

Definicija aktuatora

- **Aktuatori** su uređaji koji služe za pomeranje ili kontrolisanje mehanizama ili sistema na drugi način. Aktuatori predstavljaju mehanizam kojim upravljački sistem deluje na okolinu.
- Aktuatori najčešće od kontrolera dobijaju signal male snage, a imaju dodatno napajanje iz koga dobijaju snagu za obavljanje svojih zadataka.
- Postoji veliki broj komercijalno dostupnih aktuatora:
 - Prekidači (releji)
 - Grejači
 - Motori (DC, AC)
 - Hidraulični i pneumatski aktuatori (u industriji)
 - Piezoelektrični aktuatori
 - Aktuatori koji sadrže motor kao sastavni element (ventili, pumpe, ...)



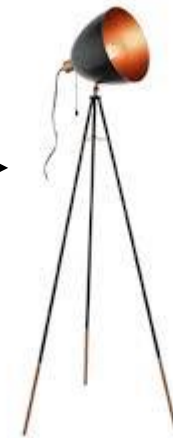
Relej - uloga

- Relej je električno upravljani prekidač
- Releji se koriste kada je potrebno kontrolerom niske snage (najčešće mikrokontroler koji radi na malim naponima i sa jednosmernom strujom) upravljati prekidanjem u kolu sa visokom snagom (često visokim i naizmeničnim naponom)

5V, DC

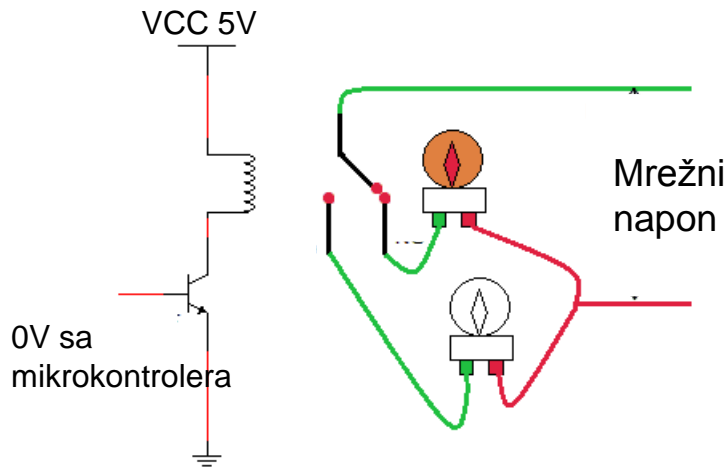


220V, AC

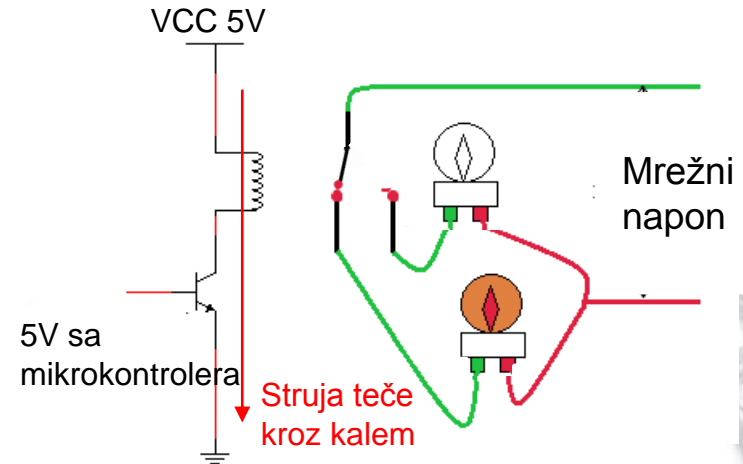


Relej – način rada

Nizak naponski nivo na kontrolnom ulazu u relej – prekidač u standardnom položaju



Visok naponski nivo na kontrolnom ulazu u relej, struja protiče kroz kalem – magnetna sila privlači dač u drugi položaj



Oznake na relejima

- **NO (normally open)** konektori zatvaraju kolo kada je relej aktiviran (visok naponski nivo na ulazu)
- **NC (normally closed)** konektori zatvaraju kolo kada je relej neaktivan (nizak naponski nivo na ulazu)

Maksimalna struja koju relej može da provodi i prekida - 10A

Maximalni napon na terminalima releja koji može da podnese - 250V AC i 30V DC

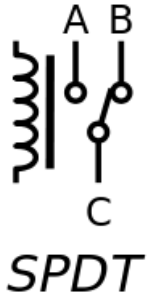


Vrste releja

- **SPST (Single Pole Single Throw)** – dva terminala koja mogu biti povezana ili ne



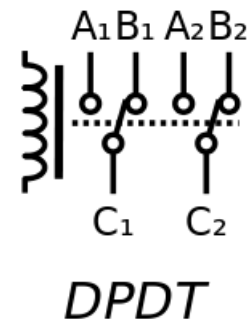
- **SPDT (Single Pole Double Throw)** – jedan zajednički terminal koji može biti povezan na jedan od dva druga



- **DPST (Double Pole Single Throw)** – dva para terminala od kojih su oba istovremeno spojena ili odvojena



- **DPDT (Double Pole Double Throw)** – dva zajednička terminala koja mogu da menjaju položaj



Grejači

- Grejač je električni element koji električnu energiju pretvara u toplotnu na bazi rezistivnog ili Jouleovog efekta.
- Različite vrste grejača:

