

# Lekcija 5

## *Pojačala snage i upravljanje istosmjernim motorima*

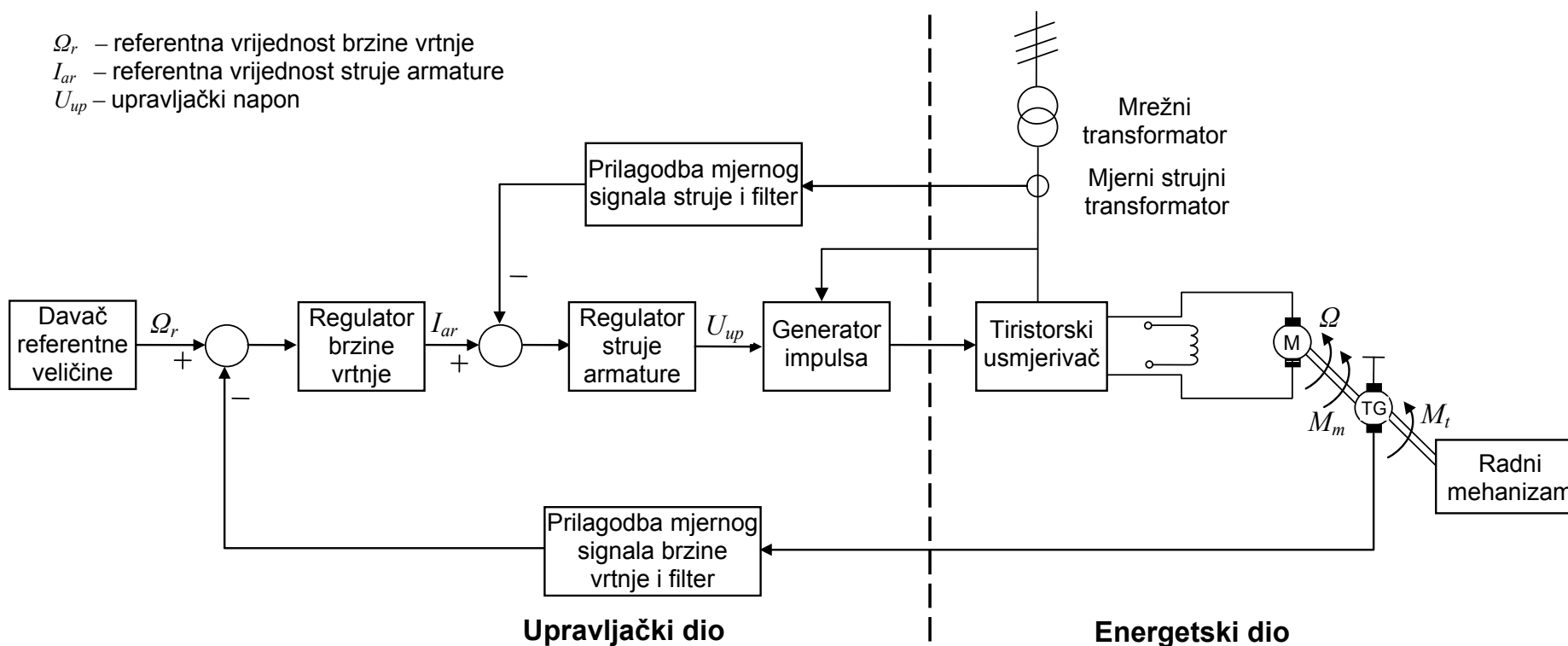
Prof.dr.sc. Jasmin Velagić

Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Aktuatori

# Elektromotorni pogon s istosmjernim motorom

Kaskadni sistem regulacije brzine vrtnje i armaturne struje s tiristorskim ispravljačem (usmjerivačem).



## 5.1. Pojačala snage

- Koriste se za upravljanje.
- Prema tehnici izvedbe dijele se na:
  - električka,
  - pneumatska,
  - hidraulička.
- Električka pojačala prema izvedbi dijele se na:
  - strujna (stroj kao pojačalo snage – rotaciona),
  - elektromehanička (sklopnici),
  - magnetska (masovno su se koristili 50-60 godina prošlog stoljeća),
  - elektronička.

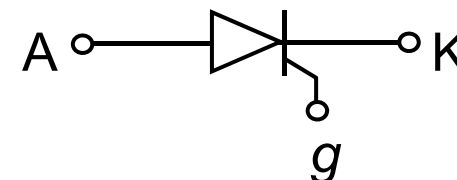
## Pojačala snage

- Elektronička pojačala se dalje dijele na:
  - pojačala s živinim ventilom (40-50 godina prošlog stoljeća),
  - tiratroni (za manje snage),
  - tiristori (od 60-tih godina prošlog stoljeća na ovamo),
  - tranzistori snage (od 70-tih godina prošlog stoljeća).
- Bez obzira na tehniku izvedbe pojačala snage, postavljaju se sljedeći zahtjevi na:
  - **pojačanje snage,**
  - **linearnost statičke karakteristike,**
  - **malu vremensku konstantu.**

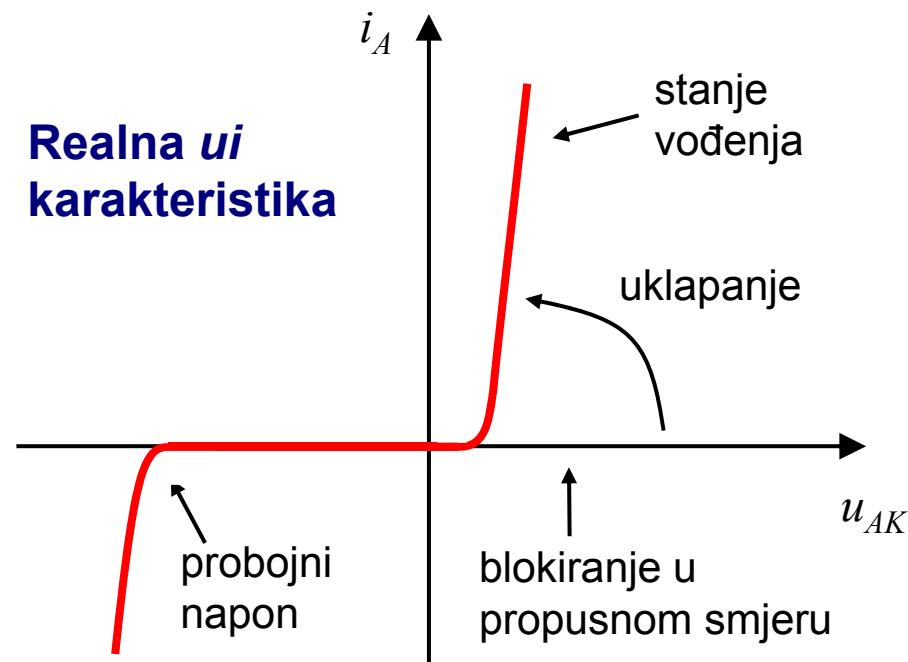
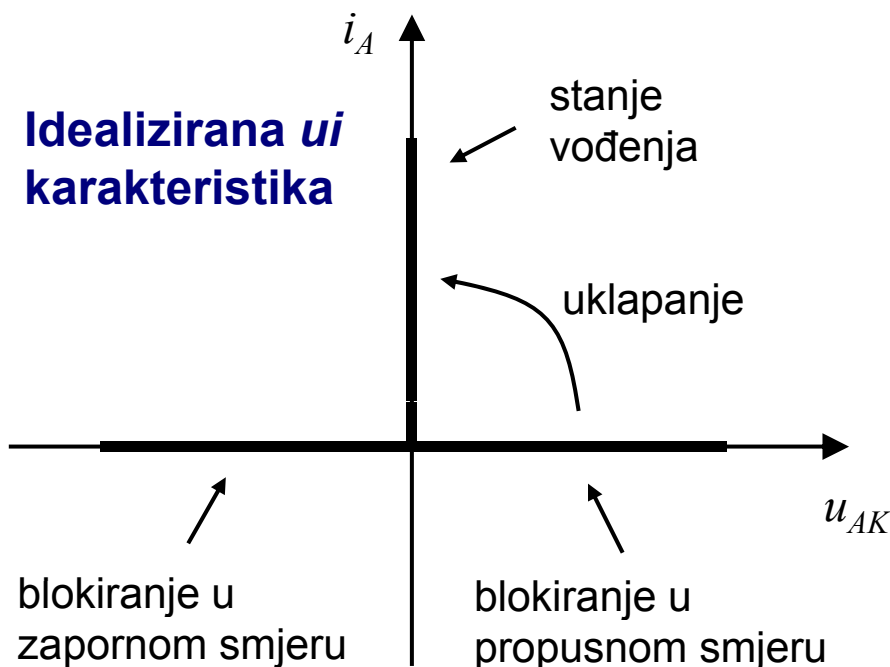
## 5.1.1. Poluvodički elementi u pojačalima snage

- Kao poluvodički elementi (sklopke) u pojačalima snage se koriste:
  - tiristori,
  - GTO (Gate turn-off) tiristori,
  - bipolarni tranzistori,
  - MOSFET tranzistori,
  - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors).

# Tiristor



- Tiristor je poluupravljivi poluvodički ventil.
- Kada je potencijal anode manji od potencijala katode (zaporni smjer), tiristor ne vodi struju.
- U propusnom smjeru (potencijal anode veći od potencijala katode,  $u_{AK} > 0$ ) tiristor može preuzeti blokirni napon manji od probojnog ukoliko na upravljačkoj elektrodi (gate) nema pozitivnog napona.



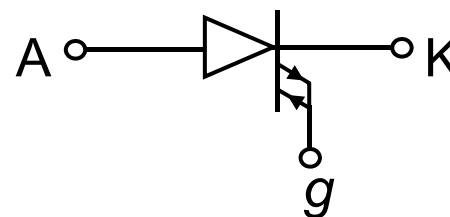
## Tiristor

- Ukoliko se na tiristor dovede pozitivni napon (strujni impuls), tiristor će nakon regenerativnog procesa uklapanja preći u stanje vođenja, u kojem je na njemu pad napona tipičnog iznosa od 1 do 3 V. Jednom kad tiristor provede, upravljački se impuls može i ukloniti, a tiristor ostaje u samoodržavajućem stanju.



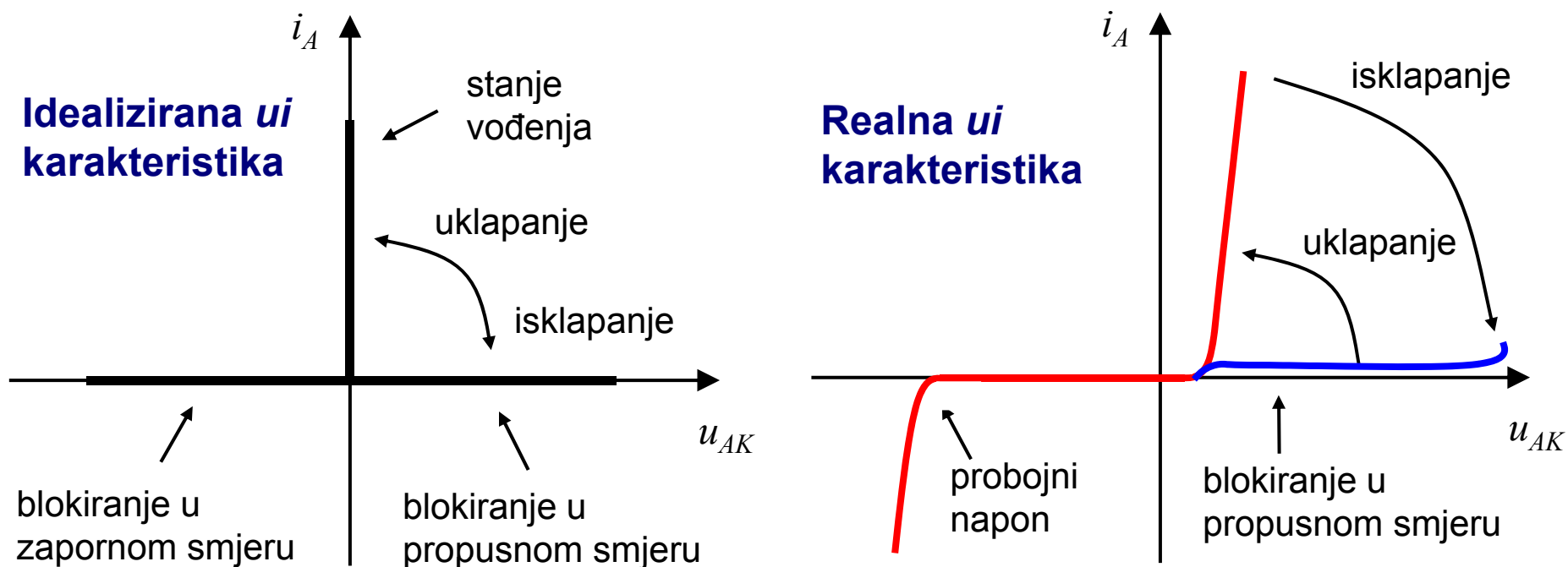
## GTO tiristor

- Preko upravljačke elektrode **isklopljivi tiristor** ili GTO (eng. *gate turn-off thyristor*) je posebna vrsta tiristora, koja pripada potpuno **upravljivim sklopkama**.
- Poput klasičnog tiristora i GTO se iz stanja blokiranja dovodi u stanje vođenja kratkim pozitivnim impulsom struje upravljačke elektrode i ostaje u stanju vođenja bez daljnjeg prisustva ove struje.
- Međutim, za razliku od klasičnog tiristora, GTO se može **isklopiti** pomoću kratkotrajnog ali snažnog negativnog impulsa struje upravljačke elektrode.
- Amplituda negativnog strujnog impulsa tipično iznosi  $1/3$  struje koja se isklapa.





# GTO tiristor



**ABB**

5SGA 30J2501



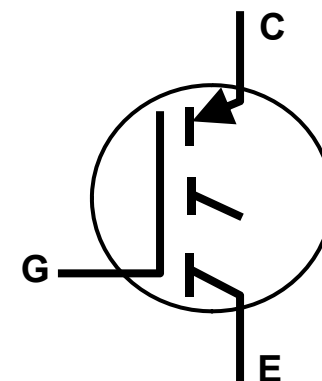
**MITSUBISHI**  
SEMICONDUCTORS



FG4000GX-90DA

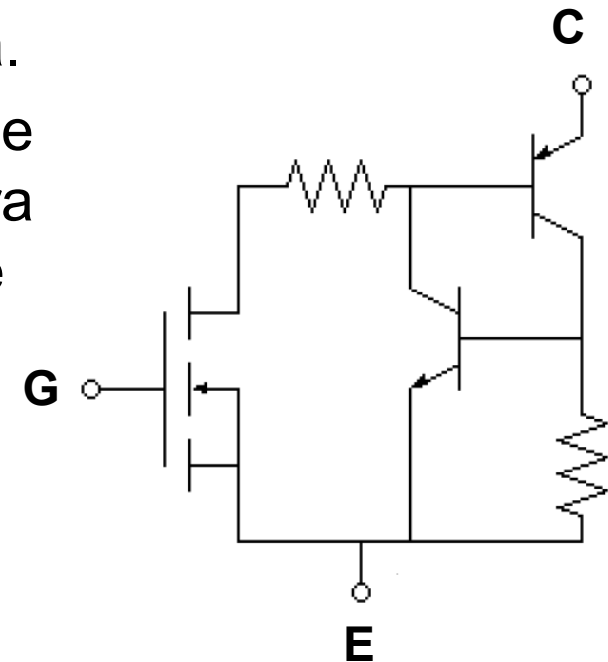
## IGB tranzistori

- IGB tranzistori ujedanjuju dobre strane MOSFET i bipolarnih tranzistora.
- Ova vrsta tranzistora dominira u pojačalima srednjih snaga.
- Osnovne karakteristike IGB tranzistora su: MOS upravljačka elektroda, velika brzina preklapanja, mali pad napona u stanju vođenja, sposobnost vođenja velikih struja i visoki stupanj robusnosti.
- Ove su sklopke po karakteristikama najbliže “idealnim sklopkama” s tipičnim rasponima napona od 600 - 1700 V, s padom napona tokom vođenja od 1.7 - 2.0 V pri strujama do 1000 A i vremenima preklapanja od 200 - 500 ns.
- Pojava IGB tranzistora je doprinijela padu cijena pojačala snage te je povećala broj ekonomski isplativih industrijskih aplikacija.



## IGB tranzistori

- IGB tranzistori kombiniraju visoku ulaznu impedanciju i brzinu MOSFET tranzistora s visokom vodljivošću (visokom gustoćom struje) bipolarnih Darlingtonovih tranzistora.
- IGB tranzistori pojednostavljuju projektiranje sklopovlja u odnosu na bipolarne tranzistora i omogućuju preklapanja visoke frekvencije uz reducirani šum u pretvaračima te doprinose smanjenju veličine i težine pojačala snage kao uređaja u raznim primjenama.
- Slika prikazuje nadomjesnu shemu IGB tranzistora, gdje se ulazni dio predstavlja MOSFET tranzistorom, a izlazni dio bipolarnim tranzistorom.



## 5.2. Tiristorska pojačala

- Tiristorska pojačala napajaju se direktno iz mreže i “sjeckaju” mrežni napon  $U_m \sin \omega_m t$ .
- Osnovna zadaća tiristorskih pretvarača je da se srednja vrijednost napona pojačala mijenja u skladu s vrijednosti upravljačkog signala (izlaza iz regulatora).
- Tiristorska pojačala razlikuju se od pojačala snage s tranzistorima i GTO tiristorima zbog svojstva poluupravljivosti tiristora kao elektroničke sklopke.
- Naime, gašenje tiristora nastupa kada struja kroz tiristor padne ispod struje držanja ( $I_H$ ) – to znači da će u danim uvjetima za isti trenutak uključjenja tiristora trenutak gašenja tiristora ovisiti o karakteru tereta pojačala, npr. teret može biti tipa R, R+L ili R+L+E (istosmjerni motor).

## Tiristorska pojačala

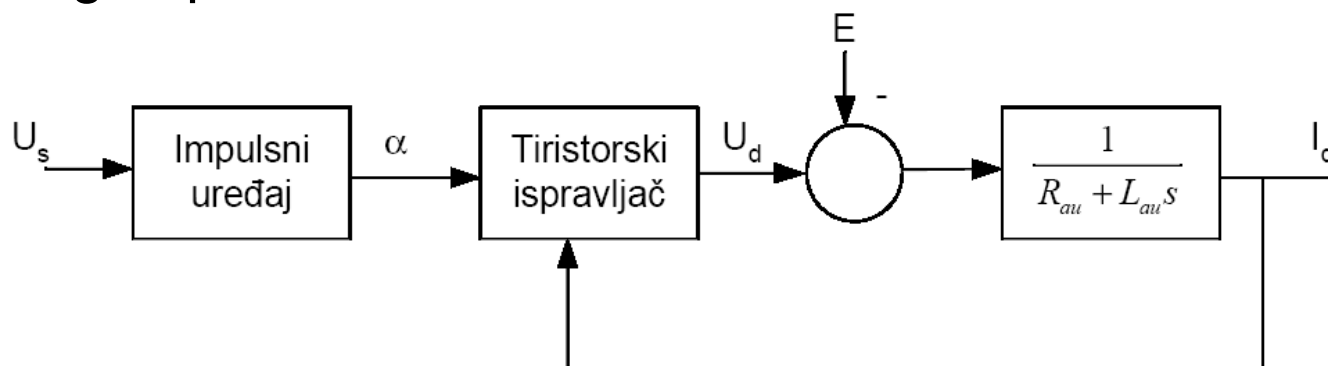
- Tiristorska pojačala se dijele na:
  - ispravljače
  - usmjerivače,
  - izmjenjivače,
  - pretvarače frekvencije (ciklokonvertori),
  - pretvarače napona.
- **Ispravljač** – struja teče samo u jednom smjeru kroz teret (I ili IV kvadrant).
- **Usmjerivač** pretvara izmjeničnu u istosmjernu energiju.
- Predstavlja antiparalelni spoj dva ispravljača (za rad u sva četiri kvadranta). Postoje spojevi bez kružne struje, s kružnom strujom i križni spoj (s kružnom strujom).

