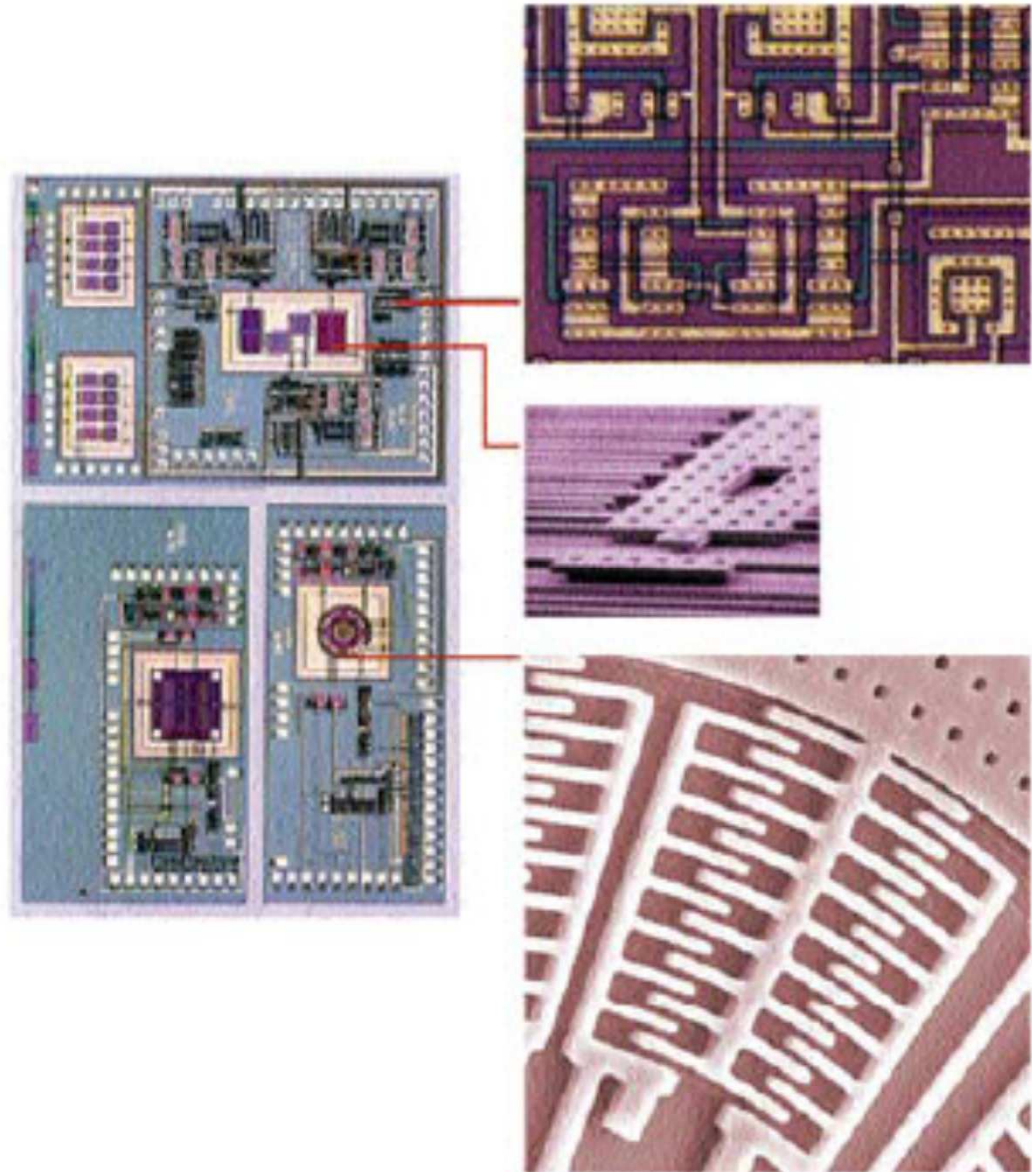


- 80 W gasna turbina dizajnirana i izgrađena na MIT-u za MEMS energetske aplikacije.