- Metalni
- Keramički
- PTC
- Polimerni

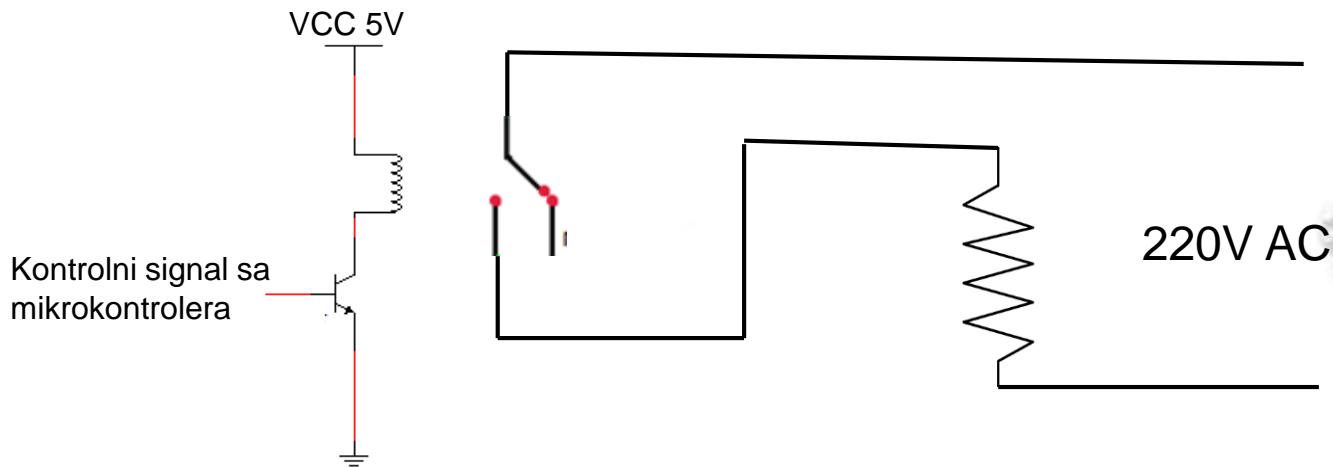


- Simboli grejača u električnim šemama



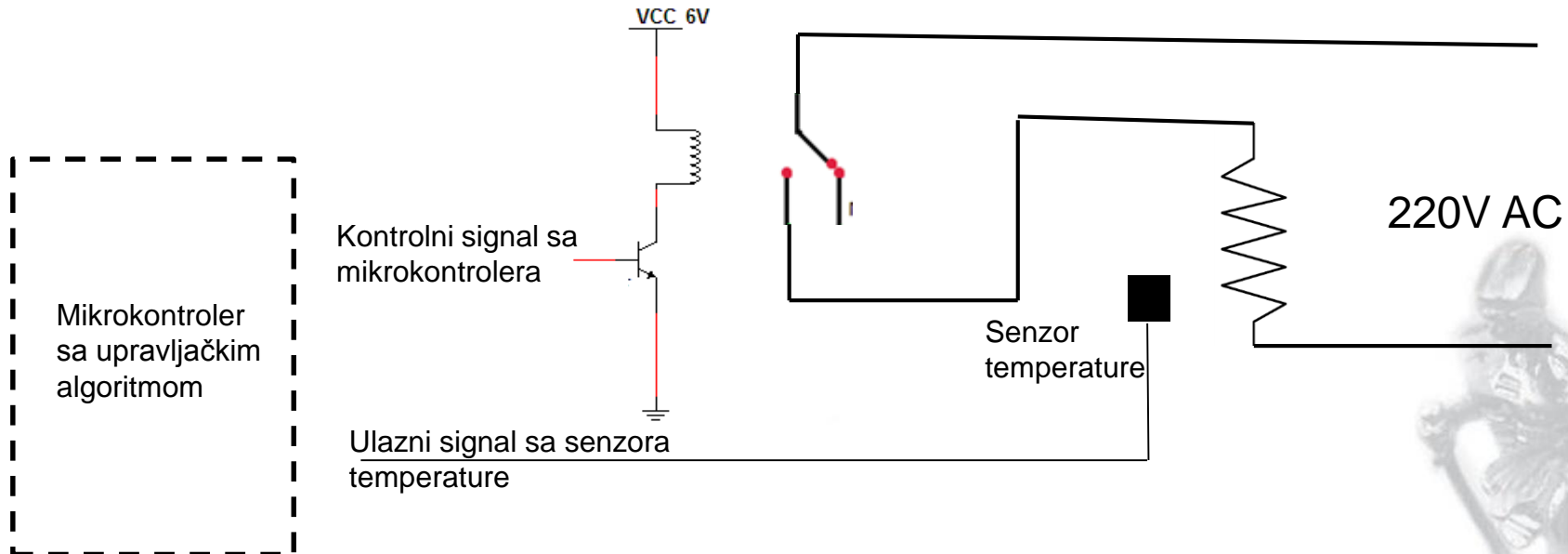
Kontrola rada grejača

- Da bi proizvodio toplotnu energiju, grejaču je potrebna makar ekvivalentna količina električne energije
- Grejači najčešće koriste mrežni napon za napajanje i njima se ne mogu upravljati direktno uz pomoć mikrokontrolera
- Najčešće se radom grejača upravlja uz pomoć releja:



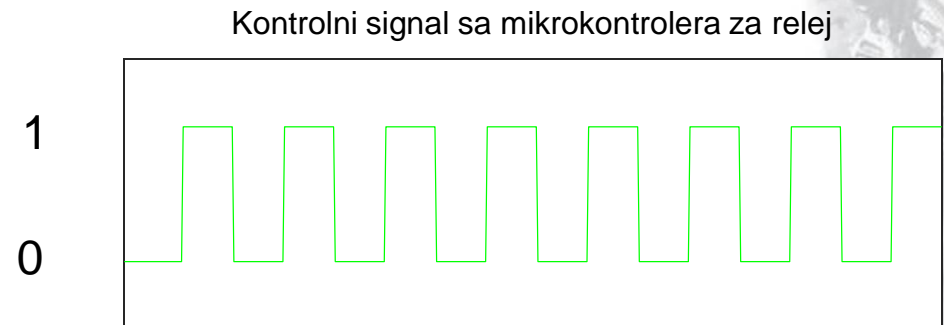
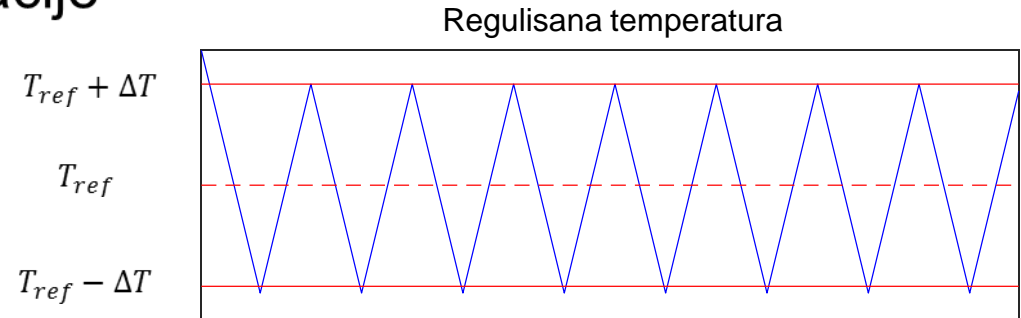
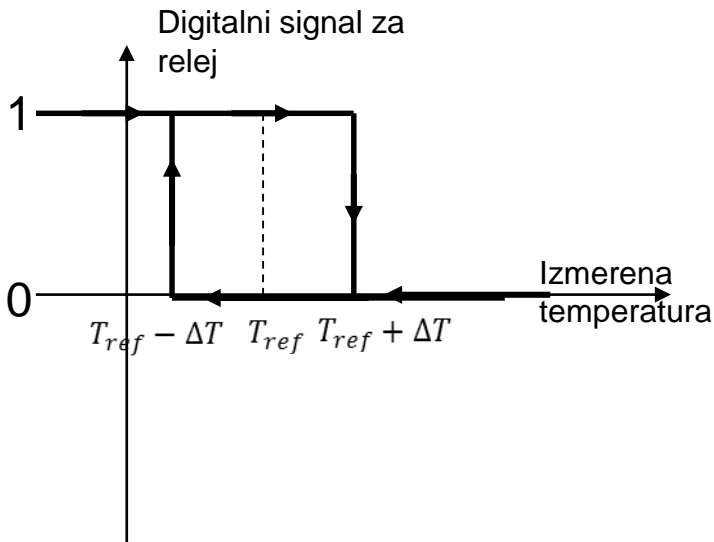
Kontrola rada grejača

- Najjednostavniji način kontrole temperature uz pomoć grejača je jednostavan prekidni kontroler sa histerezisom



Kontrola rada grejača

- Ako temperaturu treba regulisati da bude oko vrednosti T_{ref} , onda se grejač uključuje kada temperatura padne ispod $T_{ref} - \Delta T$, a isključuje se kada temperatura poraste na $T_{ref} + \Delta T$, gde je ΔT parameter koji treba izabrati u zavisnosti od želje za tačnoću regulacije



Elektromotori

- Elektromotori su električne mašine koje pretvaraju električnu energiju u mehaničku
- Pretvaranje energije se najčešće dešava usled interakcije magnetnog polja stalnog magneta i strije u namotajima usled čega nastaje rotaciona sila u motoru
- Prema načinu rada motori se dele na:
 - DC motore sa četkicama
 - DC motore bez četkica (BLDC)
 - Sinhronne mašine
 - Asinhronne mašine