## Tiristorska pojačala

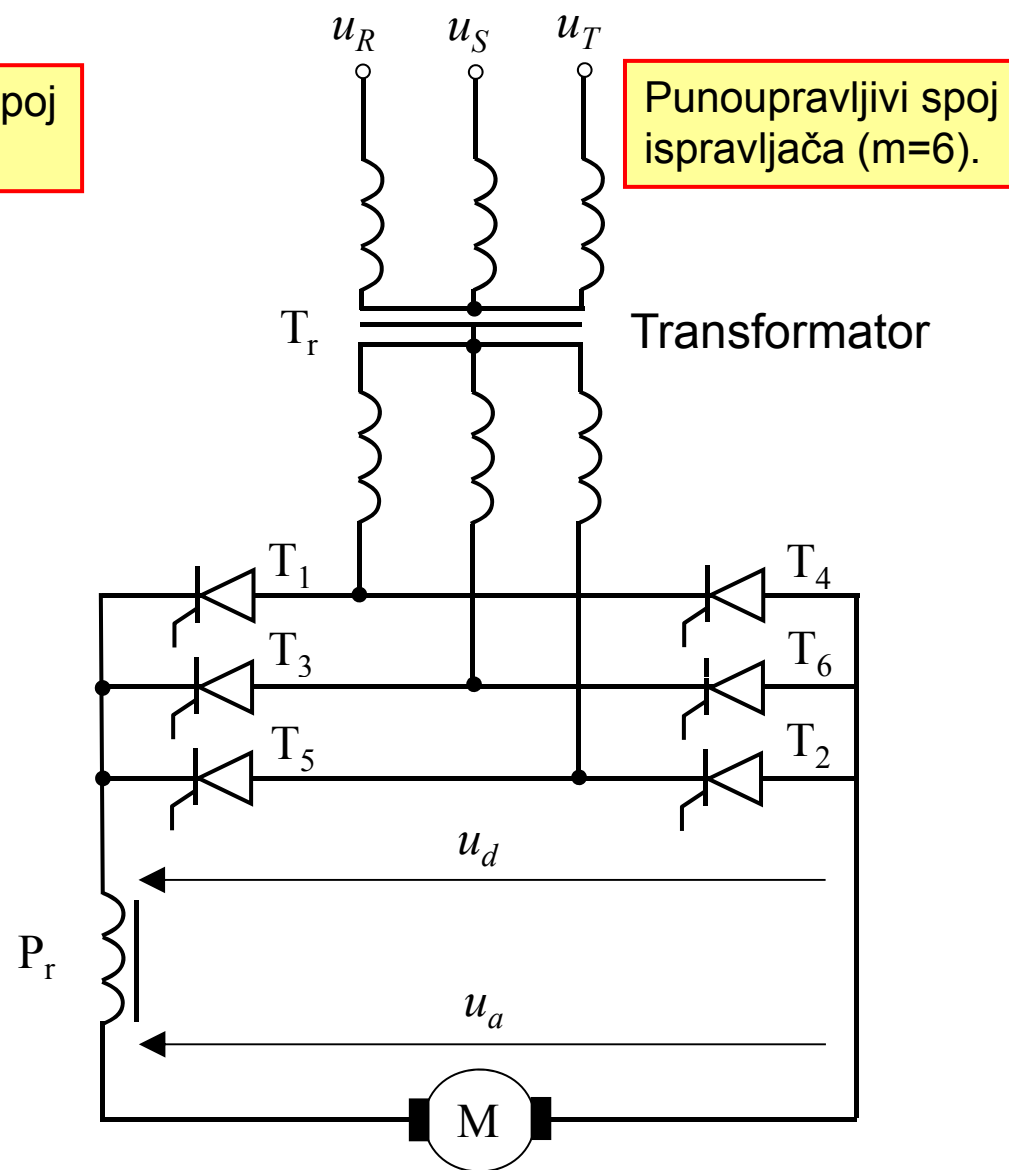
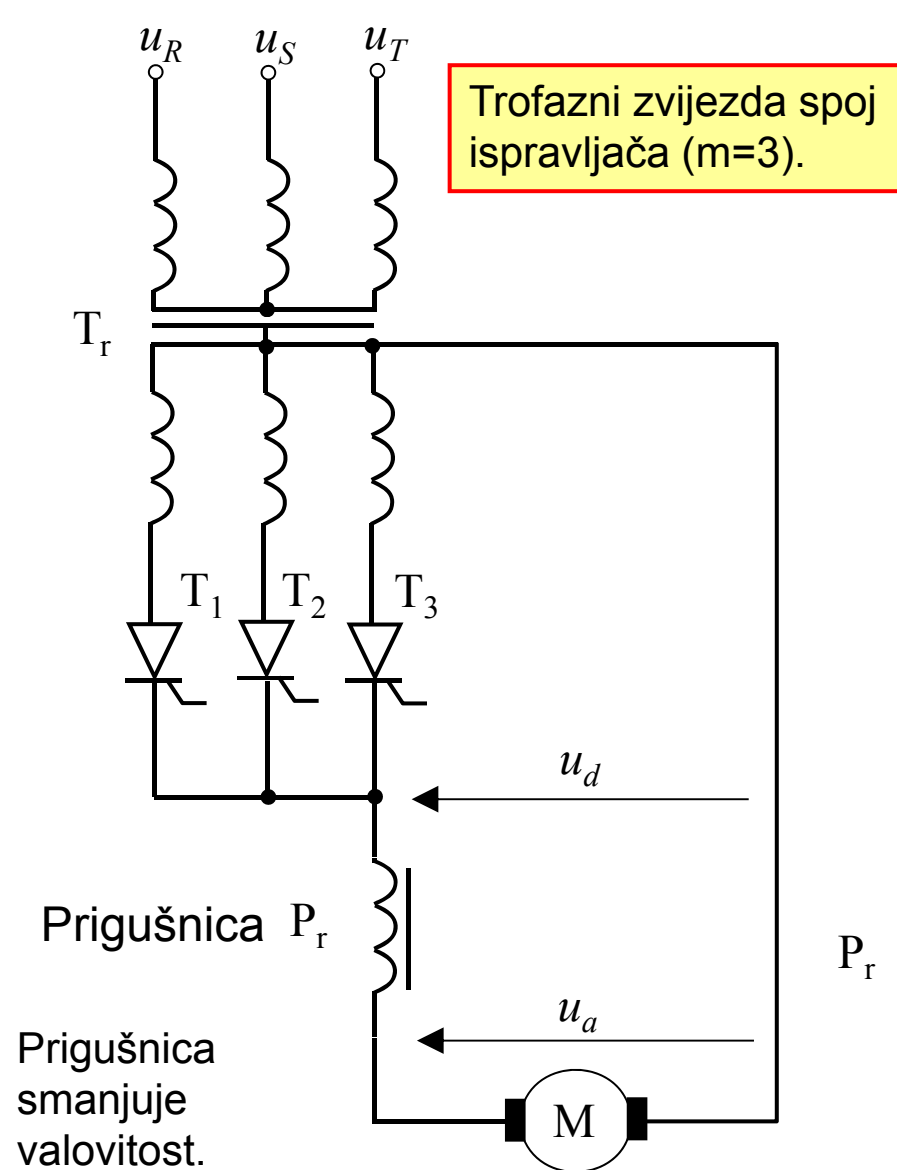
- Usmjerivači se koriste kod upravljanja istosmjernim strojevima, punjenja akumulatorskih baterija, napajanja elektrolize, itd.
- **Izmjenjivač** pretvara istosmjernu u izmjeničnu energiju (akumulatorske baterije i istosmjerni generator → izmjenična energija).
- **Pretvarač frekvencija** pretvara izmjeničnu energiju jedne frekvencije u izmjeničnu energiju druge frekvencije.
- Upotrebljava se za upravljanje brzinom vrtnje asinhronog motora promjenom frekvencije napona napajanja.
- **Pretvarač napona** pretvara istosmjerni napon jednog iznosa u istosmjerni napon drugog iznosa.
- Sastoji se od izmjenjivača i usmjerivača.

## 5.2.1. Tiristorski ispravljač

- Koristi se za regulaciju brzine vrtnje istosmjernih motora u samo jednom smjeru jer daje struju armature koja može teći samo u jednom smjeru.
- Osnovni spojevi tiristorskog ispravljača:
  - **jednofazni mosni spoj** (poput Graez-ovog diodnog mosta) →  $m=2$ ,
  - **trofazni zvijezda ili trokut spoj** →  $m=3$ ,
  - **trofazni punoupravljivi mosni spoj** →  $m=6$ .
- Oznaka  $m$  predstavlja broj pulzacija ispravljenog napona u periodu mrežnog napona.



# Tiristorski ispravljač





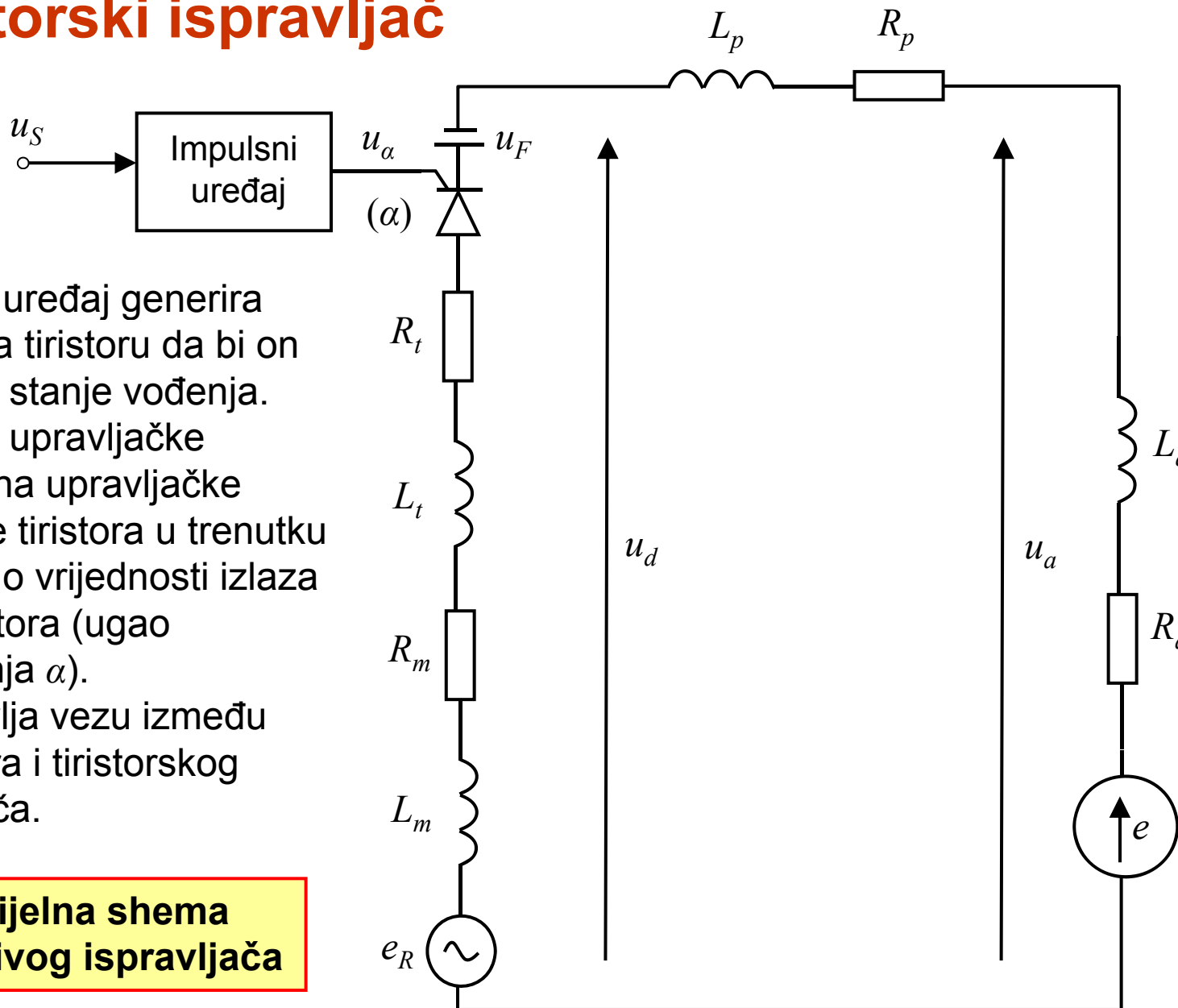
## Tiristorski ispravljač

- Na sljedećoj slici prikazana je principijelna (nadmjesna) shema upravljivog ispravljača (prikazana je samo jedna faza zbog jednostavnosti).
- Oznake na slici imaju sljedeća značenja:
  - $e_R$  – idealni naponski izvor,
  - $R_m, L_m$  – ekvivalentni otpor i induktivitet mreže,
  - $R_t, L_t$  – ekvivalentni otpor i induktivitet transformatora,
  - $u_F$  – pad napona na tiristoru u stanju vođenja,
  - $R_p, L_p$  – otpor i induktivitet prigušnice,
  - $R_a, L_a$  – otpor i induktivitet armature,
- U općem slučaju imamo  $m$  faza. Pretpostavit ćemo da su elementi idealni (otpori i induktiviteti).
- Impulsni uređaj generira impulse sinhronizirane s napajanjem ispravljača.
- Ugao upravljanja je funkcija napona  $u_s$ :  $\alpha=f(u_s)$ .

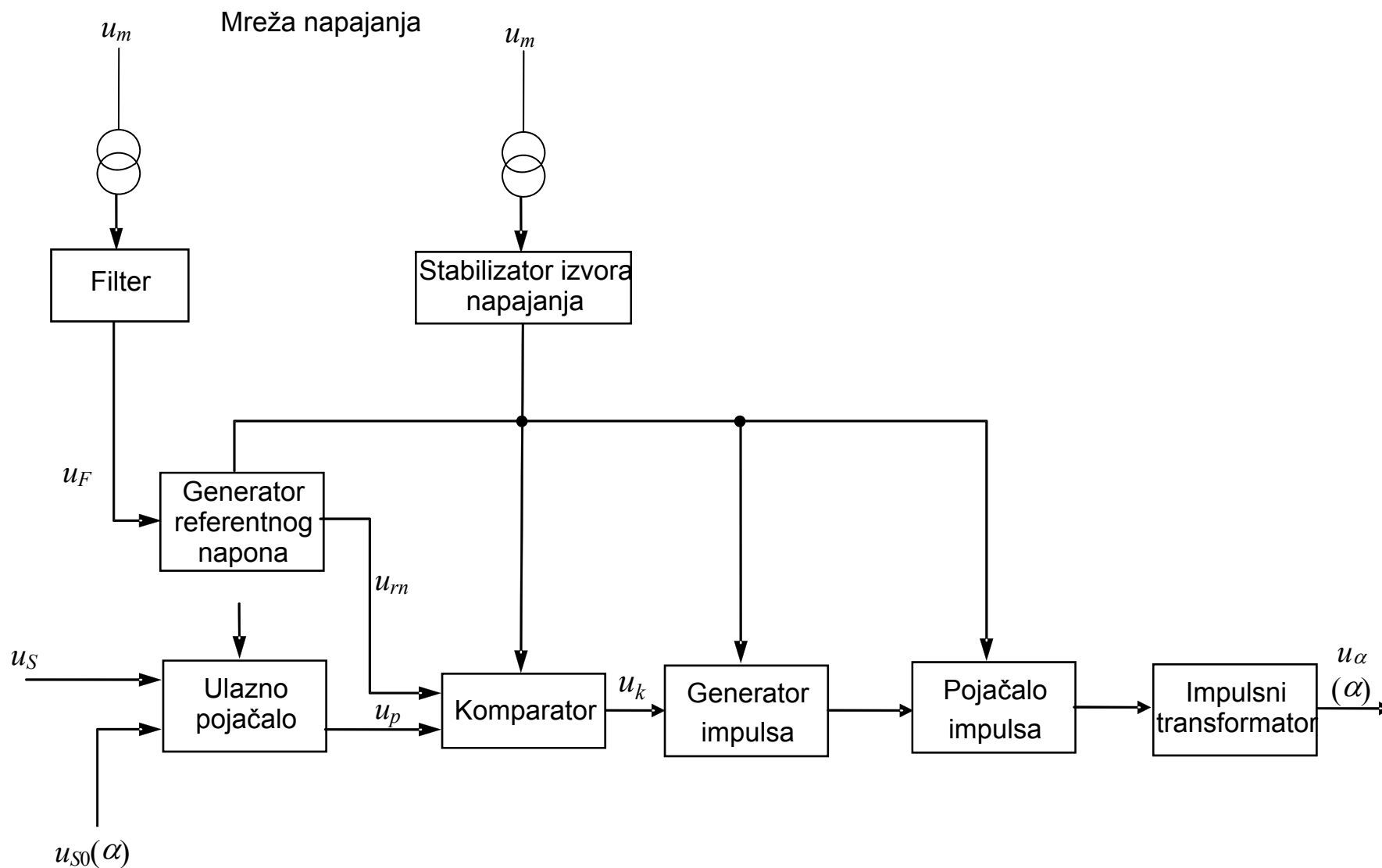
## Tiristorski ispravljač

Impulsni uređaj generira impuls na tiristoru da bi on prešao u stanje vođenja. Generira upravljačke impulse na upravljačke elektrode tiristora u trenutku ovisnom o vrijednosti izlaza iz regulatora (ugao upravljanja  $\alpha$ ). Predstavlja vezu između regulatora i tiristorskog ispravljača.