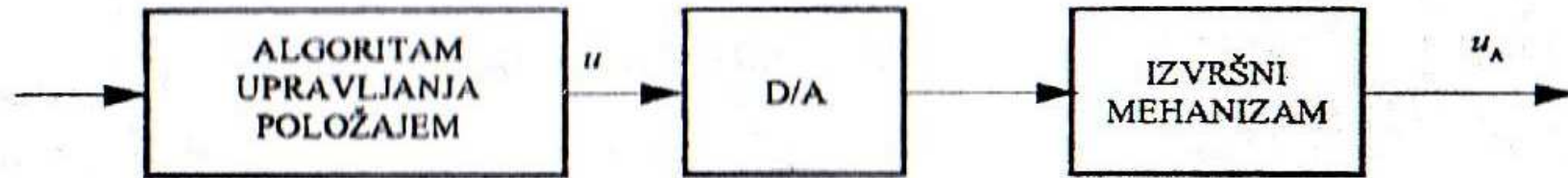
Integrirani MEMS

Mikro-inercijalni mjerni sistem sa šest stepeni slobode koji kombinuje mikroelektronska kola (gornja desna slika) sa parom mikromehaničkih elemenata:

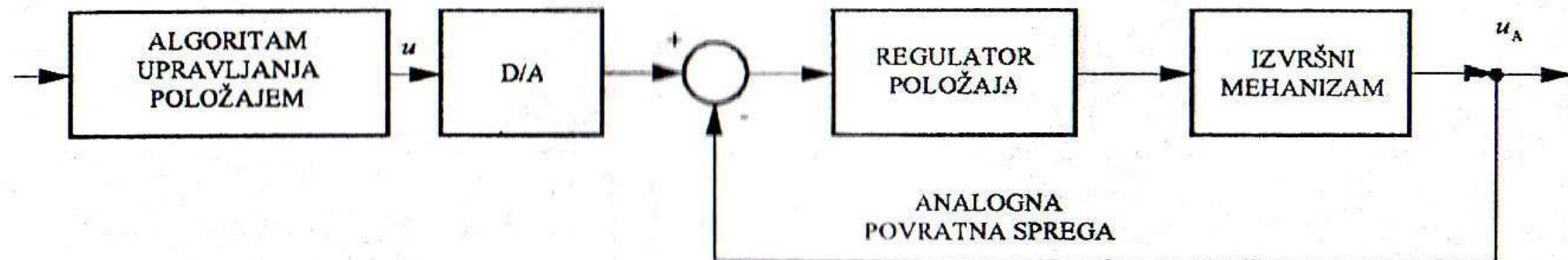
- akcelerometar (slika u sredini desno) i
- žiroskop (donja desna slika).



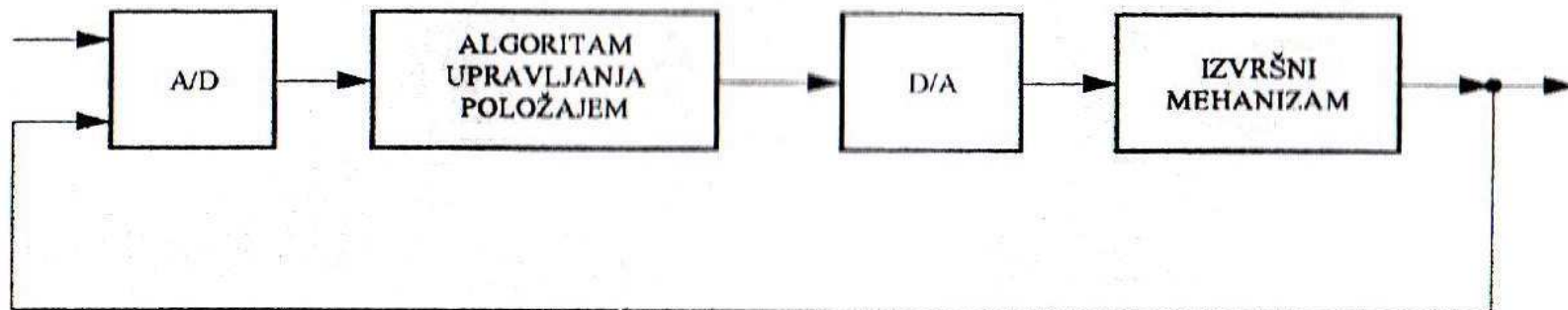
Način povezivanja izvršnih mehanizama sa upravljačkom strukturo



Direktno upravljanje položajem



Upravljanje sa neprekidnom povratnom spregom po položaju



Upravljanje sa diskretnom povratnom spregom po položaju