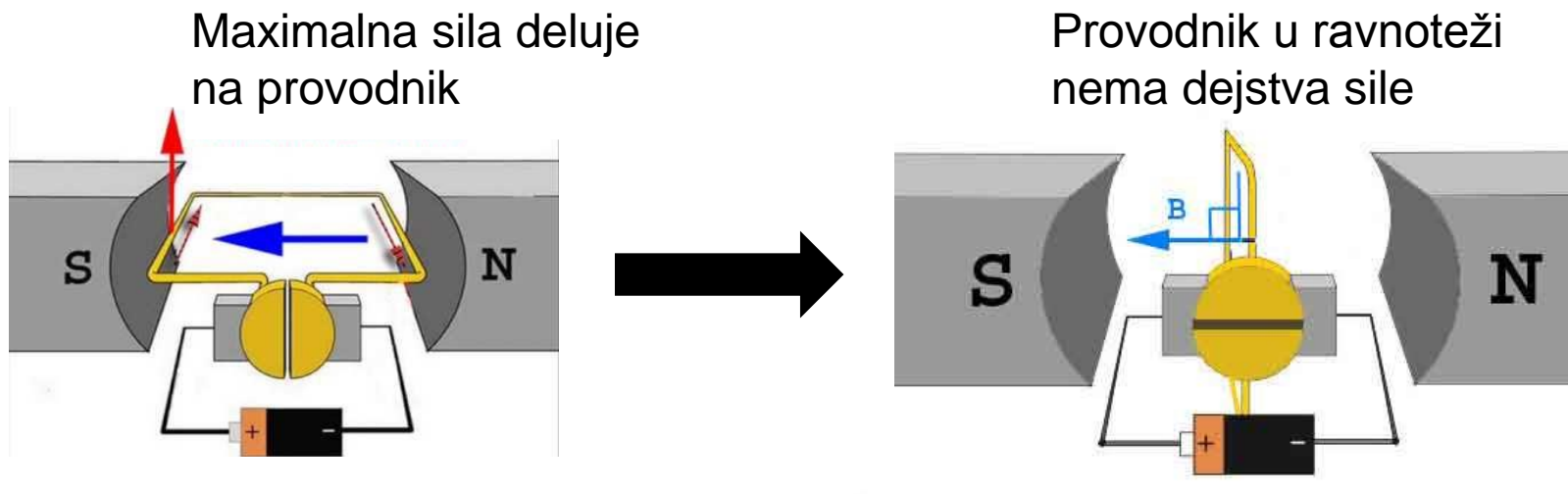
motori na jednosmernu struju

motori na naizmeničnu



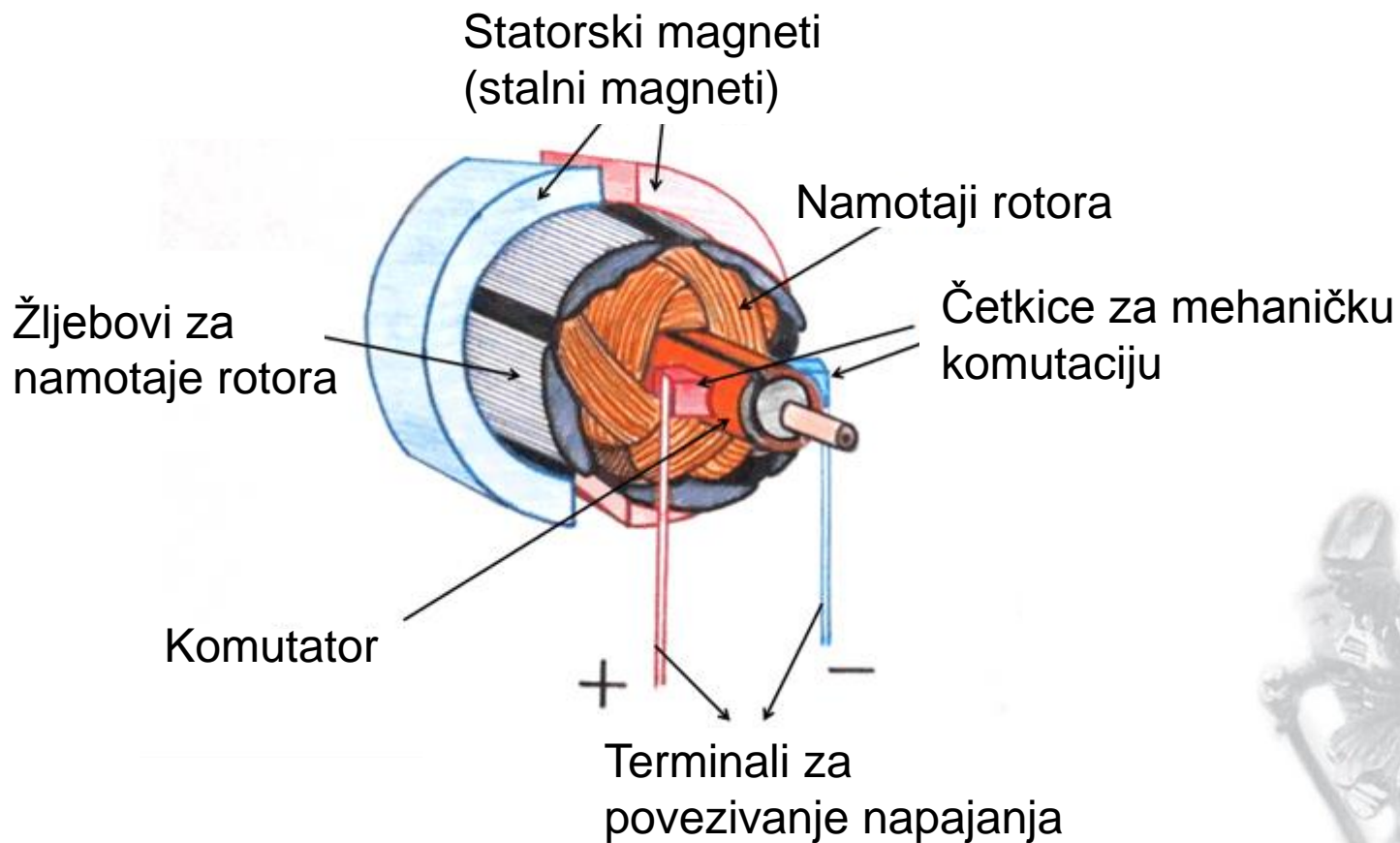
Osnovni princip rada elektromotora

- Na provodnik u magnetnom polju deluje sila koja teži da dovede površinu koju opisuje provodnik da bude normalna na linije magnetnog polja



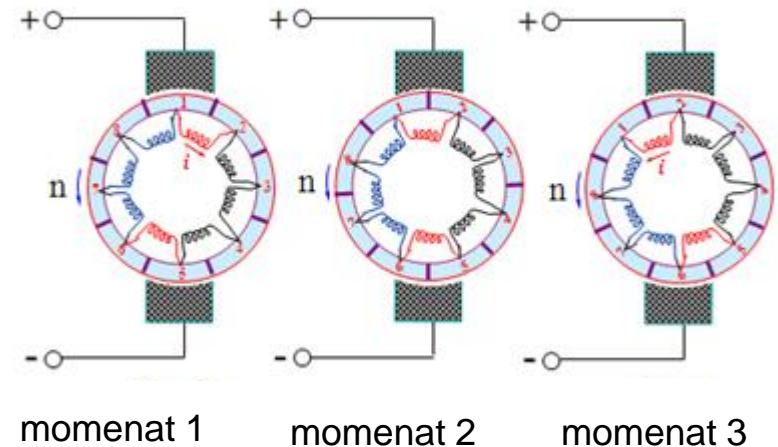
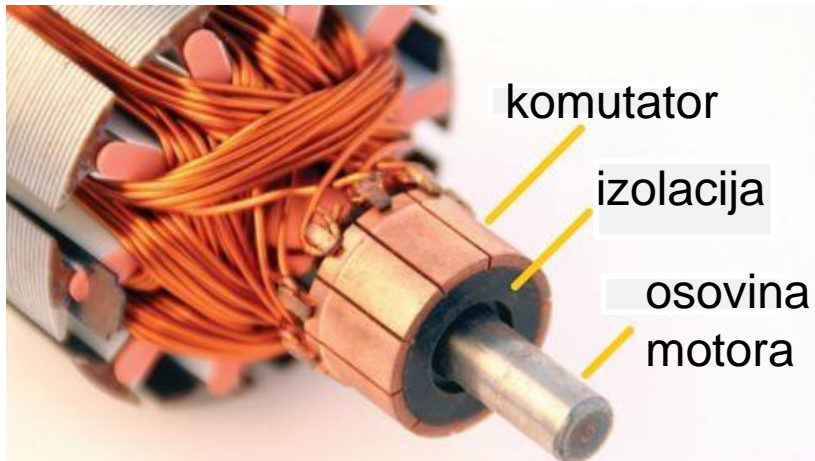
- Sa statorom koji je stalni magnet i rotorom koji se sastoji od većeg broja provodničkih površina u koje se po potrebi injektuje struja (mehanička komutacija)