**Principijelna shema upravljivog ispravljača**



# Impulsni uređaj



## Impulsni uređaj

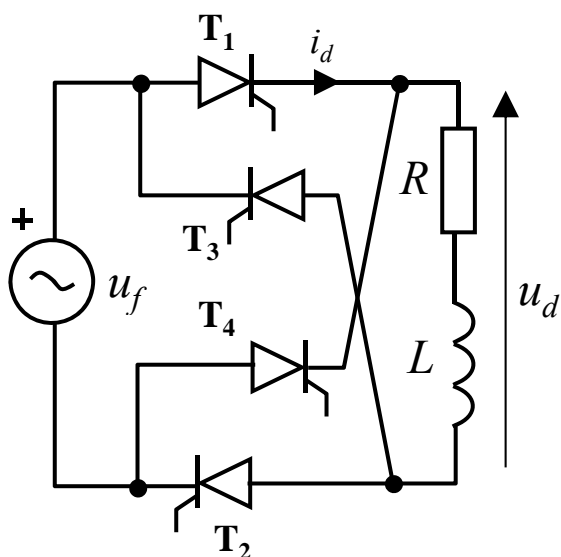
- Osnovni načini upravljanja tiristorom:
- **Vertikalni** – generira se referentni napon  $u_{rn}$  koji je pilastog ili sinusoidalnog oblika, te se uspoređuje s naponom  $u_p$ .
- Kada je  $u_p + u_{rn} = 0$  tada se generira impuls.
- **Horizontalni** – generira se  $u_{rn}$ , čija je faza funkcija  $u_p$ -a, tj.  $\varphi_{rn} = f(u_p)$ .
- Kada je  $u_{rn} = 0$  počinje generiranje impulsa.
- **Generator referentnog napona** (sinhronizira  $u_{rn}$  sa  $u_p$ , tj. rad impulsnog uređaja sa naponom mreže) je element za sinhronizaciju.
- **Filter** – izrađuje se kao RC filter da se smanje izobličenja napona mreže. U industriji se rade filteri s  $\varphi_F = \pi/3$  (za 6-pulsne usmjerivače).
- **Ulazno pojačalo** služi za prilagođenje regulatora i impulsnog uređaja ( $u_p = -u_{s0} - u_s$ ).

## Impulsni uređaj

- **Komparator** – određuje početak generiranja impulsa.
- Kada je  $u_{rn} + u_p = 0$  tada komparator mijenja stanje.  
npr. za  $u_{rn} + u_p > 0 \rightarrow u_k = +5V (+10V)$ ,  
 $u_{rn} + u_p < 0 \rightarrow u_k = -5V (-10V)$
- **Generator impulsa** – kada komparator mijenja stanje generator impulsa generira impuls.
- Generator impulsa određuje oblik i trajanje impulsa.
- **Pojačalo impulsa** – koriste se u slučajevima kada imamo više tiristora spojenih u seriju ili paralelu (za veći napon kada su spojeni u seriju, odnosno veću struju kada su tiristori spojeni u paralelu).
- **Impulsni transformator** – mora dosta vjerno prenijeti impuls na upravljačku elektrodu, a osnovna uloga mu je galvanska izolacija upravljačkog od energetskeg kruga.

# Valni oblici napona ispravljača i struje mreže

Jednofazni mosni spoj  
( $m=2$ ), teret tipa R+L

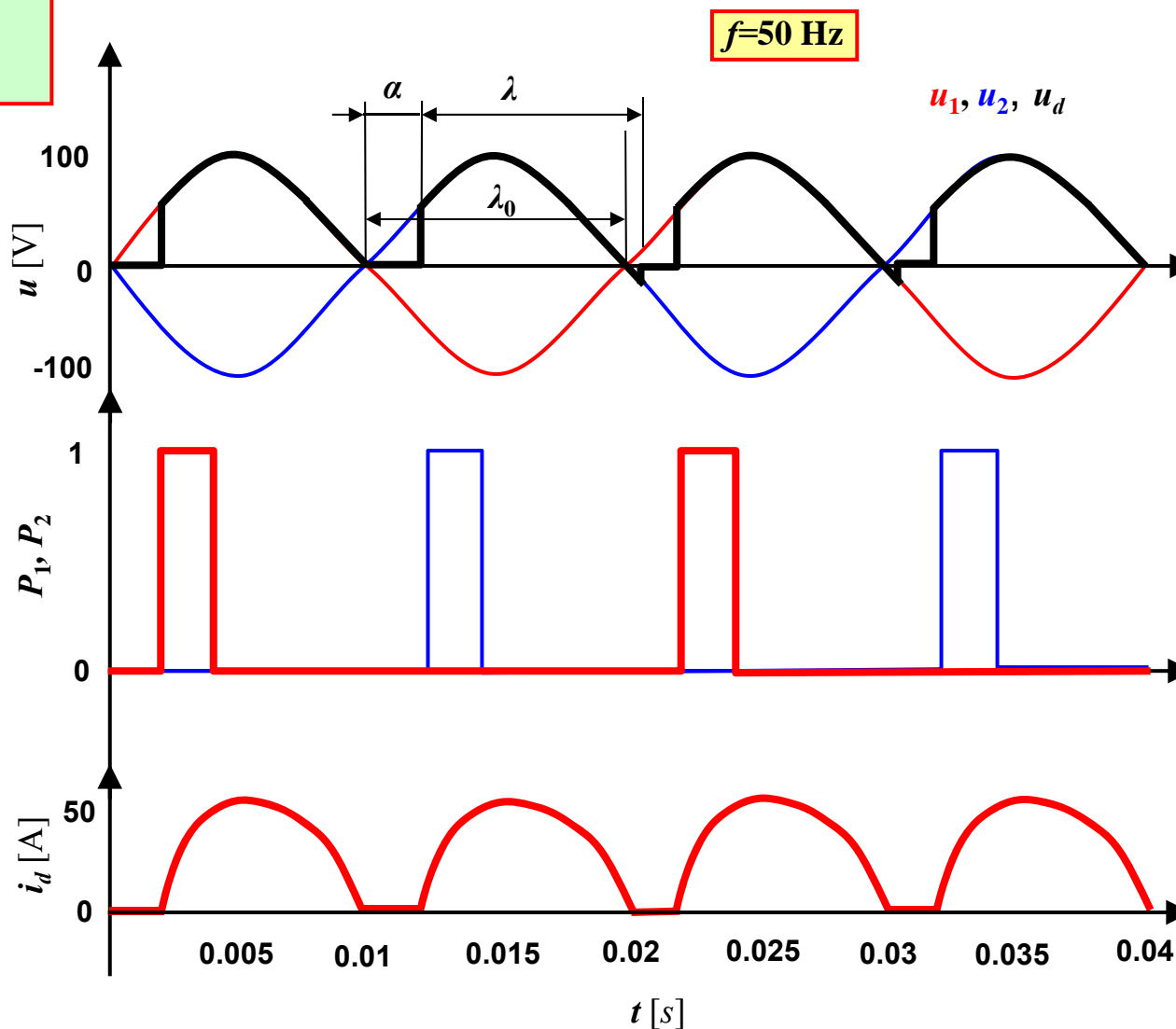


$\alpha$  – ugao upravljanja  
mjeren od prirodnog ugla  
vođenja.

$\lambda$  – ugao vođenja tiristora.

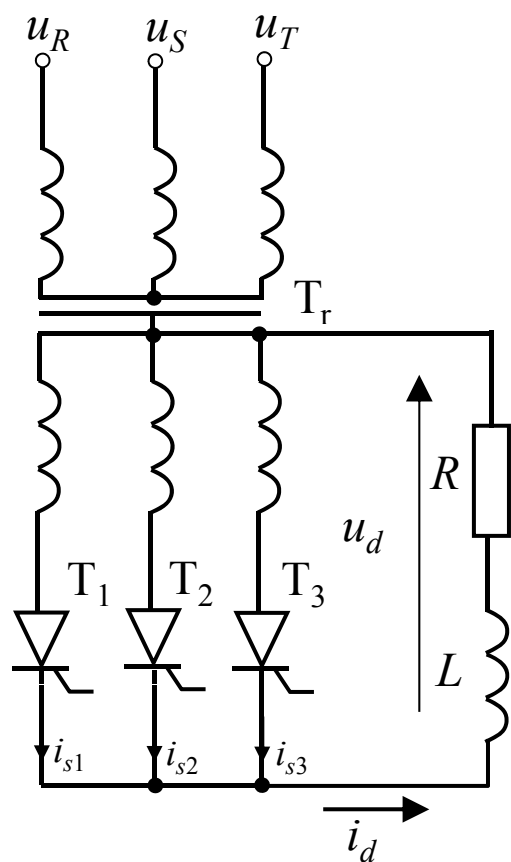
$\lambda_0 = 2\pi/m = \pi$  – ugao pulzacije.

$\delta = \pi/2 - \pi/m = 0$  – ugao  
prirodnog vođenja.

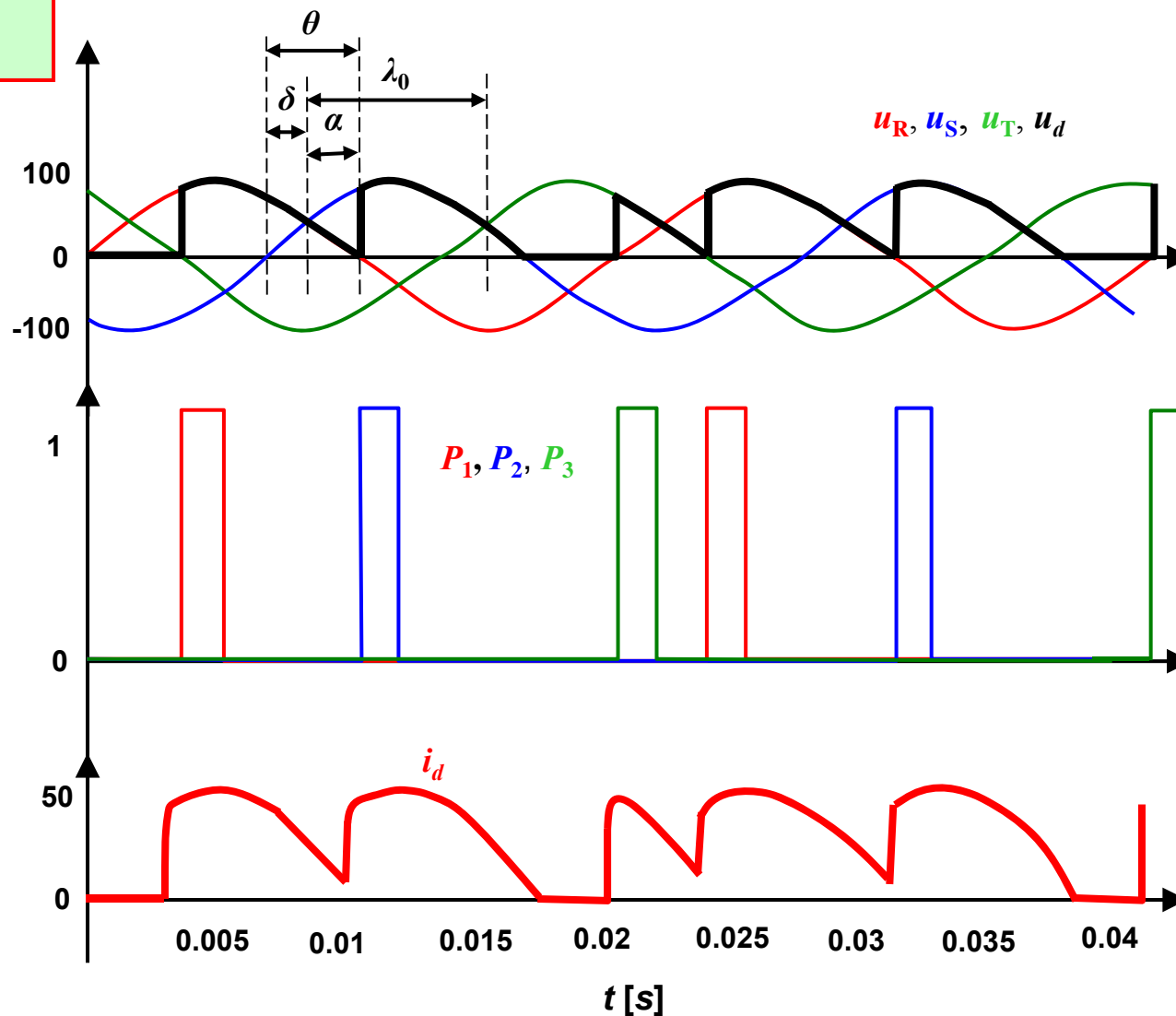


# Valni oblici napona ispravljača i struje mreže

Trofazni zvijezda spoj  
( $m=3$ ), teret tipa R+L



$\theta$  – ugao upravljanja  
mjeren od prolaska  
mrežnog napona kroz nulu.



## 5.2.2. Statičke karakteristike upravljivog ispravljača

- Treba uzeti u obzir da tiristor može biti uključen (propaljen) samo jednom unutar pulzacije ispravljenog napona – diskretno djelovanje unutar kontinuiranog sistema.
- U nastavku se razmatra trofazni zvijezda spoj tiristorskog ispravljača.
- Ugao vođenja tiristora je:

$$\lambda = \alpha_{\text{novi}} + \frac{2\pi}{m} - \alpha_{\text{stari}}.$$

- Za kontinuirani režim vođenja (struja stalno teče)  $\rightarrow \lambda = \lambda_0$ .
- Za diskontinuirani režim vođenja (struja ima prekide)  $\rightarrow \lambda < \lambda_0$ .
- Postavlja se pitanje: Kako srednja vrijednost napona  $u_d$  ovisi o promjenama ugla upravljanja  $\alpha$ ?



## Statičke karakteristike upravljivog ispravljača

- Naponi pojedinih faza su:

$$\begin{aligned} u_{R2} &= U_m \cos\left(\omega_m t + \frac{2\pi}{m}\right), \\ u_{S2} &= U_m \cos \omega_m t, \\ u_{T2} &= U_m \cos\left(\omega_m t - \frac{2\pi}{m}\right). \end{aligned}$$

- Srednja vrijednost napona  $U_d$ :

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\alpha-\pi}{m}}^{\alpha+\frac{\pi}{m}} u_{S2}(\omega_m t) d(\omega_m t) = U_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha.$$

$$\text{za } \alpha = 0^\circ \rightarrow U_d = U_{d0},$$

$$\text{za } \alpha = 90^\circ \rightarrow U_d = 0,$$

$$m = 3 \rightarrow U_{d0} = U_m \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} = 0.827 U_m = 0.827 \sqrt{2} U_{ef} = 1.17 U_{ef},$$

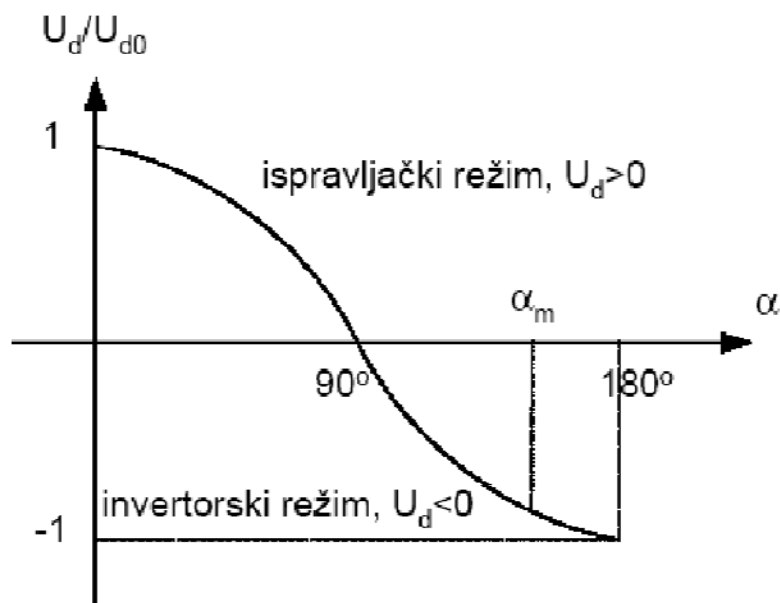
$$m = 6 \rightarrow U_{d0} = U_l \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = \sqrt{3} U_m \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = 2.34 U_{ef}.$$

$U_m$  – maksimalna vrijednost faznog napona.

$U_l$  – maksimalna vrijednost linijskog napona

## Statičke karakteristike upravljivog ispravljača

Upravljačka karakteristika tiristorskog ispravljača:  $U_d = f(\alpha)$ ,  $I_d = \text{konst.}$

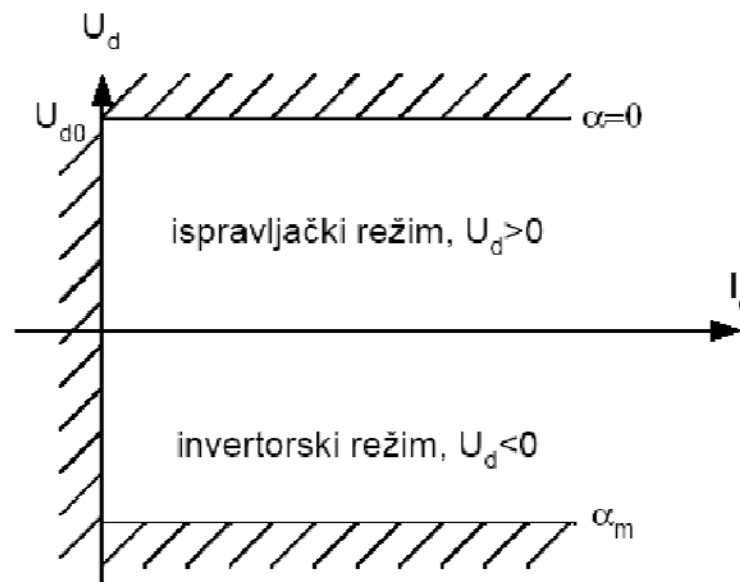


$$\alpha_m = 180 - (\gamma + \delta_0) \approx 150^\circ.$$

$\gamma$  – ugao komutacije,  $\delta_0$  – ugao koji odgovara vremenu uspostavljanja zapornih svojstava tiristora.

Minimalni  $\alpha$  ovisi o tipu ispravljača koji napaja istosmjerni motor.

Vanjska karakteristika tiristorskog ispravljača:  $U_d = f(I_d)$ ,  $i_d(I_d) > 0$ ,  $\alpha = \text{konst.}$



- Ispravljački režim – energija iz mreže u ispravljač.
- Invertorski režim  $-E < 0$ ,  $|E| > |U_d|$ , dio energije se troši na otporima armaturnog kruga, a dio se vraća u mrežu (stroj radi kao generator).

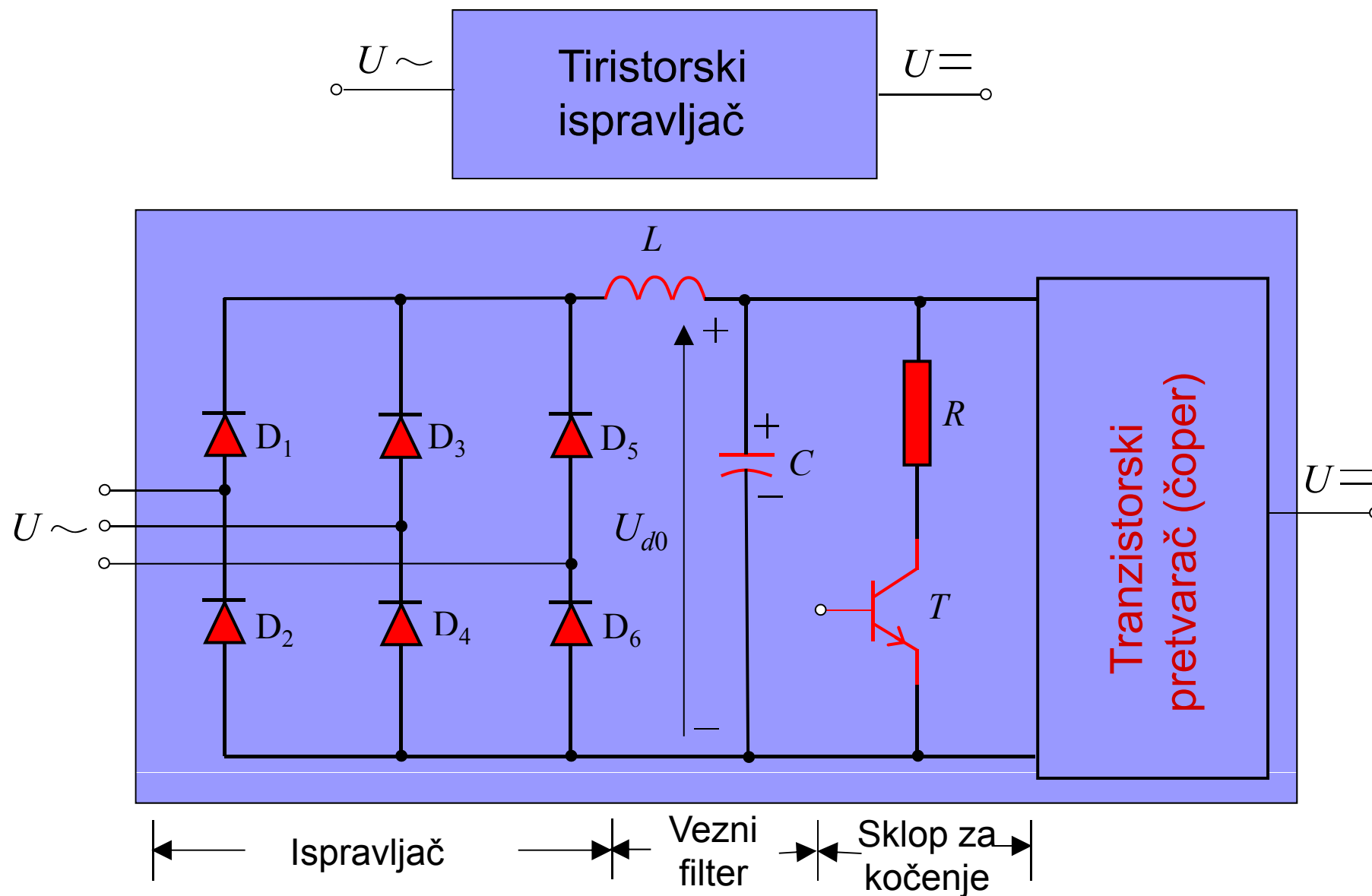
## Dinamičke karakteristike tiristorskog ispravljača

- Dinamičke karakteristike tiristorskih ispravljača vezane su uz:
- **Diskretnost upravljanja** – tiristor može doći u stanje vođenja u određenom trenutku unutar pulzacije napona. Početak vođenja ovisi o brzini promjene upravljačkog signala  $d\alpha/dt$ .
- **Nepotpunost upravljanja** – stvara problem ako je  $d\alpha/dt > \omega_m$ , jer se tada odzivi kod povećanja i smanjivanja upravljačkog signala razlikuju.
- Dinamička svojstva ovise o amplitudi i frekvenciji upr. signala → **nelinearan element**.
- Odziv na promjenu upravljačkog signala nije jednoznačan (ovisi o režimu vođenja).
- **Diskontinuirano vođenje** – prijelazni proces završava unutar jedne pulzacije, tj. ne vidi se djelovanje armaturne vremenske konstante →  $T_a = 0$ .

### 5.2.3. Tiristorski usmjerivači

- Koriste se za regulaciju brzine vrtnje istosmjernih motora (bez reverzije i kočenja, onda se koristi ispravljač koji daje struju samo jednog smjera).
- Ako se zahtijeva reverziranje i kočenje onda se koristi usmjerivač koji se sastoji od dva ispravljača. Ispravljači su spojeni paralelno pa imamo tri spoja:
  - **antiparalelni spoj bez kružne struje** (uključen samo jedan ispravljač)
  - **antiparalelni spoj s kružnom strujom** (istovremeno uključena oba ispravljača, jedan u upravljačkom, a drugi u inverznom režimu).
  - **kružni spoj** (istovremeno uključena oba ispravljača).

## 5.3. Tranzistorski pretvarači

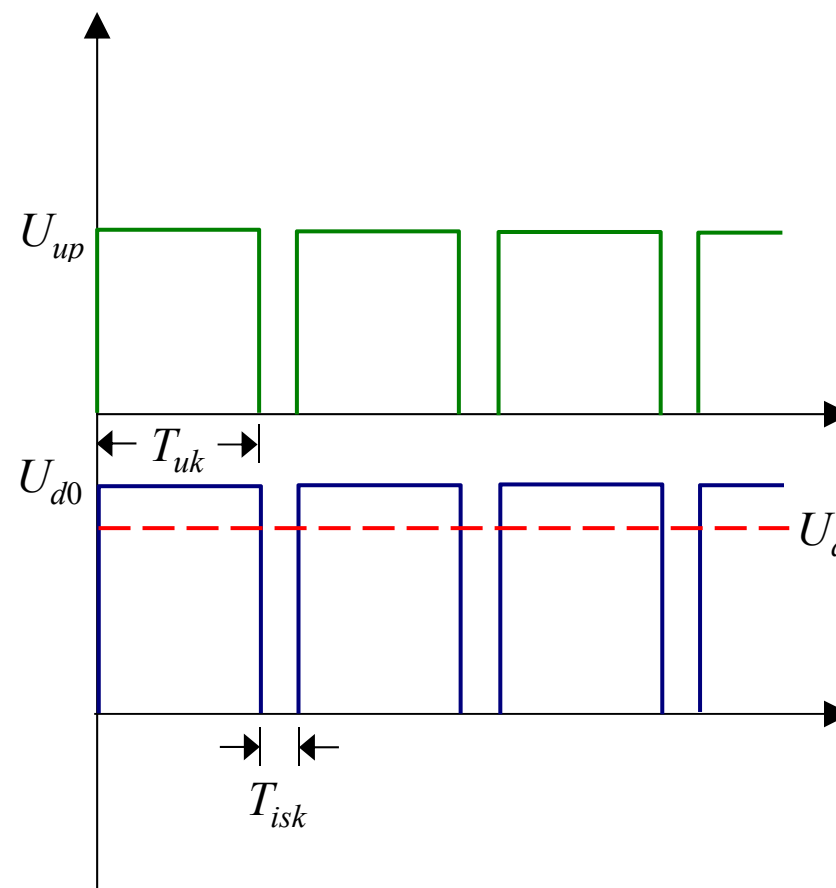
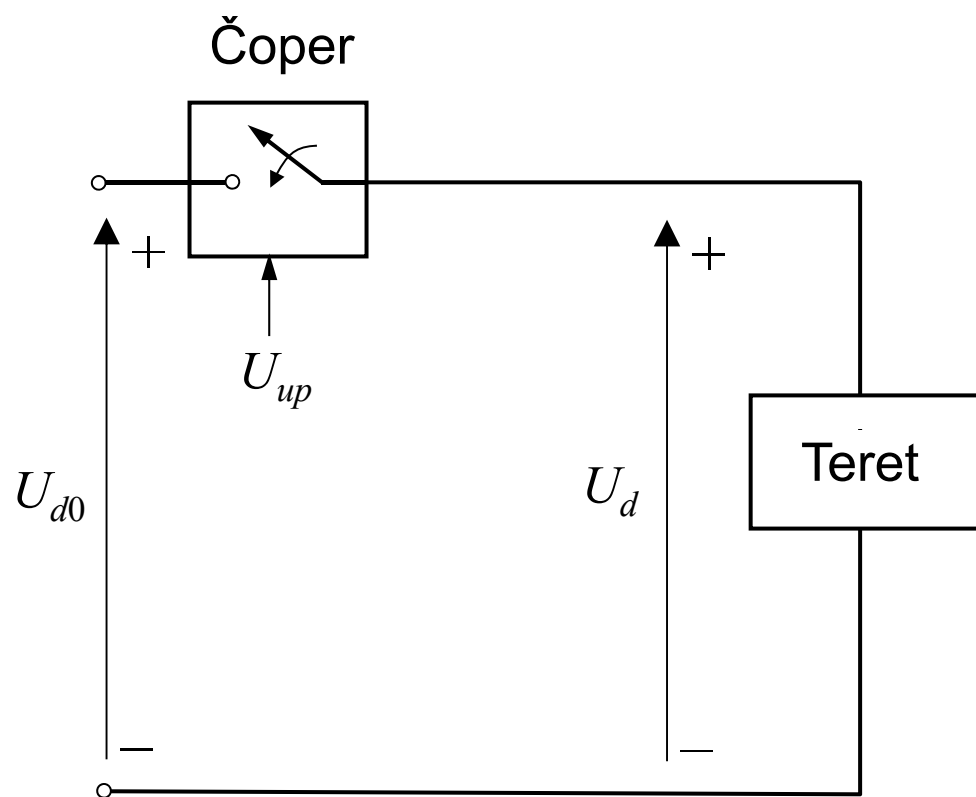


### 5.3.1. Tranzistorski pretvarač (čoper)

- Trofazni izmjenični napon se dovodi da diodni most koji vrši punovalno ispravljanje.
- Na izlazu mosta zahvaljući kondenzatoru, koji se nabija na vršnu vrijednost, uzrokuje pad napona  $U_{d0}$ .
- Sklop za kočenje služi za trošenje energije koju ne vraćamo u mrežu. Energija se troši na otporu  $R$ .
- Napon  $U_{d0}$  dovodi se na tranzistorski pretvarač (čoper) koji taj napon (istosmjerni napon) pretvara u istosmjerni nivo.
- Na sljedećoj je slici čoper prikazan pomoću sklopke koja je upravljana upravljačkim naponom  $U_{up}$  koji ima logičko značenje.
- Ako se na čoper priključi teret, kroz njega će teći struja i na njemu će se stvarati pad napon  $U_d$ .
- Za  $U_{up}=1$  na teretu imamo napon  $U_{d0}$ , za  $U_{up}=0$  na teretu je napon 0.

## Tranzistorski pretvarač (čoper)

- Čoperom se kontrolira višak energije koji se ne vraća u mrežu nego se troši na potrošaču ( $R$ ).



Čoperom se regulira dotok energije

## Tranzistorski pretvarač (čoper)

- Frekvencija prekidanja je definirana na sljedeći način:

$$f_c = \frac{1}{T_{uk} + T_{isk}} = \frac{1}{T},$$

gdje su  $T_{uk}$  i  $T_{isk}$  intervali uključivanja, odnosno isključivanja.

- Sljedeći bitan parametar je *popunjenost signala* (duty cycle):

$$d = \frac{T_{uk}}{T}.$$

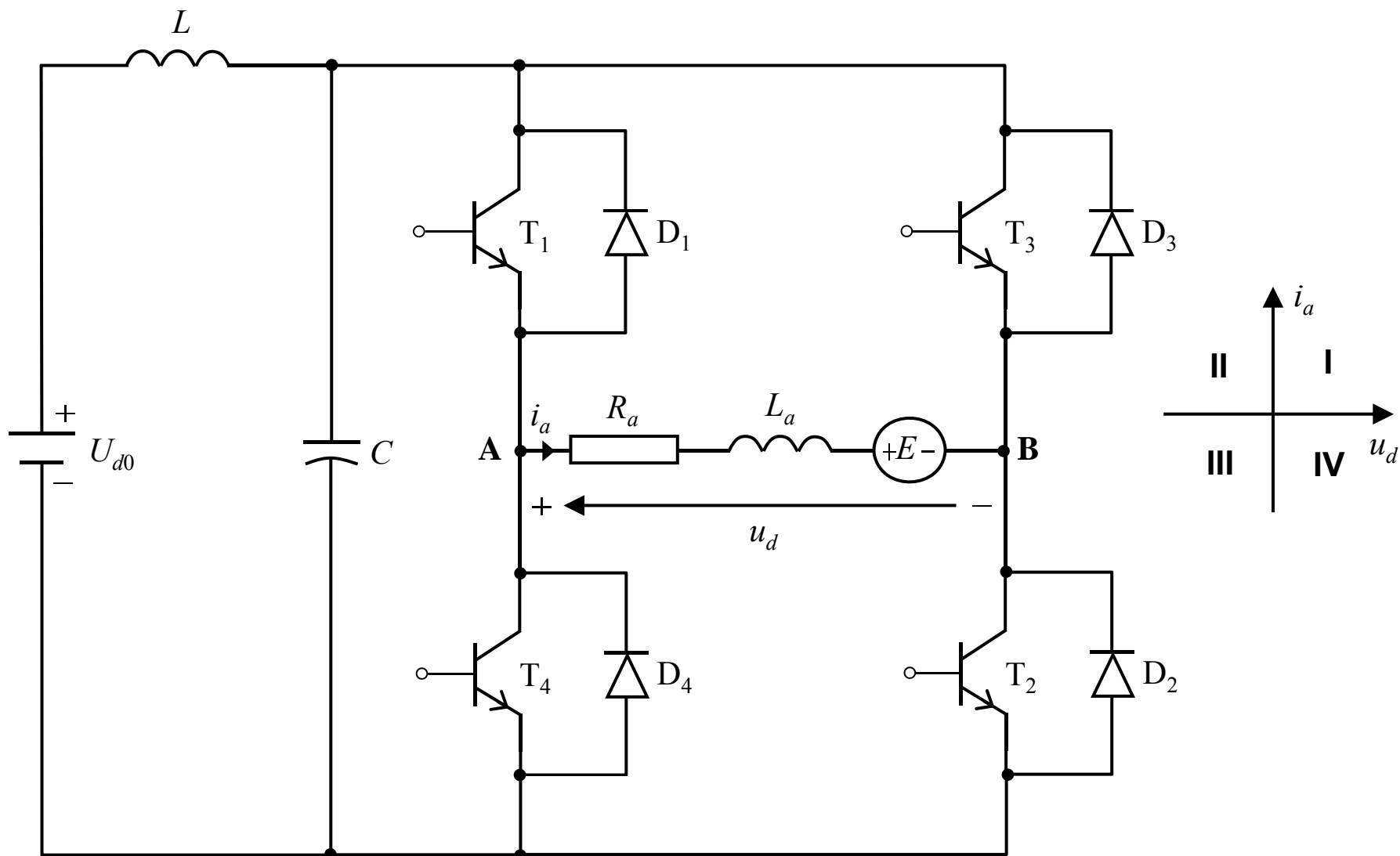
- Izlazni napon  $U_d$  iznosi:

$$U_d = dU_{d0}.$$

- Promjena popunjenosti (pogodno za otvorene reg. krugove):
  - $f_c = \text{konst.}$ ,  $T_{uk}$  promjenjivo,
  - $T_{uk} = \text{konst.}$ ,  $f_c$  promjenjivo.

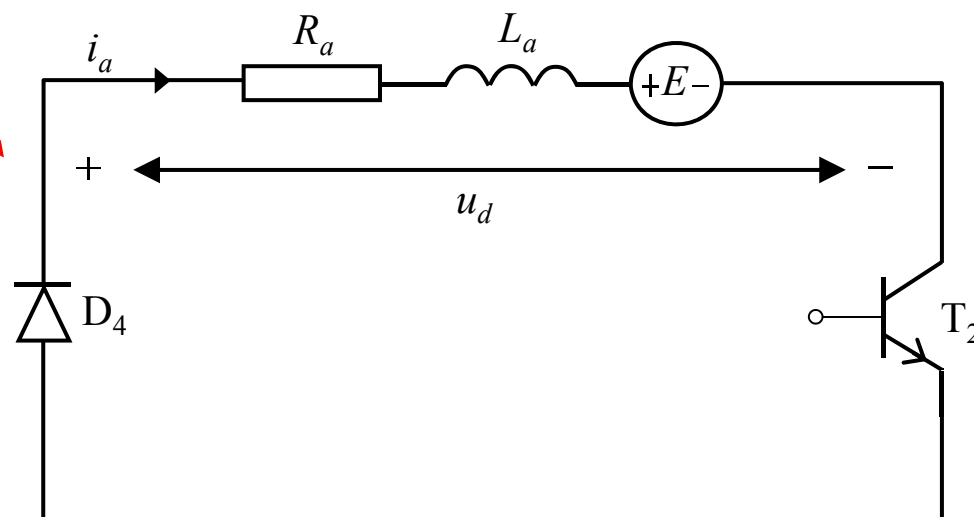


## Tranzistorski pretvarač (čoper)



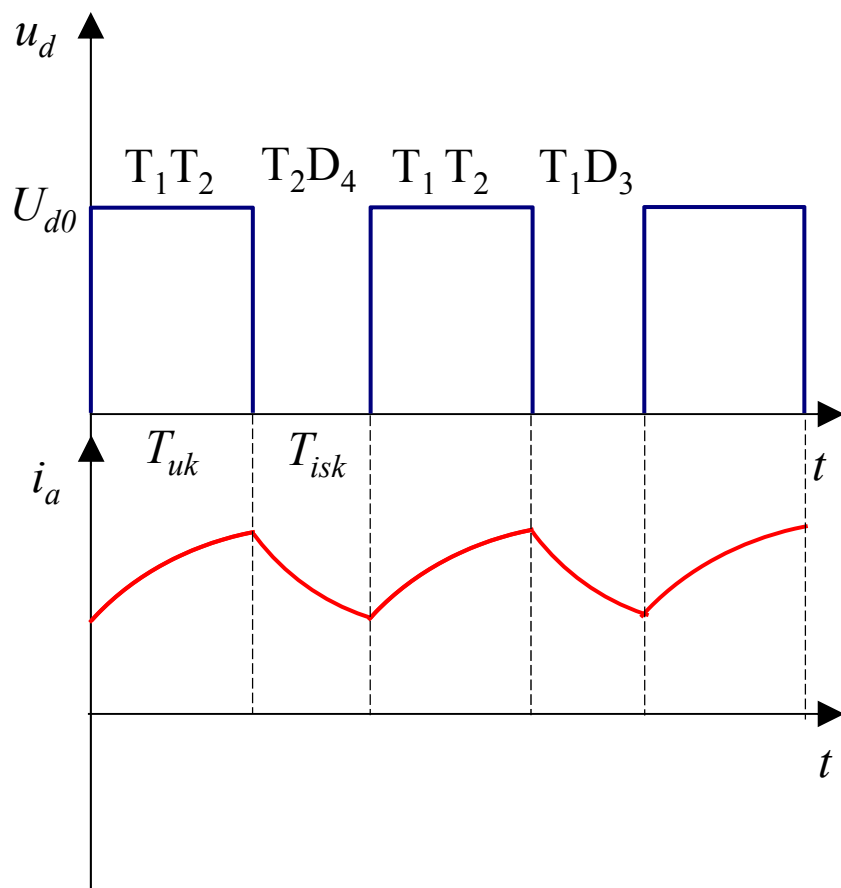
## Rad u prvom kvadrantu

- Pretpostavke za analizu rada čopera:
  - sklopovi za upravljanje bazom tranzistora (ukapčanje, iskapčanje) prenose djelovanje upravljačkih signala,
  - tranzistorske sklopke su idealne,
  - atiparalelne diode su također idealne.
- Rad u prvom kvadrantu
  - $T_1, T_2$  uključeni – interval  $T_{uk}$  ( $u_d = U_{d0}$ ),
  - $i_a > 0, u_d > 0$  ( $i_a$  teče od A prema B),
  - $T_1$  ili  $T_2$  isključen – interval  $T_{isk}$  ( $u_d = 0$ ).