Osnovni delovi DC elektromotora



Mehanička komutacija

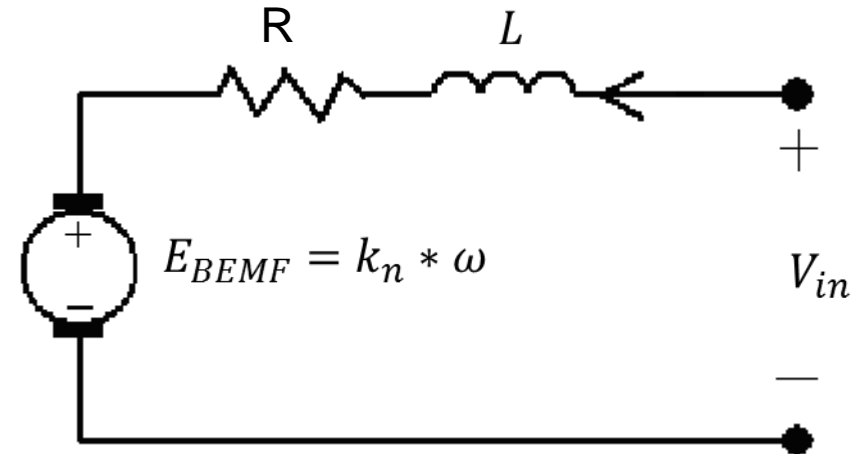
- Sistem komutatora i četkica obezbeđuje da struja protiče uvek kroz namotaj čija je površina paralelna sa linijama magnetnog polja statora – motor uvek proizvodi maksimalni mogući momenat
- Četkice se vremenom troše i ograničavaju životni vek motora



Električni model DC motora

- U električnom smislu, DC elektromotor možemo predstaviti ekvivalentnom električnom šemom koja se sastoji od kalema, otpornika i naponskog generatora

V_{in}	Ulazni napon motora
R	Otpornost namotaja
L	Induktivnost namotaja
E_{BEMF}	Indukovana elektromotorna sila
ω	Ugaona brzina motora
k_n	Brzinska konstanta motora



$$L \frac{dI}{dt} = V_{in} - R * I - k_n * \omega$$

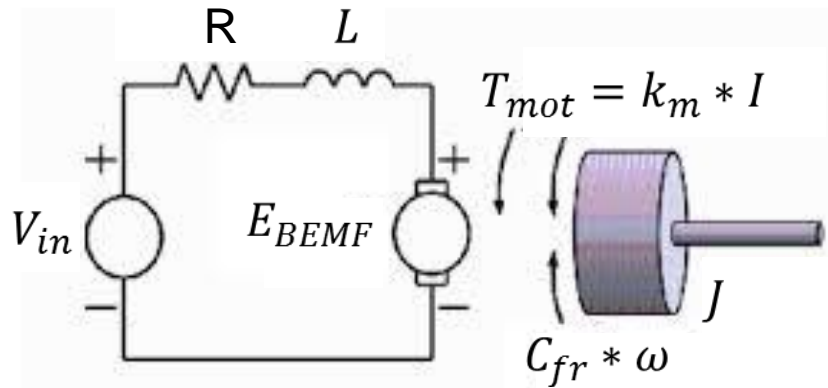
Mehanički model DC motora

- Mehanički model zavisi od mehaničkog sistema koji se pogoni i koji je prikačen na osovinu motora
- Najčešće se koristi jednostavan mehanički model koji u obzir uzima moment inercije i viskozno trenje

T_{mot} Moment koji generiše motor

k_m Momentna konstanta motora

C_{fr} Konstanta viskoznog trenja



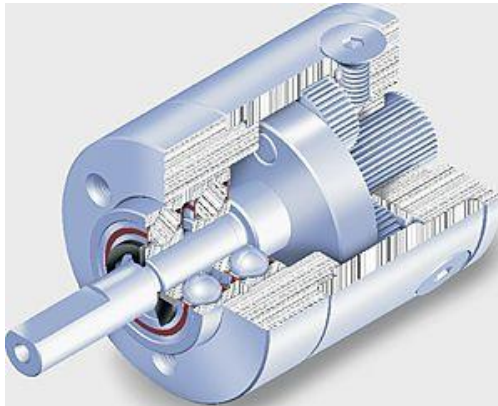
$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m * I - C_{fr} * \omega$$

θ Ugaoni položaj motora

$$\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$$

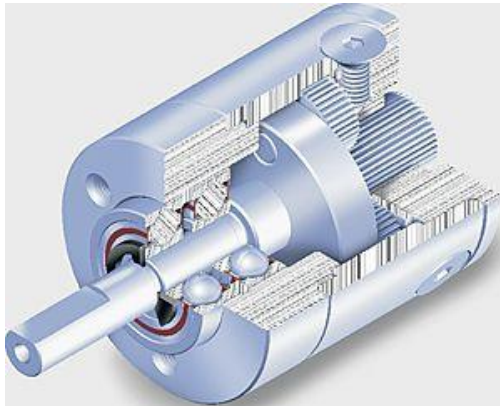
Reduktori

- Kompaktni DC motori obično mogu da dostignu relativno velike brzine (nekoliko desetina hiljada obrtaja u minutu) ali male momente (par stotina mNm).
- U praksi su često potrebne manje brzine a veći momenti kada se pomeraju teški objekti



Reduktori

- Reduktori su sačinjeni od sistema zupčanika kojima se prenosi kretanje.
- Prenosni broj reduktora N
- $\omega_{OUT} = \frac{\omega_{IN}}{N}$
- $T_{OUT} = N * T_{IN}$



Izbor motora i reduktora

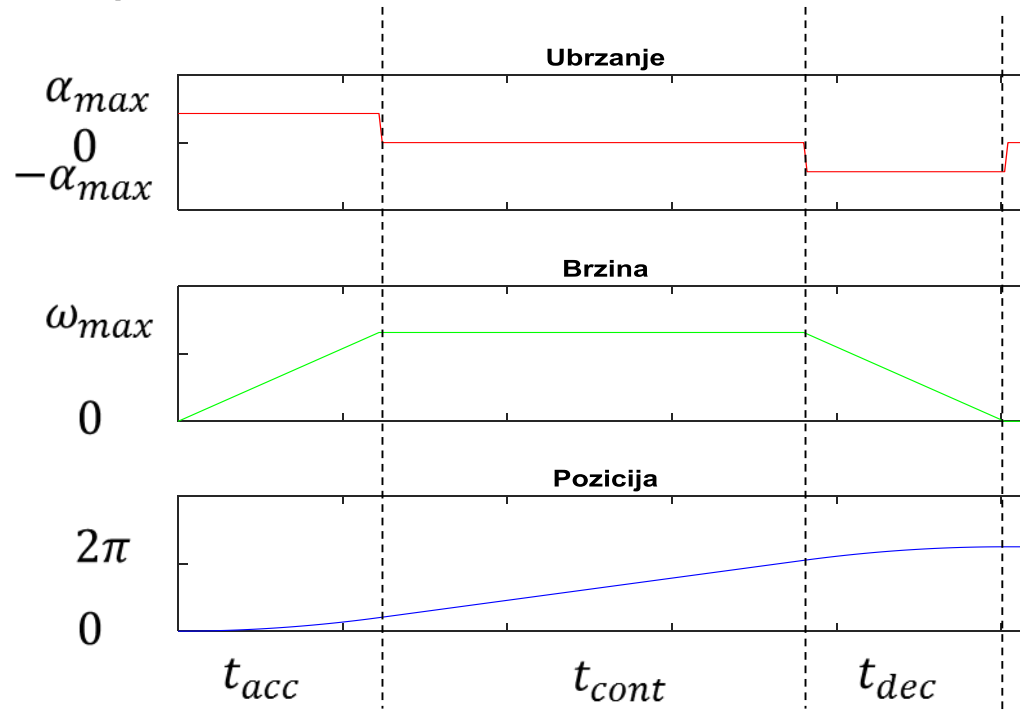
- Pravilan izbor reduktora i motora je ključan korak u dizajniranju bilo kog pametnog uređaja sa pokretnim delovima.
- Pravilan izbor ćemo razmotriti na **konkretnom primeru**:

Potrebno je odabrati motor (sa ili bez reduktora) koji treba da obrće disk momenta inercije J naizmenično u jednu i drugu stranu za čitav krug (jedan obrtaj) gde svaki pomeraj treba da traje T sekundi



Izbor motora i reduktora

- **Korak I: Analiza ciklusa pomeranja:**
- U okviru ovog koraka u odabiru određuje se kakv treba da bude profil pomeranja tetreta. Kod optimalnog profila brzina ima trapezoidalni oblik, gde ona raste od nule do neke maksimalne brzine koja ostaje konstantna sve dok brzina ponovo ne padne na nulu

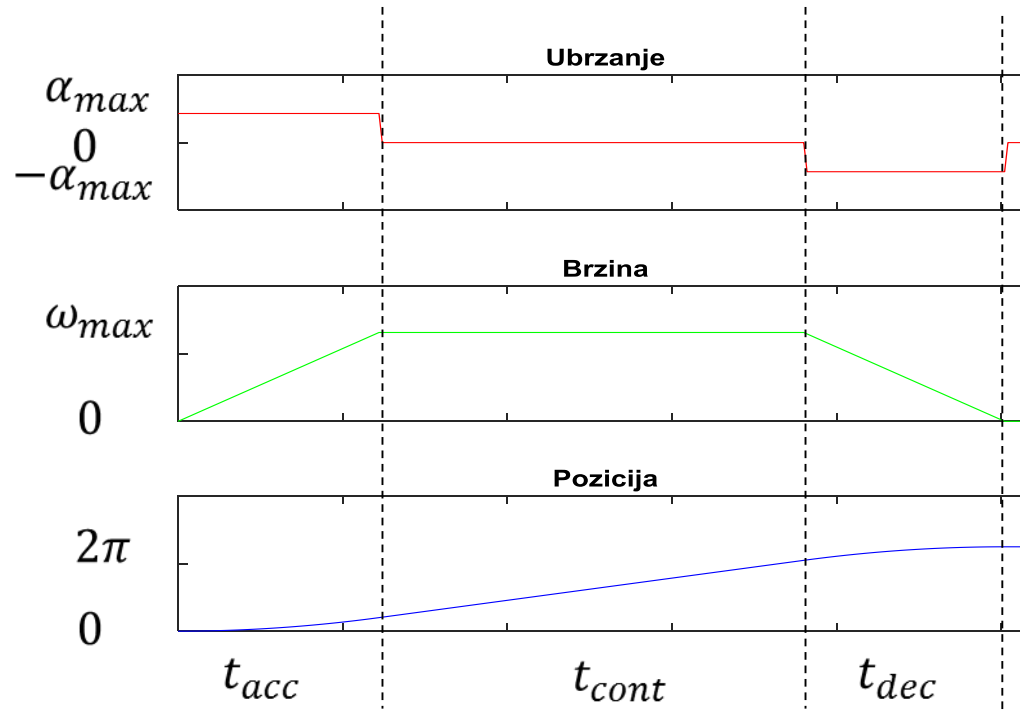


Izbor motora i reduktora

- **Korak I: Analiza ciklusa pomeranja:**
- Optimalni profil koji garantuje minimalni utrošak energije:

- $t_{acc} = t_{dec} = \frac{t_{cont}}{2} = \frac{T}{4}$

- $v_{max} = \frac{2\pi}{\frac{t_{acc}}{2} + \frac{t_{dec}}{2} + t_{cont}}$, $a_{max} = \frac{v_{max}}{t_{acc}}$



Izbor motora i reduktora

- **Korak II: Da li je potreban reduktor?**
- Maksimalna brzina data je konstantnom brzinom u profilu kretanja ω_{max} . Masimalni moment jednak je proizvodu maksimalnog ubrzanja i momenta inercije

$$M_{max} = J * \alpha_{max}$$

- Ukoliko je potreban maksimalni moment mali, a brzina velika, nije potrebno koristiti reduktor, u suprotnom treba odabrati odgovarajući reduktor da bi se dobili moment i brzina koje mali DC motori mogu da postignu.



Izbor motora i reduktora

- **Korak III: Kolika je RMS moment motora potrebna?**
- RMS (srednji) moment motora za naš profil kretanja se može izračunati kao:

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{total}} \sum_j \Delta t_j M_j^2}$$

- Pri izboru motora treba voditi računa da vrednost nominalnog momenta u katalogu proizvođača bude veća od ove vrednosti

4	Nominal speed	rpm	9550	11000	9180	8940	9050	7440	8320	7990	7580	8060	7670	7750	6910	7210	8080
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	0.969	1.04	1.21	1.45	1.84	2.09	2.32	2.67	2.78	2.72	2.71	2.72	2.7	2.72	2.66
6	Nominal current (max. continuous current)	A	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.458	0.408	0.336	0.27	0.218	0.201	0.173	0.138
7	Stall torque	mNm	8.91	9.4	7.84	7.9	8.56	7.61	8.35	8.72	9	9.08	8.73	8.86	8.1	8.42	8.85
8	Stall current	A	4.15	4.06	2.97	2.52	2.16	1.71	1.69	1.47	1.3	1.1	0.852	0.697	0.591	0.526	0.45
9	Max. efficiency	%	84	84	83	83	83	83	83	83	84	84	84	84	83	84	84

Izbor motora i reduktora

- **Korak IV: Da li motor može termički da izdrži maksimalni moment profila?**
- Motor može kratkoročno da izdrži i veći moment od nominalnog. Relevantna vrednost koja pokazuje koliko vremena motor može termički da izdrži moment (struju) veći od nominalnog je termička konstanta.