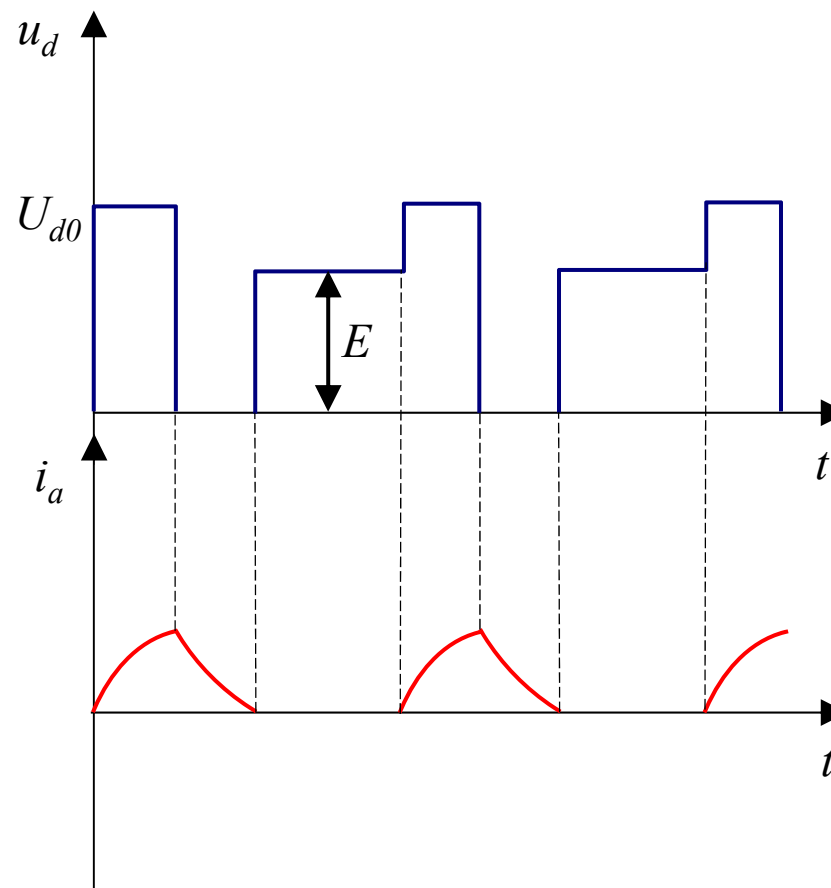


# Rad u prvom kvadrantu

## Kontinuirani režim vođenja

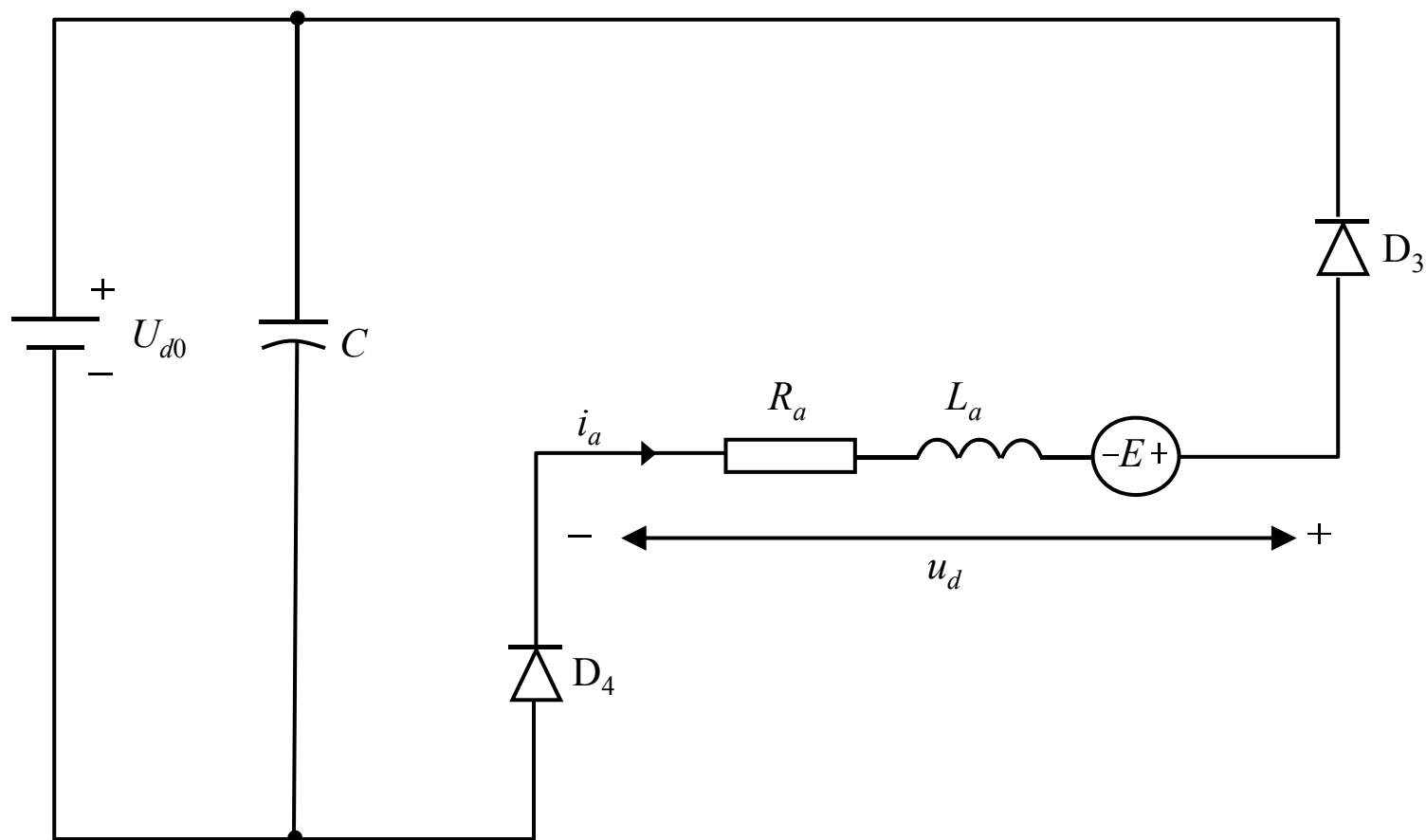


## Diskontinuirani režim vođenja



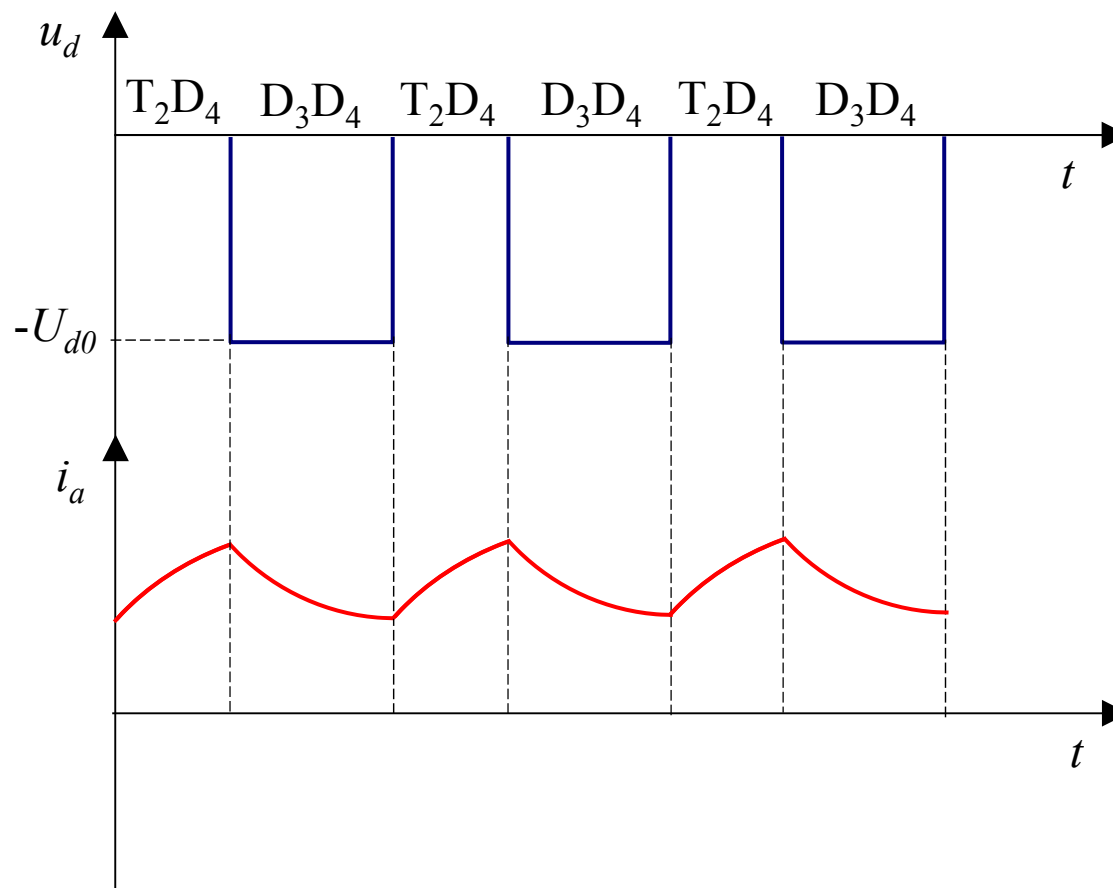
## Rad u drugom kvadrantu

- Rad u drugom kvadrantu
  - $T_1, T_2$  isključeni –  $D_4, D_3$  vode,
  - $i_a > 0, u_d < 0$ .



## Rad u drugom kvadrantu

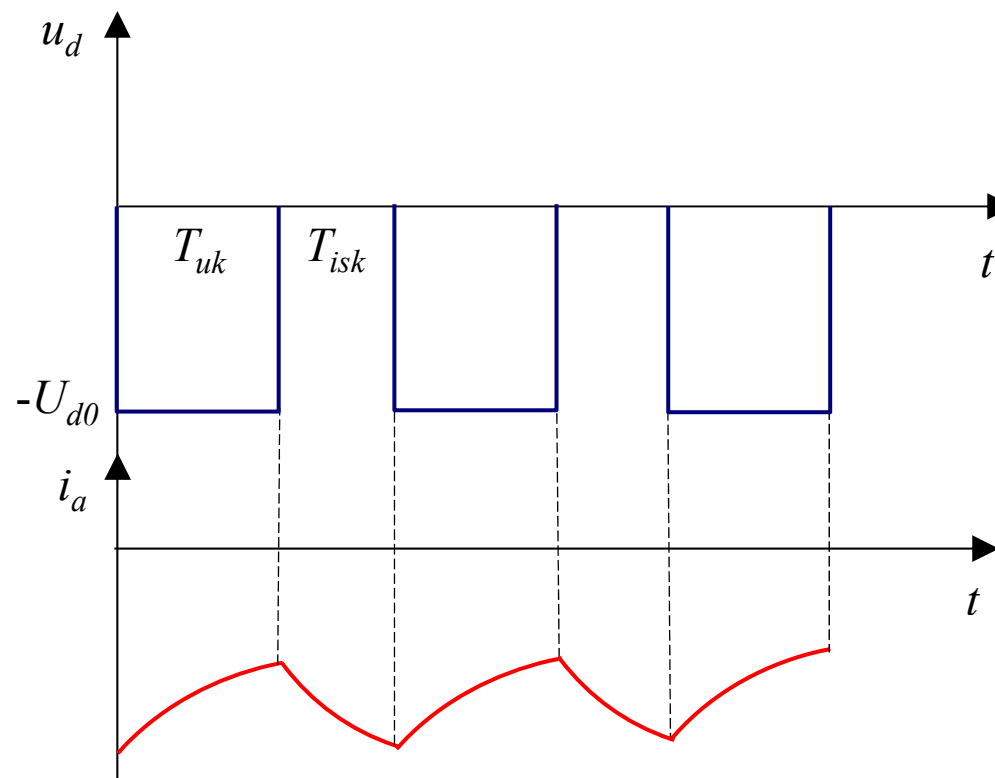
- Povrat energije u izvor ili na trošilo  $R$ .
- Valni oblici napona i struje



## Rad u trećem i četvrtom kvadrantu

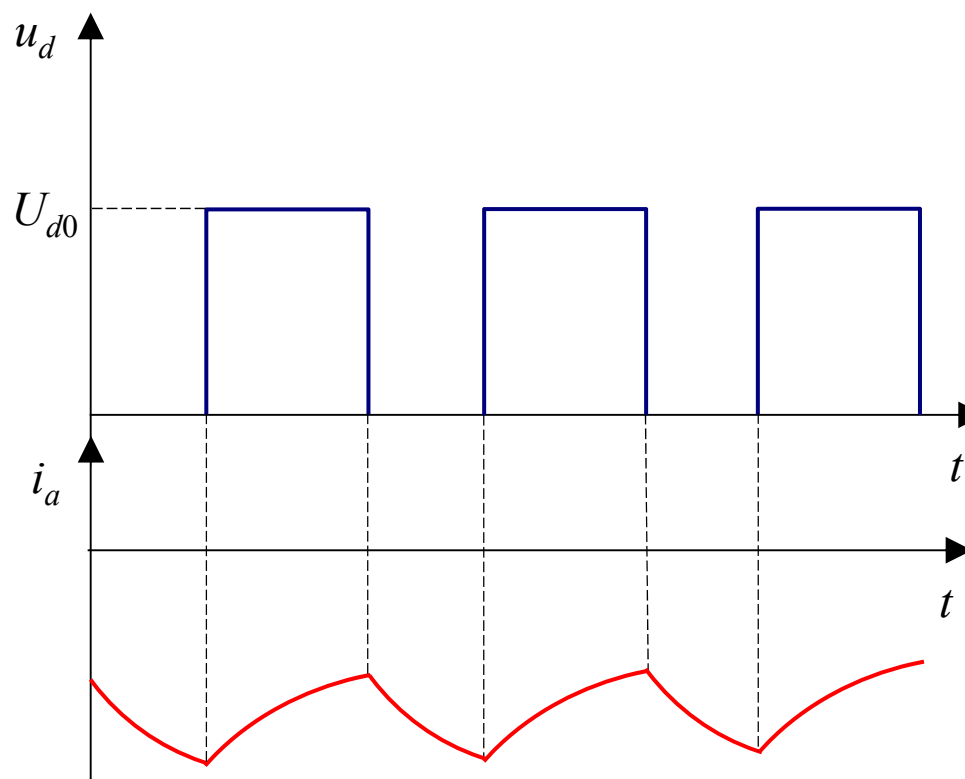
### ▪ Rad u trećem kvadrantu

- $T_3, T_4$  uključeni – interval  $T_{uk}$  ( $u_d = -U_{d0}$ ),
- $i_a < 0, u_d < 0$  ( $i_a$  teče od B prema A),
- $T_3$  ili  $T_4$  isključen – interval  $T_{isk}$  ( $u_d = 0$ ).
- sličnost s prvim kvadrantom.



## Rad u trećem i četvrtom kvadrantu

- Rad u četvrtom kvadrantu
  - $T_3, T_4$  isključeni –  $D_2, D_1$  vode,
  - $i_a < 0, u_d > 0$  ( $i_a$  teče od A prema B).



## Model čopera

- Prijenosna funkcija čopera je oblika:

$$G_{\check{c}}(s) = \frac{K_{\check{c}}}{1 + T_{\check{c}}s},$$

- Koeficijent pojačanja i vremenska konstanta čopera iznose:

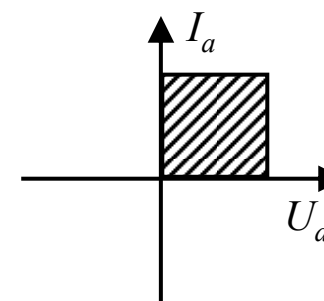
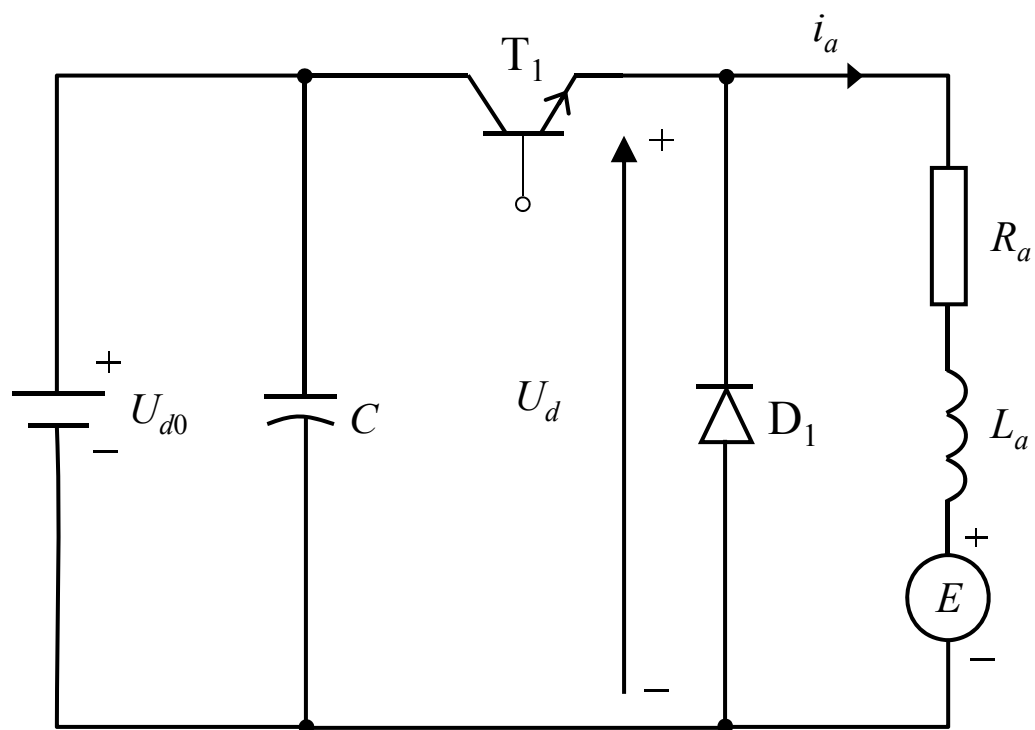
$$K_{\check{c}} = \frac{U_{d0}}{U_{up}},$$
$$T_{\check{c}} = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f_c}.$$

- Kada je  $f_c \gg$  slijedi da je:

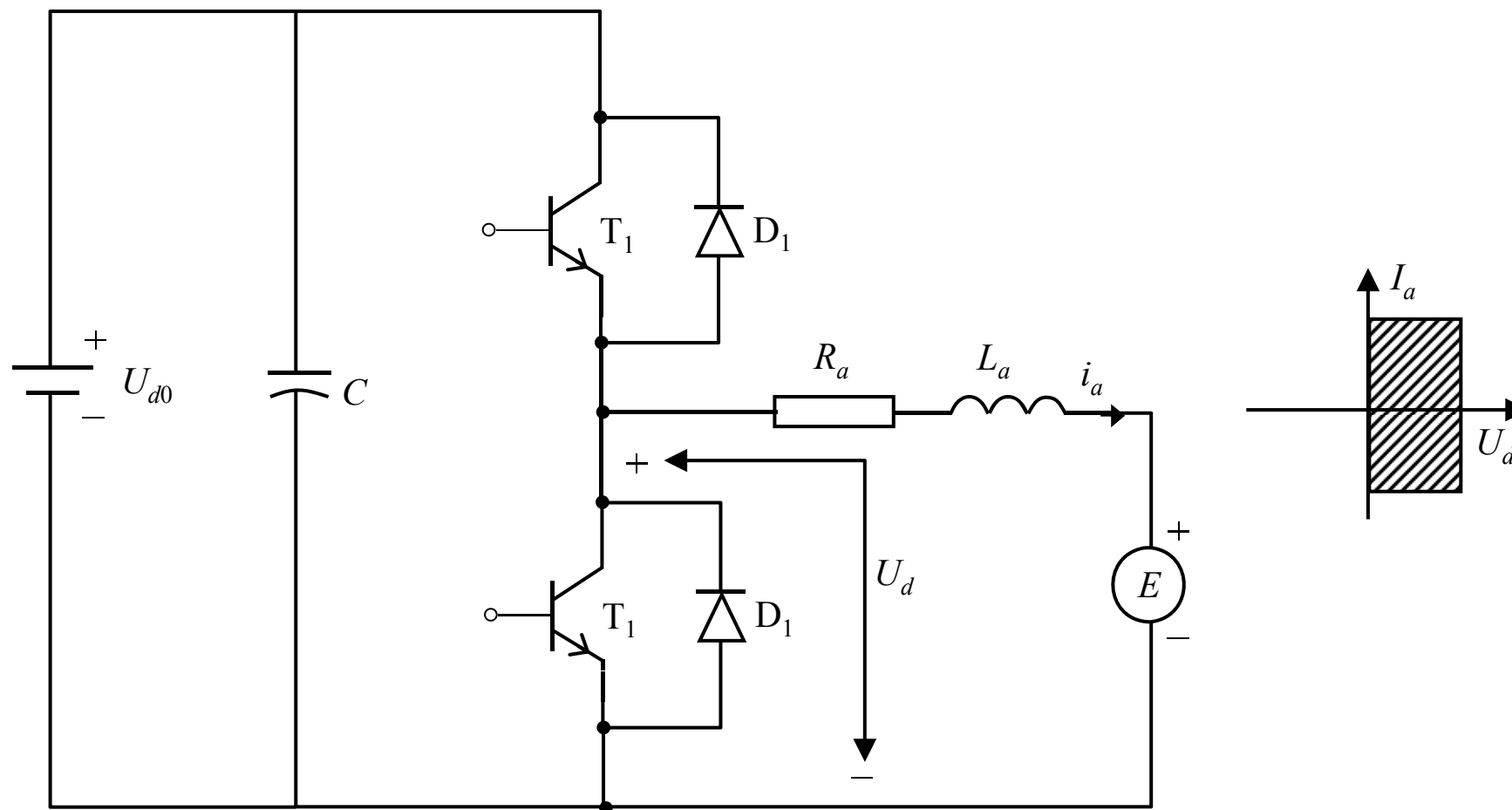
$$G_{\check{c}}(s) \cong K_{\check{c}}.$$



## Različiti tipovi izvedbi čopera



## Različiti tipovi izvedbi čopera



## Statičke karakteristike tranzistorski napajanog EMP

- Pretpostavke:
  - motor s nezavisnom i konstantnom uzбудom,
  - brzina vrtnje je konstanta.
- Uz ove pretpostavke slijede jednađbe za određivanje statičkih karakteristika:

$$U_d = I_a R_a + E = I_a R_a + K\Omega,$$

$$U_d = dU_{d0},$$

$$M_m = KI_a,$$

$$M_m = K \frac{(dU_{d0} - K\Omega)}{R_a} = f(d, \Omega).$$

## Kontinuirani režim vođenja

- Za kontinuirani režim vođenja vrijedi:

$$\text{a) } U_{d0} = U_a = E + I_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad 0 < t < dT,$$

$$\text{b) } 0 = E + I_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad dT < t < T.$$

- Iz jednadžbe pod b) i uz uvjet  $i_a(T)=0$  slijedi:

$$d_{gr} = \left( \frac{T_a}{T} \right) \ln \left[ 1 + \frac{E}{U_{d0}} \left( e^{\frac{T}{T_a}} - 1 \right) \right].$$

- U slučaju da je  $d < d_{gr}$  imamo diskontinuiranu struju armature:

$$d_{gr} = f \left( \frac{T_a}{T}, \frac{E}{U_{d0}} \right).$$

## Primjer 1

Istosmjerni motor napajan je iz čopera koji je vezan na izlaz mosnog spoja diodnog ispravljača priključenog na mrežu (3 $\phi$ , 230 V, 50 Hz). Podaci o motoru i čoperu su:

$$P_n=15 \text{ kW}, \quad U_{an}=230 \text{ V}, \quad n_n=500 \text{ min}^{-1}, \quad R_a=0.04 \text{ } \Omega, \quad L_a=1.5 \text{ mH}, \\ K=4.172 \text{ Vs/rad}, \quad f_c=2 \text{ kHz}.$$

Motor se vrti brzinom od 300  $\text{min}^{-1}$  uz popunjenost signala čopera od 55 %. Odrediti srijednu vrijednost armaturne struje i momenta motora. Također, odrediti da li je struja motora kontinuirana.

Rješenje:

Napon  $U_{d0}$  računa se na sljedeći način:

$$U_{d0} = U_m \left( \sin \frac{\pi}{m} \right) \frac{m}{\pi} \cos 0^\circ = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot \frac{3}{\pi} = 310.5 \text{ V}, \quad (m = 6).$$

## Primjer 1

Brzina vrtnje motora iznosi:

$$\Omega = \frac{n\pi}{30} = 31.42 \text{ rad/s.}$$

Na temelju dobivenih vrijednosti slijedi da je struja armature jednaka:

$$I_a = \frac{dU_{d0} - K\Omega}{R_a} = \frac{0.55 \cdot 310.5 - 4.172 \cdot 31.42}{0.04} = 991.88 \text{ A.}$$

Moment motora ima vrijednost:

$$M_m = KI_a = 4138.1 \text{ Nm.}$$

Vremenska konstanta armaturnog kruga iznosi:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0.0015}{0.04} = 0.0375 \text{ s.}$$

## Primjer 1

Interval ukapčanja + iskapčanja iznosi:

$$T = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{2 \cdot 10^3} = 0.0005 \text{ s.}$$

Vrijednost protuelektromotorne sile je:

$$E = K\Omega = 4.172 \cdot 31.42 = 131.1 \text{ V.}$$

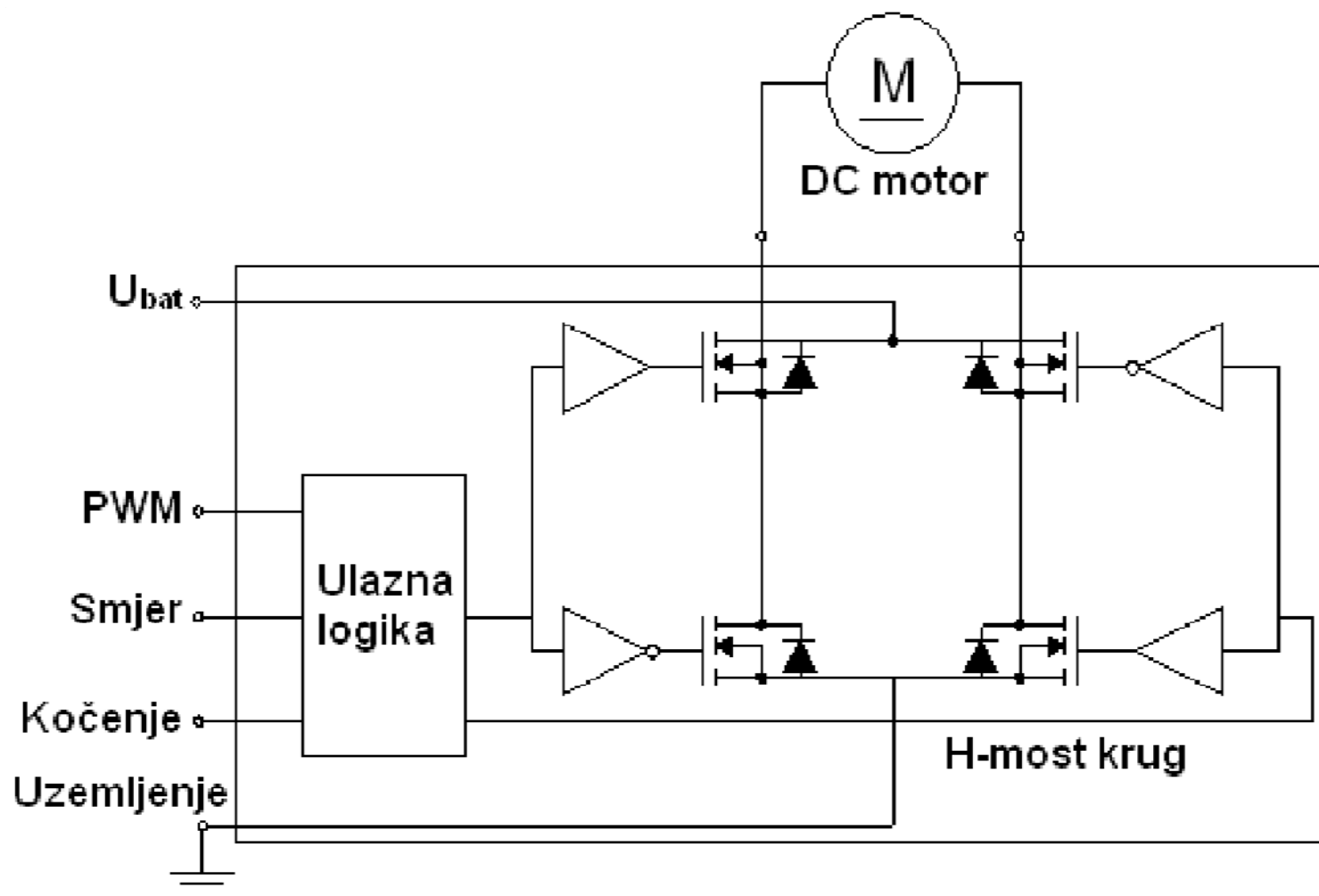
Granična vrijednost popunjenosti signala iznosi:

$$d_{gr} = \left( \frac{T_a}{T} \right) \ln \left[ 1 + \frac{E}{U_{d0}} \left( e^{\frac{T}{T_a}} - 1 \right) \right] = 75 \ln \left[ 1 + \frac{131.1}{310.5} \left( e^{\frac{1}{75}} - 1 \right) \right] = 0.423.$$

Budući da je  $d > d_{gr}$  slijedi da je struja kontinuirana.

## 5.4. Upravljanje motorom korištenjem H-mosta

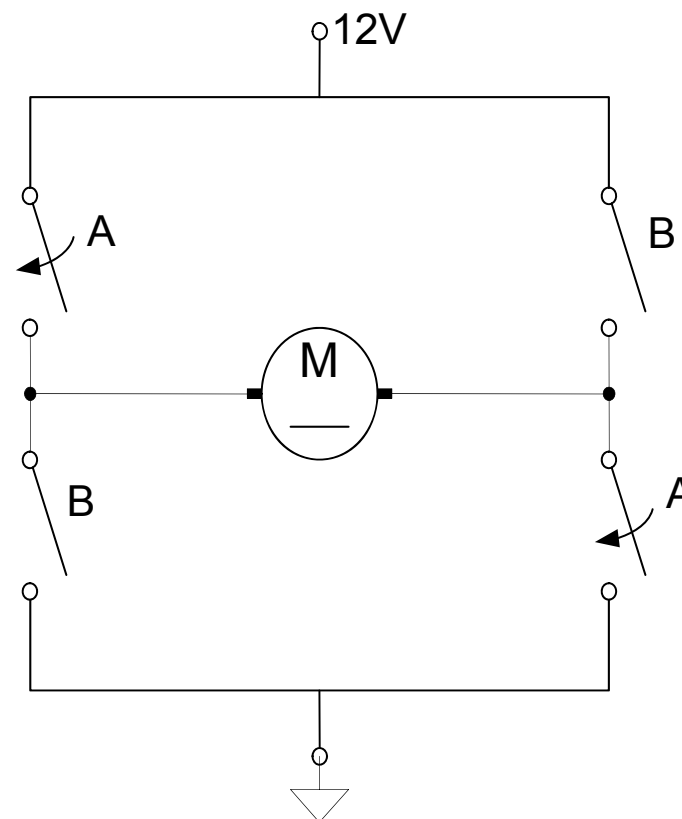
- Shema upravljanja istosmjernim motorom korištenjem H-mosta.
- Napon koji se dovodi je istosmjerni napon (napon baterije).





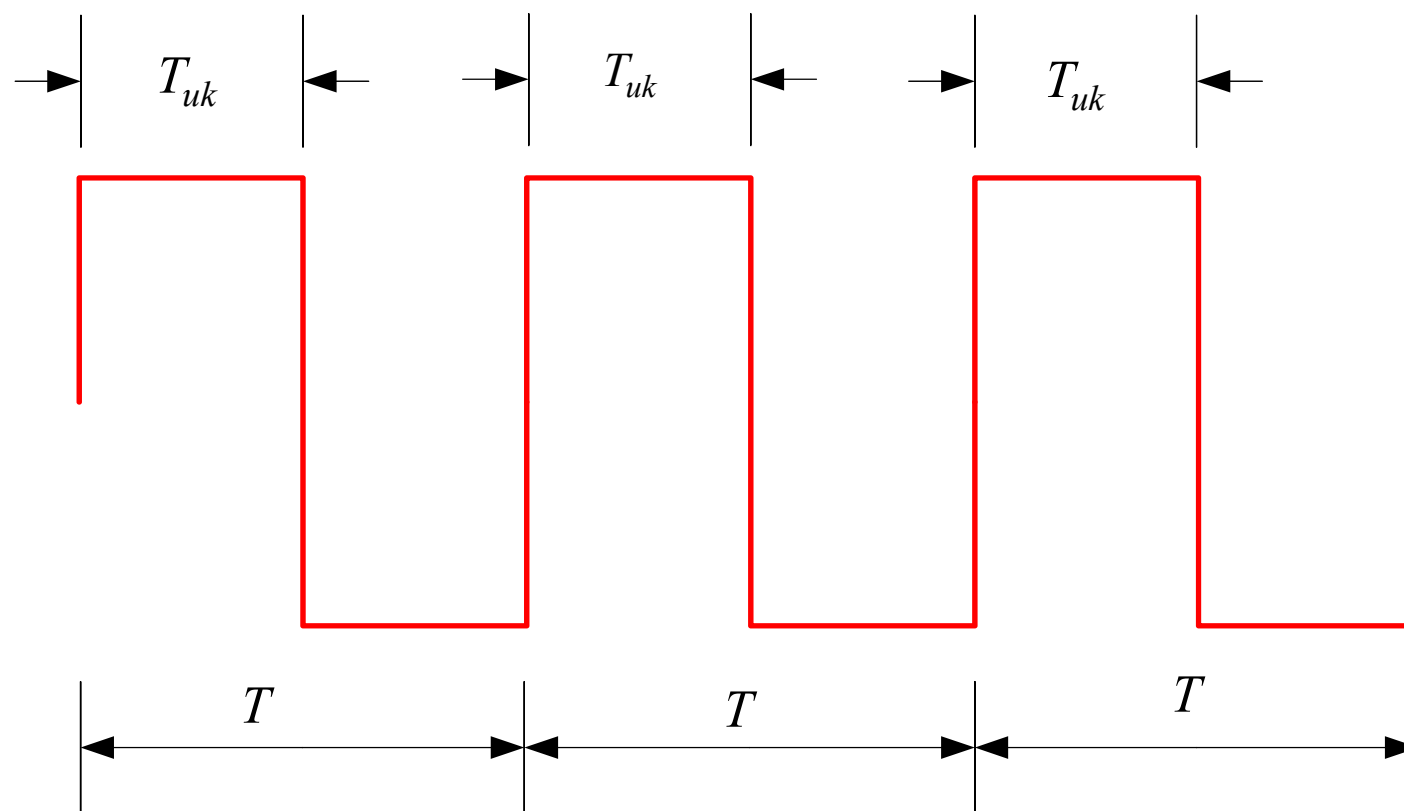
## Upravljanje motorom korištenjem H mosnog spoja

- Prekapčanje smjera upravljanja
  - “A” prekidači zatvoreni – tok struje u smjeru kazaljke na satu.
  - “B” prekidači zatvoreni – tok struje suprotan smjeru kazaljke na satu.
- PWM za upravljanje brzinom
  - Popunjenost (duty cycle) “A”-ova za brzine u smjeru kazaljke na satu.
  - Popunjenost “B”-ova za brzine suprotne smjeru kazaljke na satu.
- Može se konfigurirati za kočenje
  - Donji “B” i “A” za kočenje.