Thermal data		
17	Thermal resistance housing-ambient	37 K/W
18	Thermal resistance winding housing	10 K/W
19	Thermal time constant winding	6.97 s
20	Thermal time constant motor	277 s
21	Ambient temperature	-20...+65°C
22	Max. winding temperature	+85°C

- Motor može da izdrži struju 2 puta veću od nominalne 4 termičke vremenske konstante ili 3 puta veću za pola termičke vremenske konstante



Izbor motora i reduktora

- **Korak V: Koliki treba da bude maksimalni napon napajanja motora?**
- Brzina i moment motora međusobno su povezani momentno brzinskom jednačinom koja opisuje linearnu zavisnost brzine i momenta
- Uslov za maksimalni napon napajanja koji može da obezbedi željeno kretanje motora

$$U \geq \frac{1.2}{k_n} \left(n_{max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} * M_{max} \right)$$



Izbor motora i reduktora

$$U \geq \frac{1.2}{k_n} \left(n_{max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} * M_{max} \right)$$

Brzinska
konstanta motora

Brzinsko – momentni
gradijent

M 1:1

Motor Data								
1_	Nominal voltage	V	4.5	6	9	12	18	24
2_	No load speed	rpm	6440	6350	6260	6360	6360	6350
3_	No load current	mA	72	53	34.6	26.5	17.7	13.2
4_	Nominal speed	rpm	5080	4540	4350	4490	4490	4480
5_	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	7.46	10.3	10.8	11.0	11.0	10.9
6_	Nominal current (max. continuous current)	A	1.20	1.20	0.829	0.643	0.428	0.319
7_	Stall torque	mNm	35.7	36.3	35.8	38.0	37.8	37.5
8_	Stall current	A	5.42	4.07	2.64	2.13	1.41	1.05
9_	Max. efficiency	%	78	79	79	79	79	79
10_	Terminal resistance	Ω	0.831	1.47	3.40	5.63	12.7	22.8
11_	Terminal inductance	mH	0.045	0.082	0.191	0.329	0.740	1.320
12_	Torque constant	mNm/A	6.58	8.90	13.5	17.8	26.7	35.6
13_	Speed constant	rpm/V	1450	1070	705	536	358	268
14_	Speed/torque gradient	rpm/mNm	183	177	177	170	170	172
15_	Mechanical time constant	ms	5.12	4.99	4.92	4.89	4.89	4.90
16_	Rotor inertia	gcm ²	2.67	2.68	2.65	2.75	2.74	2.72
Thermal data			Operating Range					
17_	Thermal resistance housing-ambient	K/W	17.6	n [rpm]		Winding 9 V		
18_	Thermal resistance winding-housing	K/W	6.5					
19_	Thermal time constant winding	s	11.6	20000				

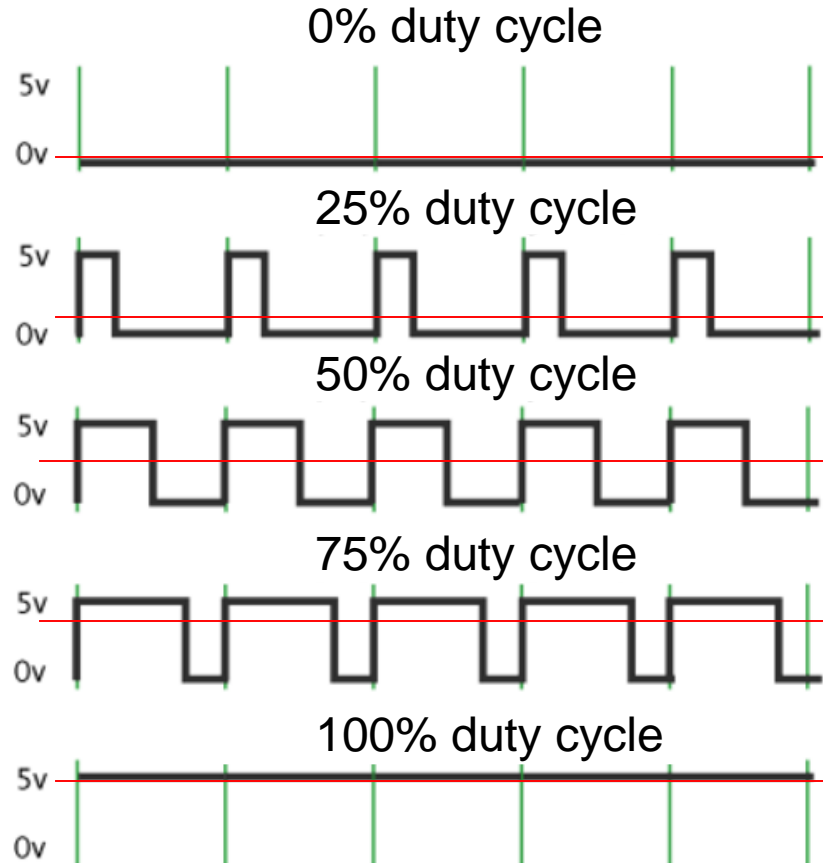
Kontrola motora (kontrola struje)

- Moguće je kontrolisati moment (struju) motora, brzinu motora kao i položaj motora
- Struja motora (odnosno moment) se reguliše promenom napona motora. Napon se može menjati kontinualno, ali je češće upravljanje naponom uz pomoć PWM signala (Pulse Width Modulation), gde se napon na motoru menja sa fiksnom frekvencijom između vrednosti 0 i maksimalnog napona motora. Regulacijom odnosa vremenskih intervala kada je napon jednak nuli i maksimumu omogućavaju podešavanje srednje vrednosti napona.
- Odnos vremenskog intervala kada je napon jednak maksimumu i kada je jednak nuli zove se duty cycle



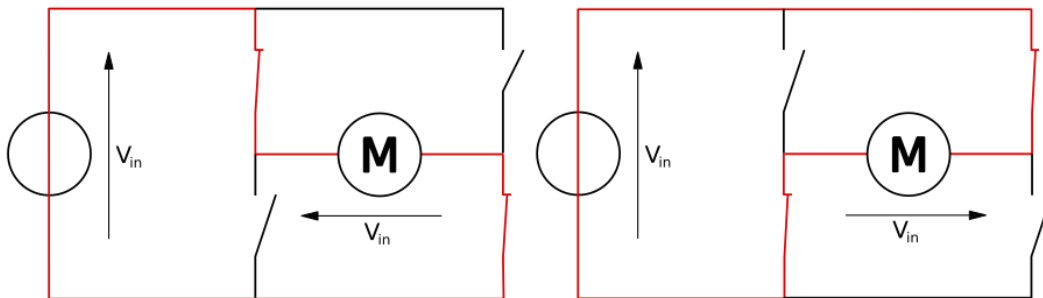
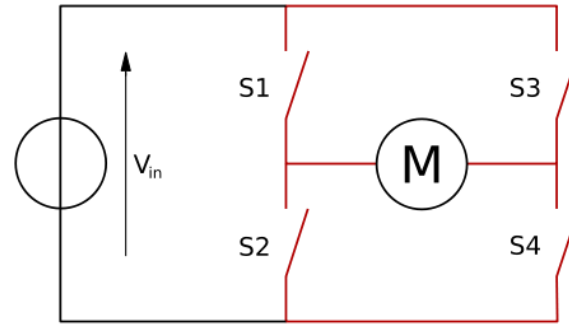
Kontrola motora (kontrola struje)

- PWM napon na motoru – princip:



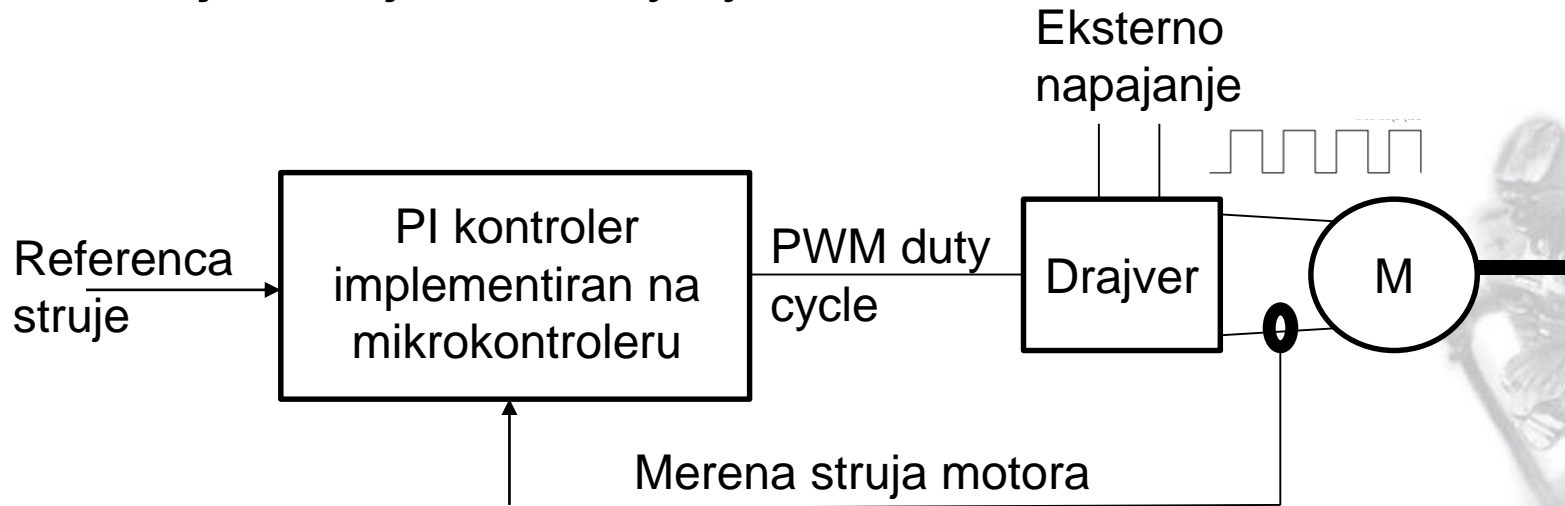
Kontrola motora (kontrola struje)

- Napon napajanja je obično unipolaran (uvek pozitivan).
- Da bi se postigla negativna struja, potrebno je na motor dovesti negativan napon
- Ovo se može izvesti uz pomoć H-mosta (H-bridge) koji sadrži 4 prekidača



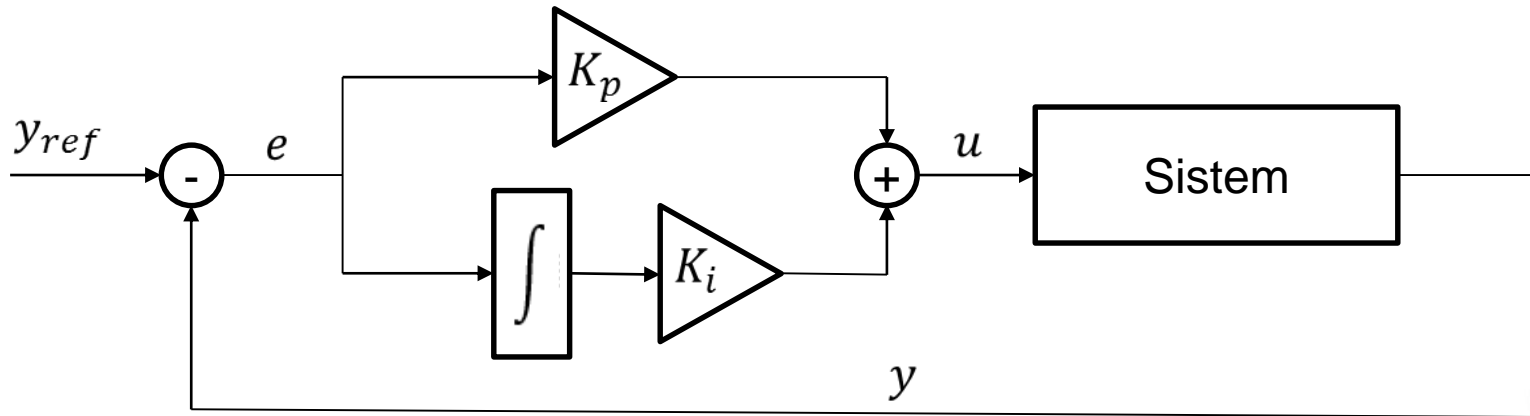
Kontrola motora (kontrola struje)

- Napon motora je često mnogo veći od napona napajanja kontrolera koji treba da reguliše njegov rad. Iz tog razloga se koriste drajveri
- Najčešće korišćeni algoritam za kontrolu struje je PI kontroler.
- Struja motora se meri uz pomoć senzora i drajveru se šalje informacija o željenom duty cyclu



PI kontrola struje

- Proporcionalno dejstvo – reakcija na trenutnu vrednost greške (veća greška praćenja daje veće upravljanje)
- Integralno dejstvo – reakcija na akumulirano vrednost greške (reakcija na dugoročno kretanje greške)



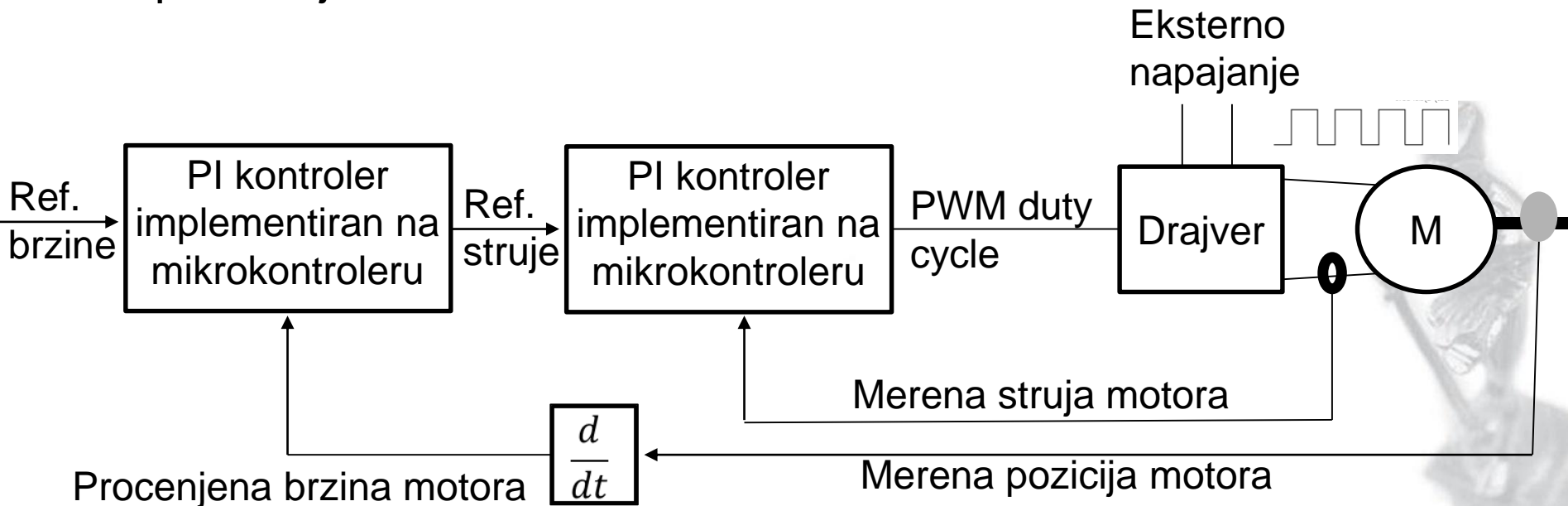
- y_{ref} → Referentna (željena vrednost)
 y → Izmerena vrednost
 e → Greška upravljanja
 u → Upravljačka veličina

$$y(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$



Kontrola motora (kontrola brzine)

- Da bi se kontrolisala brzina motora neophodno je da ona može da se meri
- Brzina se može meriti uz pomoć tacho generatora koji generiše analogni napon proporcionalan brzini okretanja
- Brzina se može meriti i uz pomoć enkodera koji meri ugaoni pomeraj