## Upravljanje motorom korištenjem H mosnog spoja

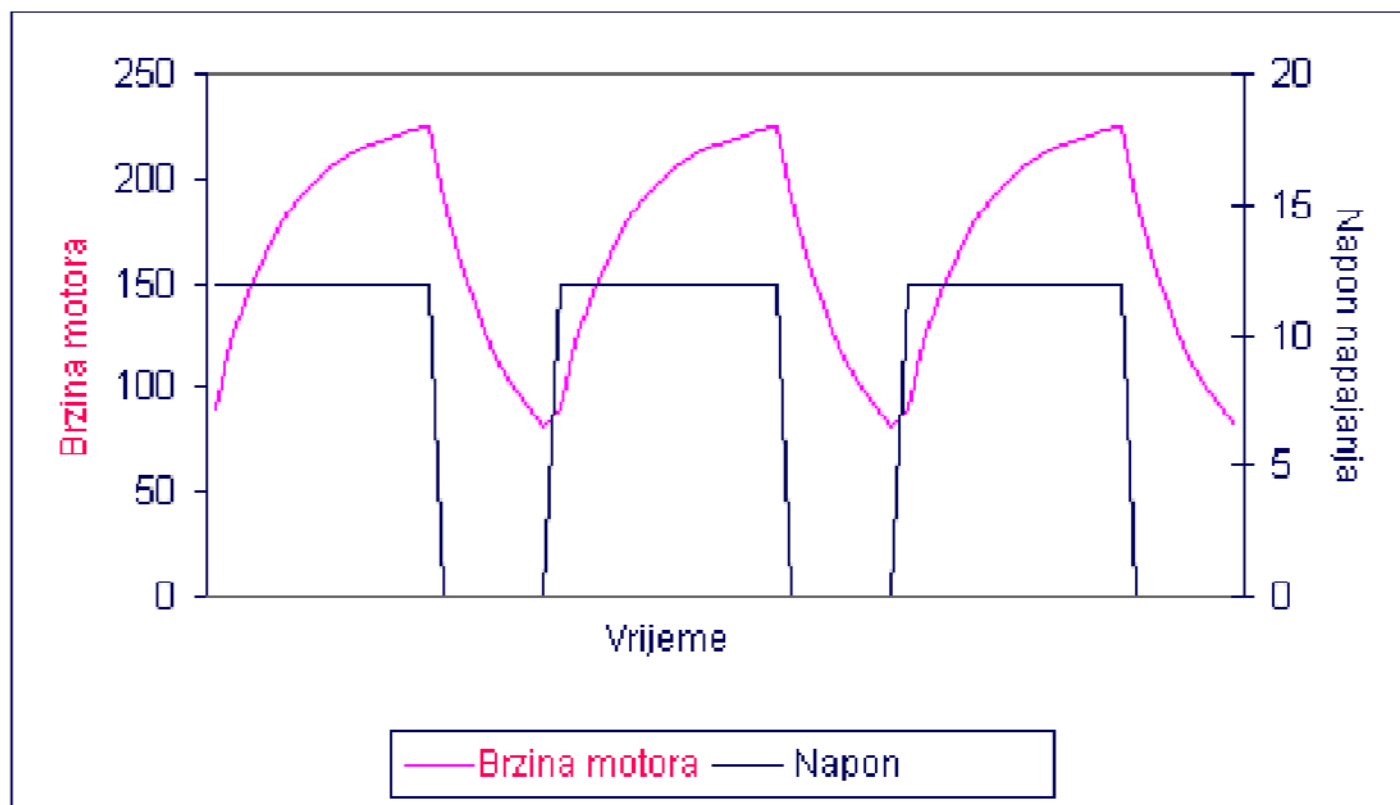
- Definicija popunjenosti



$$\text{Popunjenost} = \frac{T_{uk}}{T}.$$

## Upravljanje motorom korištenjem H mosnog spoja

- Brzina motora je direktno proporcionalna primijenjenom naponu (naponu napajanja).
- Ako se motor napaja iz baterija čiji je napon konstantan i iznosi 12 V, kako taj napon smanjiti na 6 V?



### 5.4.1. PWM (Pulsno širinska modulacija)

- Na prethodnoj slici je prikazan način upravljanja motorom prekapčanjem brzine.
- Kada je primijenjen napon od 12 V, brzina ima tendenciju porasta.
- Kada se nakon nekog vremena isključi napajanje, brzina motora se počinje smanjivati.
- Ako bismo naizmjenično ukapčali i iskapčali napajanje motora, pri čemu su intervali kada je motor napajan jednakog trajanja, a također i intervali kada je napajanje isključeno, dobili bi se signali prikazani na prethodnoj slici.
- Sa ovih signala se vidi da je prosječan iznos brzine oko 150 obrtaja u minuti.
- Ovakav oblik signala brzine motora dobiva se iz bloka za pulsno širinsku modulaciju (PWM).

## PWM (Pulsno širinska modulacija)

- Frekvencija rezultirajućeg PWM signala ovisi o frekvenciji primijenjenog pulsnog signala.
- Postavlja se temeljno pitanje: “Koliku frekvenciju signala želimo?”
- Frekvencije između 20 Hz i 18 kHz mogu proizvesti zvučni “vrisak” iz kontrolera brzine i motora.
- RF interferencija emitirana električkim krugom bit će loša ako je primijenjena visoka frekvencija prekapčanja.
- Svako ukapčanje i iskapčanje MOSFET-a regulatora brzine rezultira u malom gubitku napajanja (snage).
- Za veliku frekvenciju prekapčanja, najstabilniji je valni oblik struje motora. Ovaj valni oblik će biti šiljast na niskim frekvencijama, ali će na visokim frekvencijama induktivitet motora izgladiti signal na srednju razinu istosmjerne struje proporcionalnu PWM zahtjevima. Zašiljenost signala će prouzrokovati velike gubitke snage na otporu vodiča, MOSFET-a i namota motora nego stabilni valni oblik istosmjerne struje.

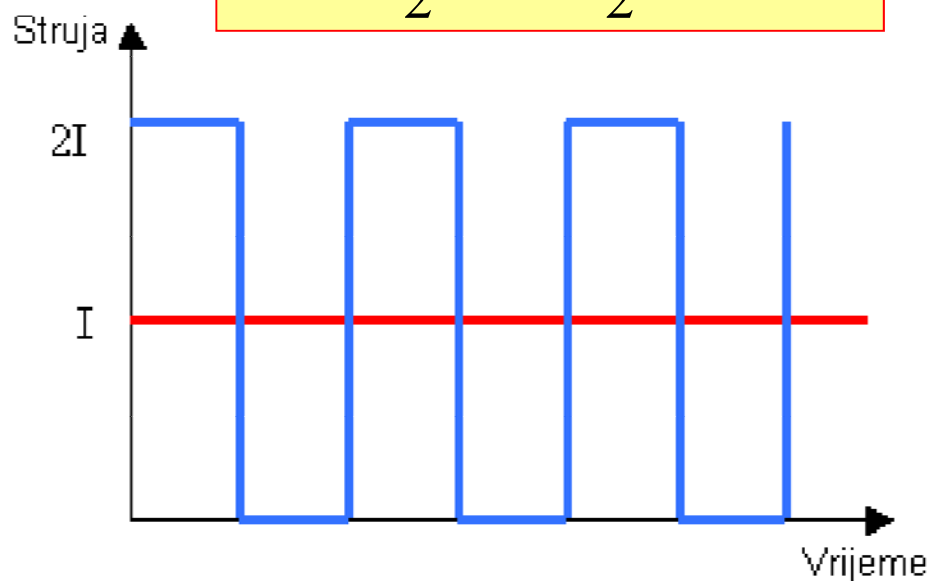
## PWM (Pulsno širinska modulacija)

- Na sljedećoj slici su prikazana dva signala koji imaju jednak prosječan iznos struje.
- Kada se promatra disipacija snage na otporu  $R$  dobiva se za DC slučaj:

$$P = I^2 R.$$

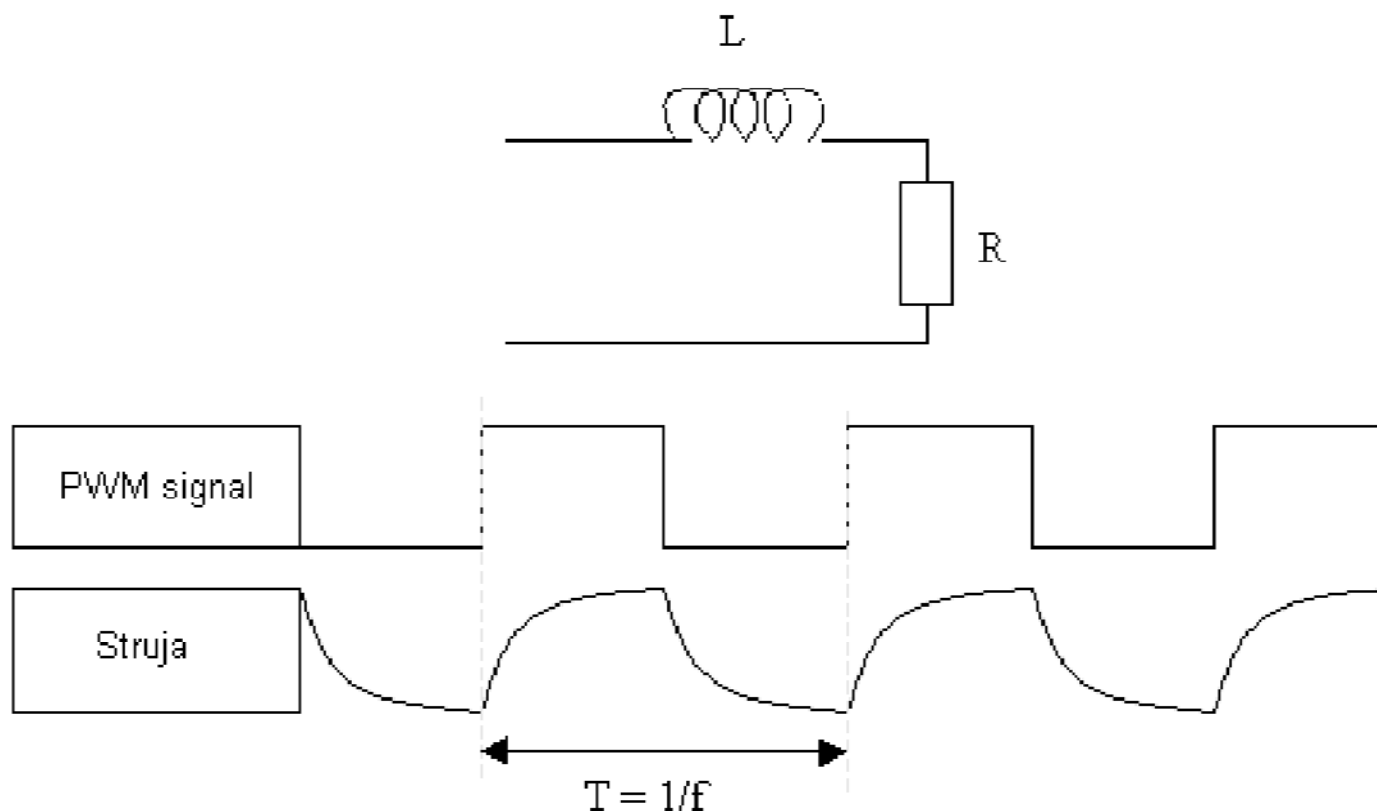
- Za slučaj prekapčanja prosječan iznos snage iznosi:

$$P = \frac{(2I)^2 R}{2} + \frac{0^2 R}{2} = 2I^2 R.$$



## Izbor frekvencije PWM-a

- Izbor frekvencije na temelju karakteristika motora.
- Jedan od načina izbora frekvencije je da želimo takav valni oblik struje koji će biti stabilan unutar 'p' procenata.
- Zatim se matematički proračunava minimalan iznos frekvencije za koji se postiže definirani cilj.



## Izbor frekvencije PWM-a

- Na slici je prikazan najlošiji slučaj, 50:50 PWM omjer, i porast struje je prikazan za slučaj “gušenja” motora, što je također najlošiji slučaj.
- Valni oblik struje u poluintervalu sada je dan sa:

$$i(t) = I e^{-\frac{t}{\tau}} = I e^{-\frac{tR}{L}},$$

gdje je:  $\tau$  vremenska konstanta kruga.

- Tako struja u trenutku  $T/2$  ( $i_1$ ) ne smije biti manja od  $p\%$  od struje u trenutku  $t=0$  ( $i_0$ ).
- Ovo znači da postoji sljedeći uvjet ograničenja:

$$i_1 = \left(1 - \frac{p}{100}\right) i_0.$$



## Izbor frekvencije PWM-a

- Uz navedene relacije i uvjet ograničenja imamo:

$$Ie^{-\frac{TR}{2L}} = \left(1 - \frac{p}{100}\right)Ie^{-0}$$

$$e^{-\frac{TR}{2L}} = \left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

$$-\frac{TR}{2L} = \ln\left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

$$T = -\frac{2L}{R} \ln\left(1 - \frac{p}{100}\right).$$

- Slijedi da je frekvencija prekapčanja  $f=1/T$  jednaka:

$$f = -\frac{R}{2L \ln\left(1 - \frac{p}{100}\right)}.$$

## Izbor frekvencije PWM-a

- Starter Ford Fiesta automobila ima sljedeće aproksimativne parametre:

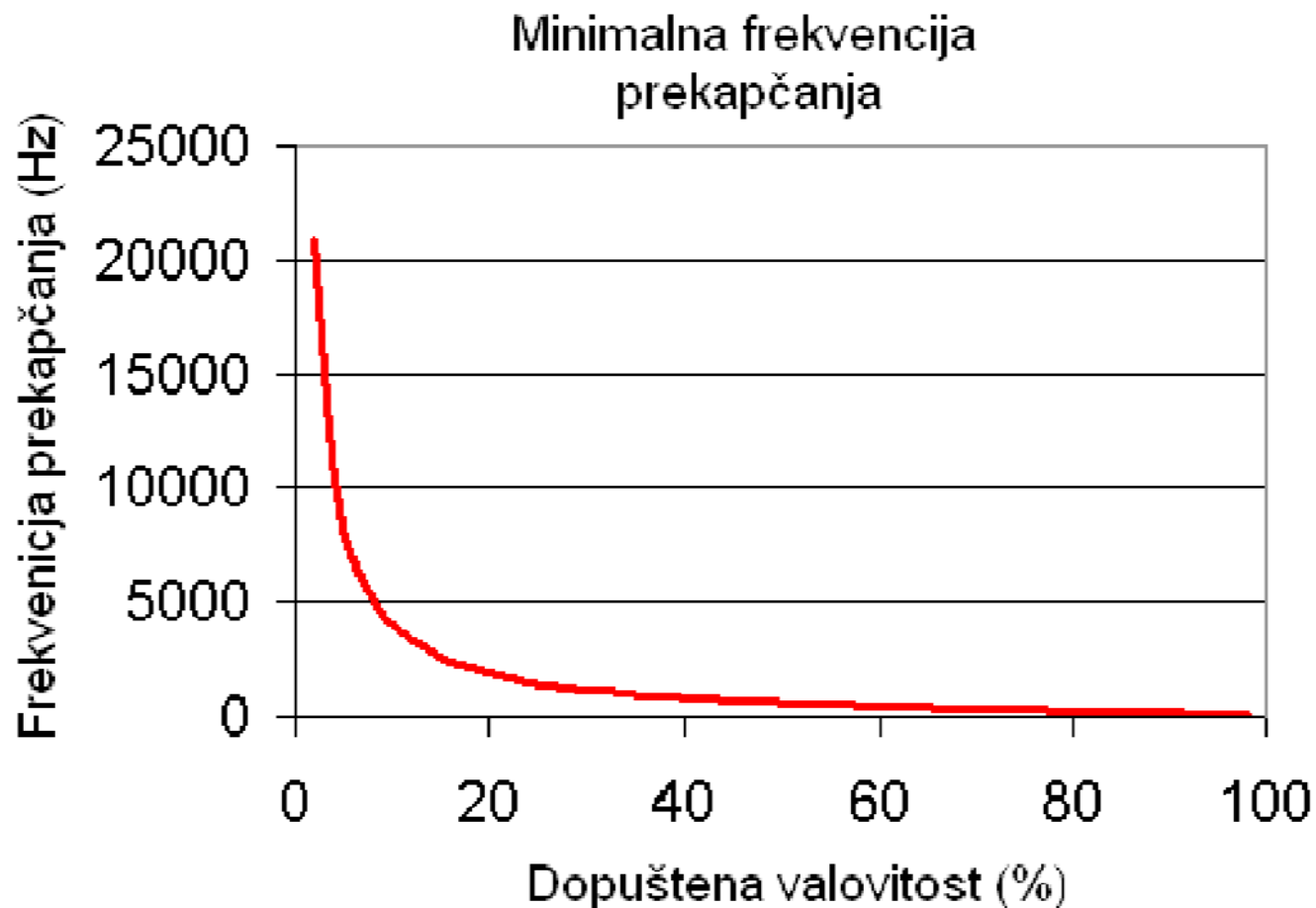
$$R = 0.04\Omega, \quad L = 70\mu\text{H}.$$

- Pri tome se također treba uključiti otpore na MOSFET-ovima,  $2 \times 10 \text{ m}\Omega$ , što ukupno daje  $0.06 \Omega$ .
- U sljedećoj tabeli su dane izračunate frekvencije za zadani procenat.

Procenat	Frekvencija
1	42 kHz
5	8.2 kHz
10	4 kHz
20	1900 Hz
50	610 Hz

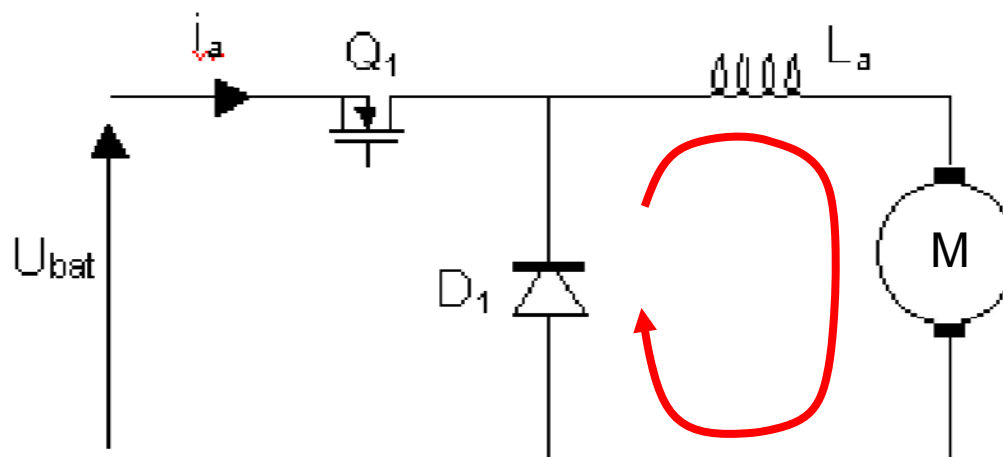
## Izbor frekvencije PWM-a

- Na sljedećoj slici je prikazan grafikon frekvencije prekapčanja u ovisnosti od dopuštene valovitosti.
- Dopuštena, niska valovitost se postiže za frekvencije ispod 5 kHz.



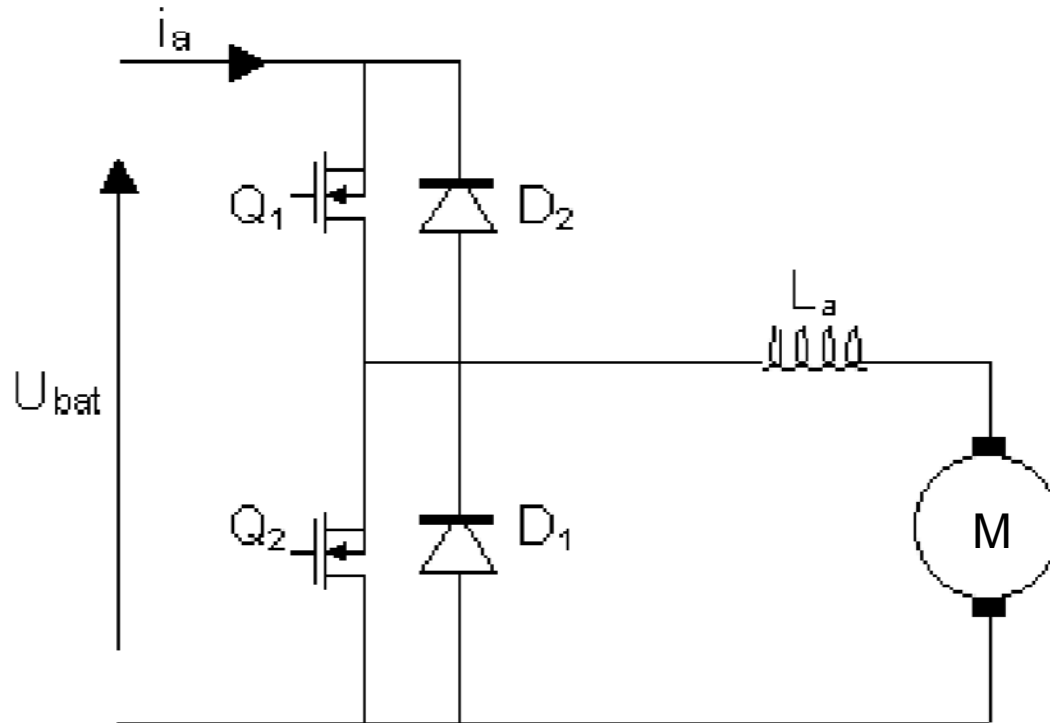
## Krug upravljanja brzinom

- Na sljedećoj slici je prikazan jednostavan krug.
- Sa  $L_a$  je označena induktivnost uzbuđnog i armaturnog kruga, dok za daljnja razmatranja otpornosti armature i uzbuđnog kruga nije važna, pa stoga na slici nisu ni prikazane.
- Kada je MOSFET tranzistor  $Q_1$  otvoren, struja protiče kroz uzbuđni i armaturni namot i motor rotira.
- Kada se MOSFET zatvori, struja istovremeno ne prestaje teći tako da napon na zavojnici tjera smanjenu struju u istom smjeru, koja sada teče kroz krug armature i nazad kroz diodu  $D_1$  (prikazano crvenom bojom).
- Kada ne bi bilo diode, tada bi se javio veliki napon na  $Q_1$  i MOSFET bi se zapalio.