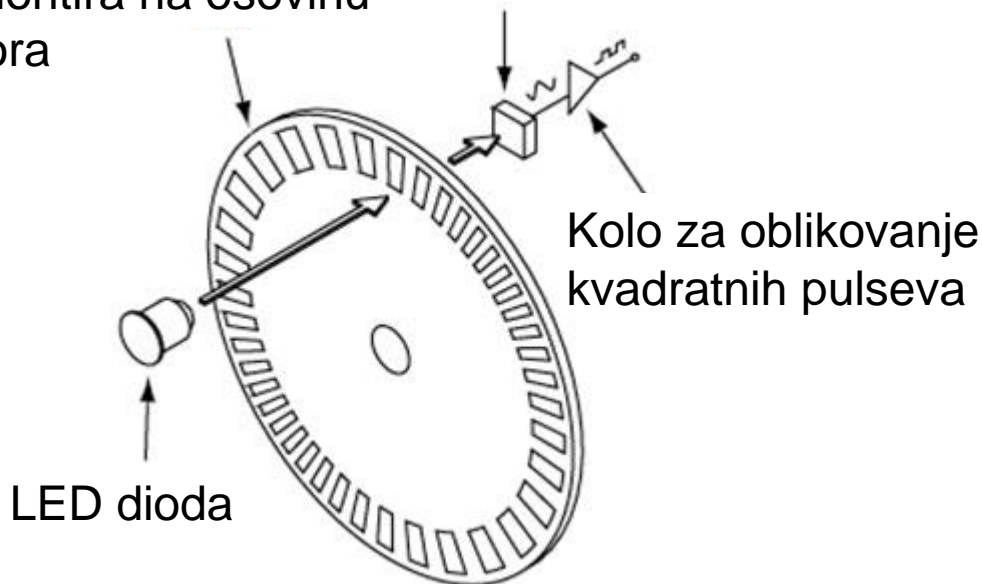
Inkrementalni enkoder

- Senzori ugaonog položaja osovine motora zovu se enkoderi
- Mogu biti optički, induktivni ...
- Najčešće su inkrementalni – ne daju apsolutnu informaciju o položaju već samo o inkrementalnoj promeni položaja osovine motora

Princip rada optičkog enkodera

Disk sa prorezima koji se montira na osovinu motora

foto - senzor

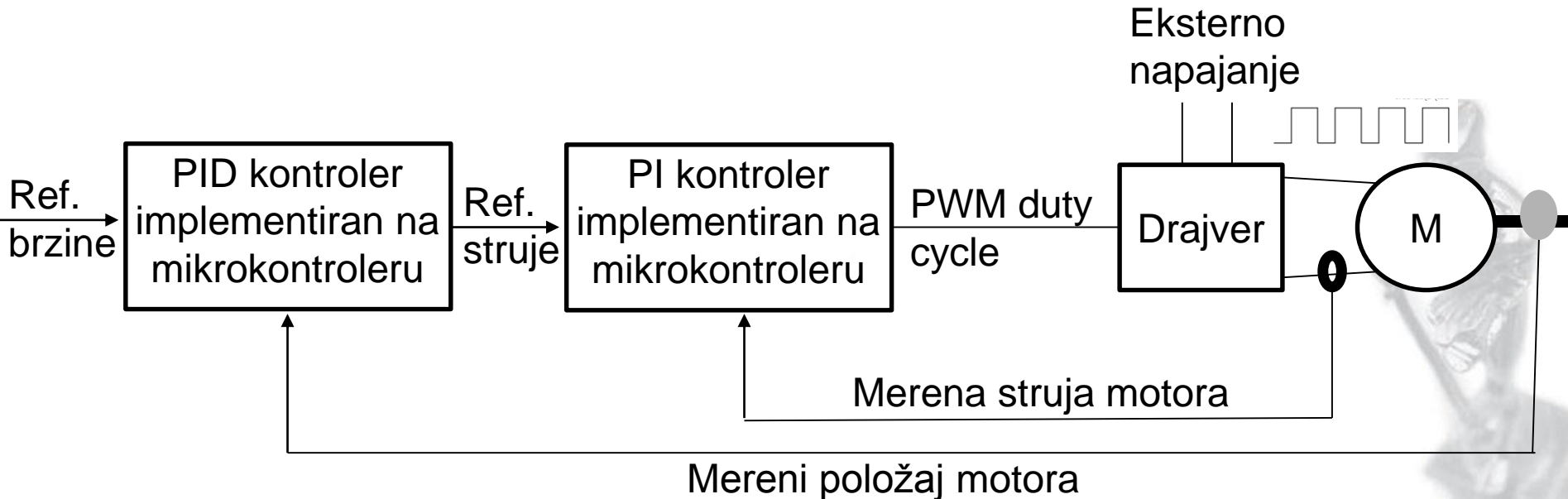


Kolo za oblikovanje kvadratnih pulseva



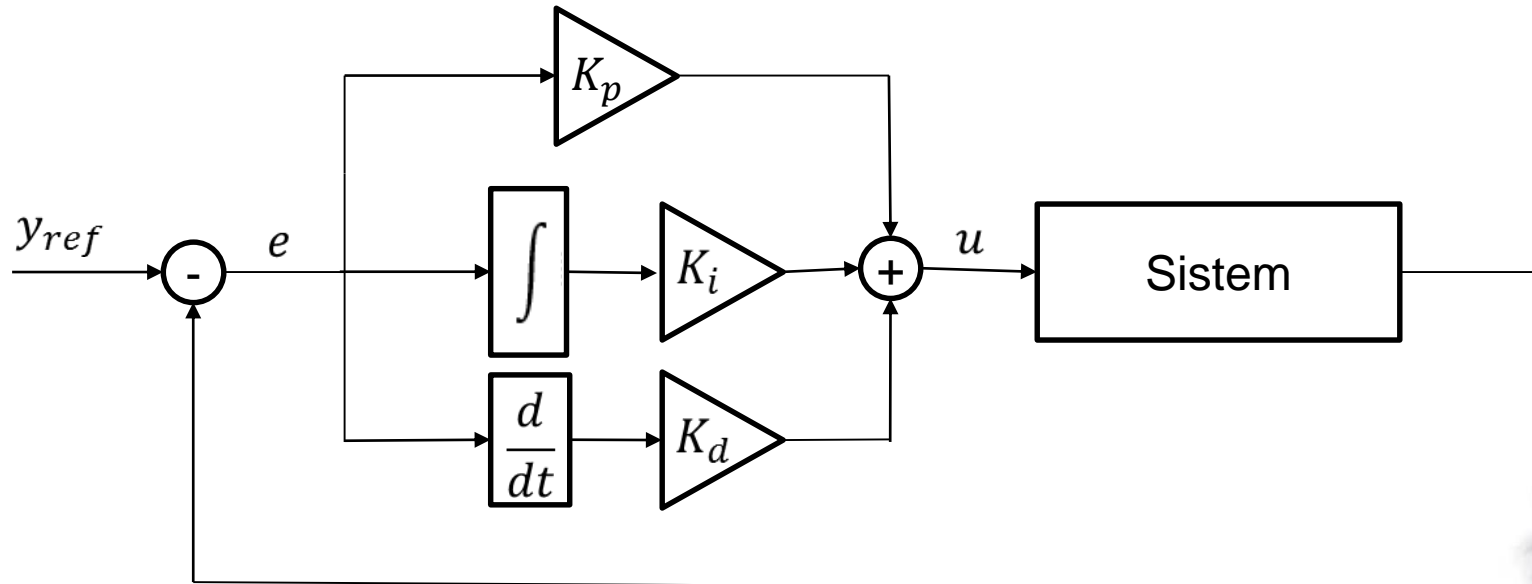
Kontrola motora (kontrola pozicije)

- Kontrola položaja motora podrazumeva ubrzavanje motora i kočenje da motor ne bi imao preskoke u poziciji.
- Umesto PI kontrolera koji se koristi za kontrolu brzine, za regulaciju položaja koristi se PID kontroler.



PID kontrola pozicije

- Diferencijalno dejstvo – vodi računa o mogućim budućim trendovima greške na bazi trenutnog kretanja greške



- y_{ref} → Referentna (željena vrednost)
 y → Izmerena vrednost
 e → Greška upravljanja
 u → Upravljačka veličina

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