## Obnavljanje (regeneracija)

- U prethodno prikazanom krugu struja teče samo u jednom smjeru, od baterije do motora.
- Kada željena brzina motora naglo padne poželjno je da motor radi kao generator, odnosno da tjera struju u bateriju (regenerativno kočenje).
- Da bi se to postiglo treba dodati dodatne komponente (ne može se postići sa prethodnim krugom) – slika ispod.

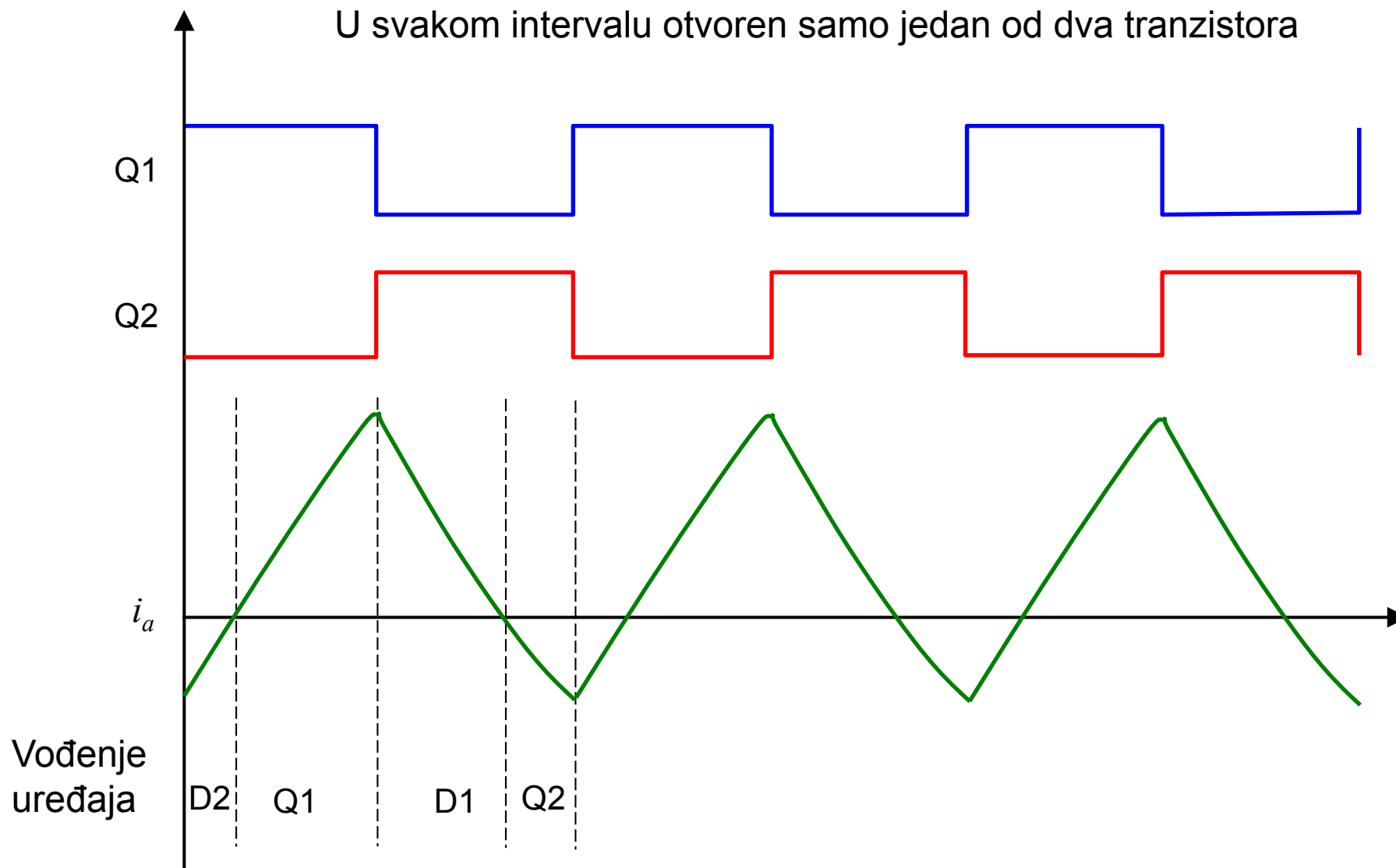


## Obnavljanje (regeneracija)

- U ovom krugu, MOSFET  $Q_1$  i dioda  $D_1$  obavljaju istu funkciju kao u prethodnom krugu. MOSFET  $Q_2$  je postavljen u suprotnoj fazi sa MOSFET-om  $Q_1$ .
- Ovo znači kada je  $Q_1$  otvoren (vodi), tada je  $Q_2$  zatvoren, i obratno.
- Kada je  $Q_1$  zatvoren motor radi kao generator (režim kočenja). Struja može teći unazad kroz  $Q_2$  koji je otvoren. Kada se  $Q_2$  zatvori, ova struja se održava sa induktivitetom, i struja će teći kroz diodu  $D_2$  i vraćati se nazad u bateriju.
- Graf struje motora kada je motor u režimu kočenja je prikazan na sljedećoj slici.
- Da bi motor radio kao generator on mora imati magnetsko polje generirano sa svitkom.
- Tok struje ovisi o teretu, tako u režimu obnavljanja struja ovisi o bateriji, odnosno o tome koliko je baterija puna.

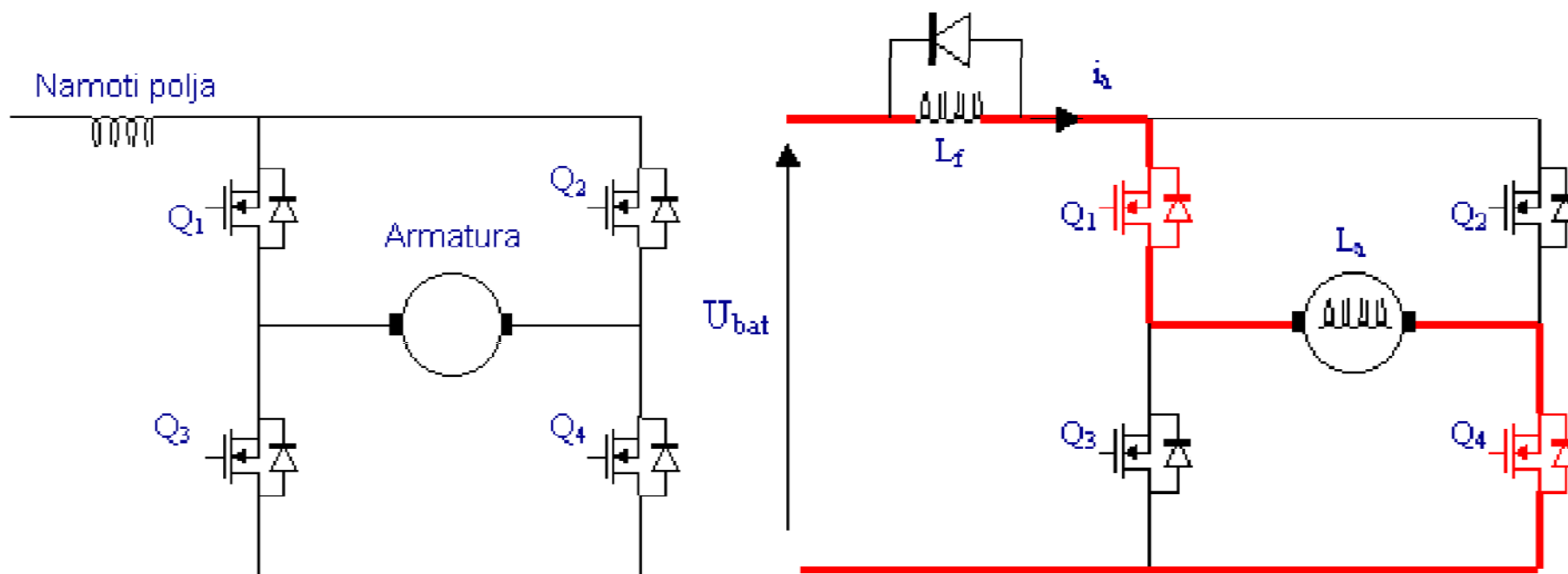
## Režim kočenja

U svakom intervalu otvoren samo jedan od dva tranzistora



## Krug sa punim H mosnim spojem

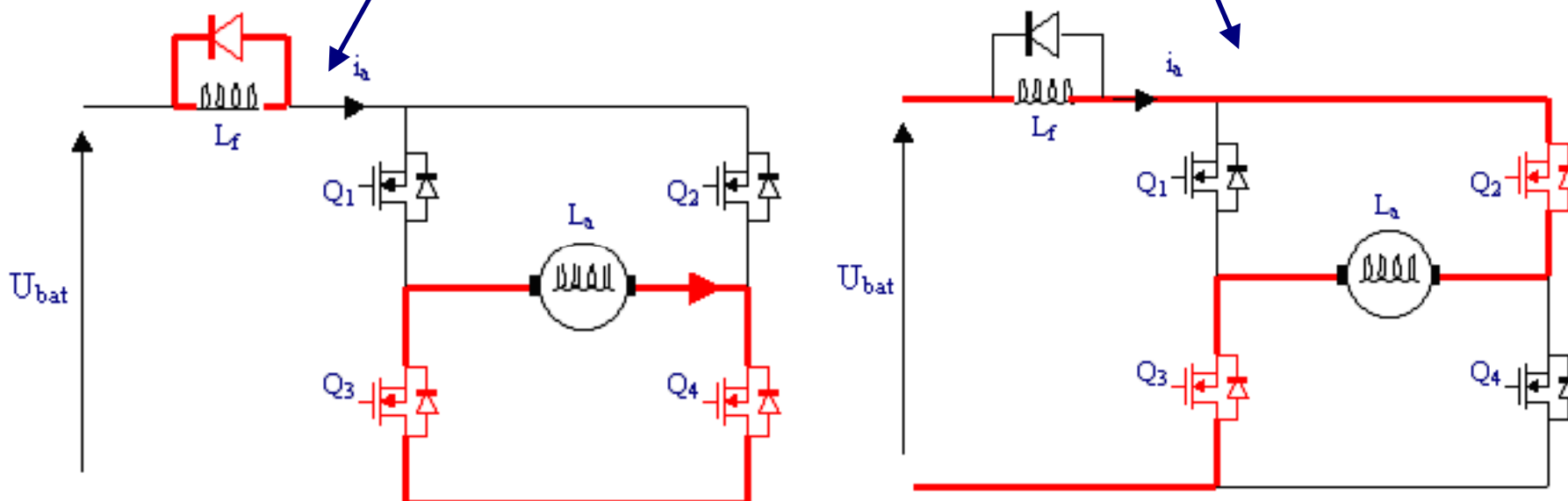
- Kada se želi pokrenuti motor tada je MOSFET  $Q_4$  otvoren i na  $Q_1$  se dovodi PWM signal.
- Tok struje je prikazan crvenom linijom.
- Dioda je postavljena u inverznom smjeru duž namota polja. Na ovaj način je omogućeno struji da teče kada su sva četiri MOSFET-a zatvorena.





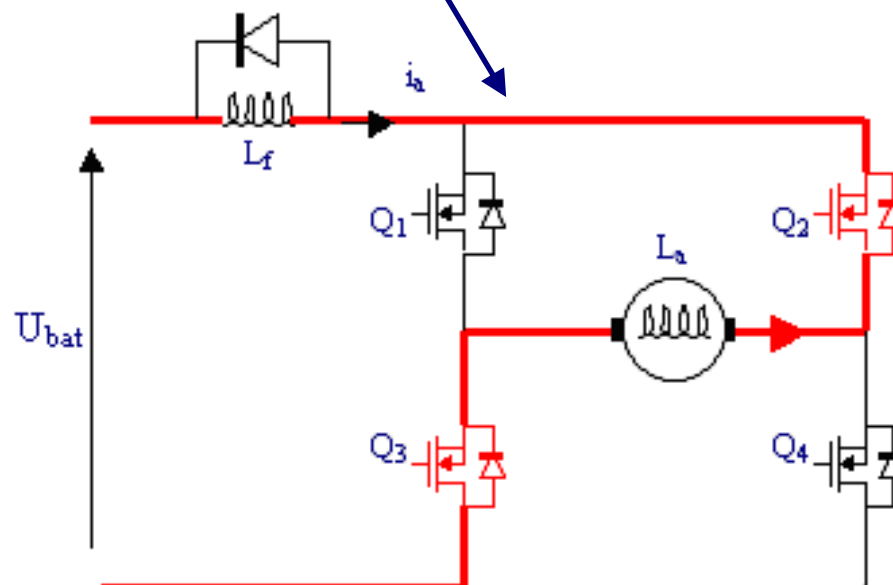
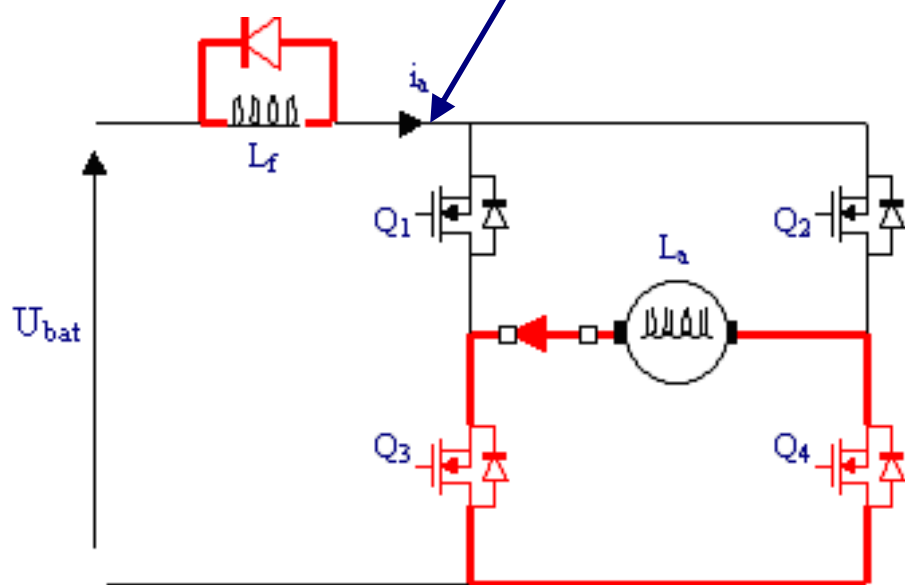
## Krug sa punim H mosnim spojem

- Ako se MOSFET  $Q_4$  drži otvorenim a isključi PWM signal, tada struja teče kroz donji dio kruga i diodu.
- Da bi se motor vrtio u suprotnom smjeru potrebno je MOSFET  $Q_3$  drži otvorenim i na MOSFET  $Q_2$  dovesti PWM signal.



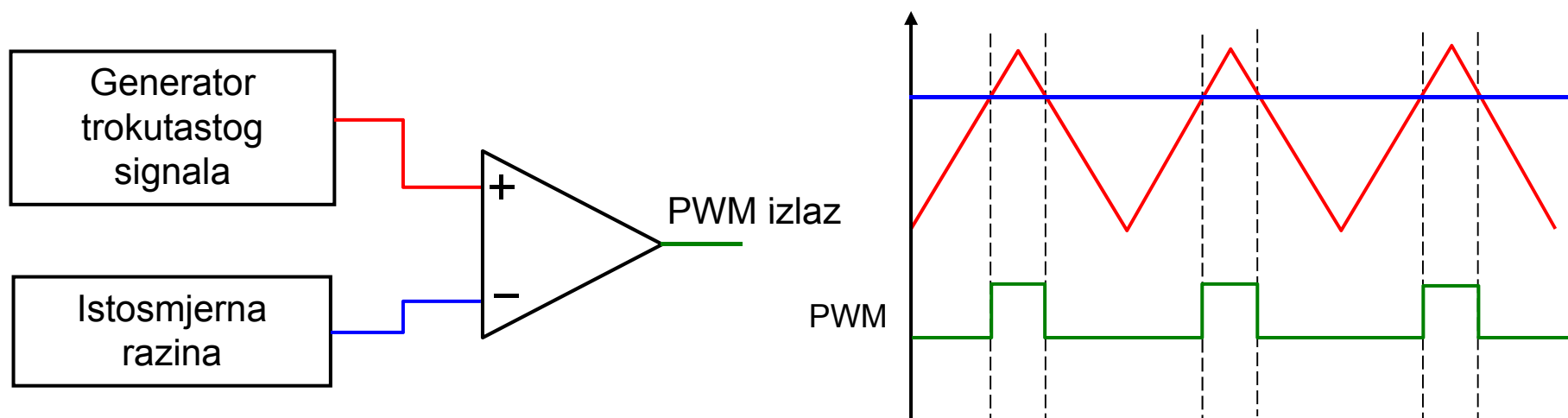
## Krug sa punim H mosnim spojem

- U slučaju da je MOSFET  $Q_3$  otvoren i da se isključi PWM signal, tada struja teče kao na slici.
- Za obnovu, kada se motor vrti unazad, naprimjer, motor (koji sada djeluje kao generator) tjera struju u desnom smjeru (crvena strelica) kroz armaturu, diodu MOSFET-a  $Q_2$ , bateriju i nazad kroz diodu MOSFET-a  $Q_3$ .



## Generiranje PWM signala

- Generiranje PWM signala može se ostvariti na različite načine, primjenom analogne elektronike, PWM čipom, digitalnom tehnikom, onboard mikrokontrolerom.
- **Upotreba analogne elektronike.** PWM signal se generira na temelju usporedbe trokutastog i DC signala.
- DC signal može biti u intervalu između minimalnog i maksimalnog napona trokutastog signala.

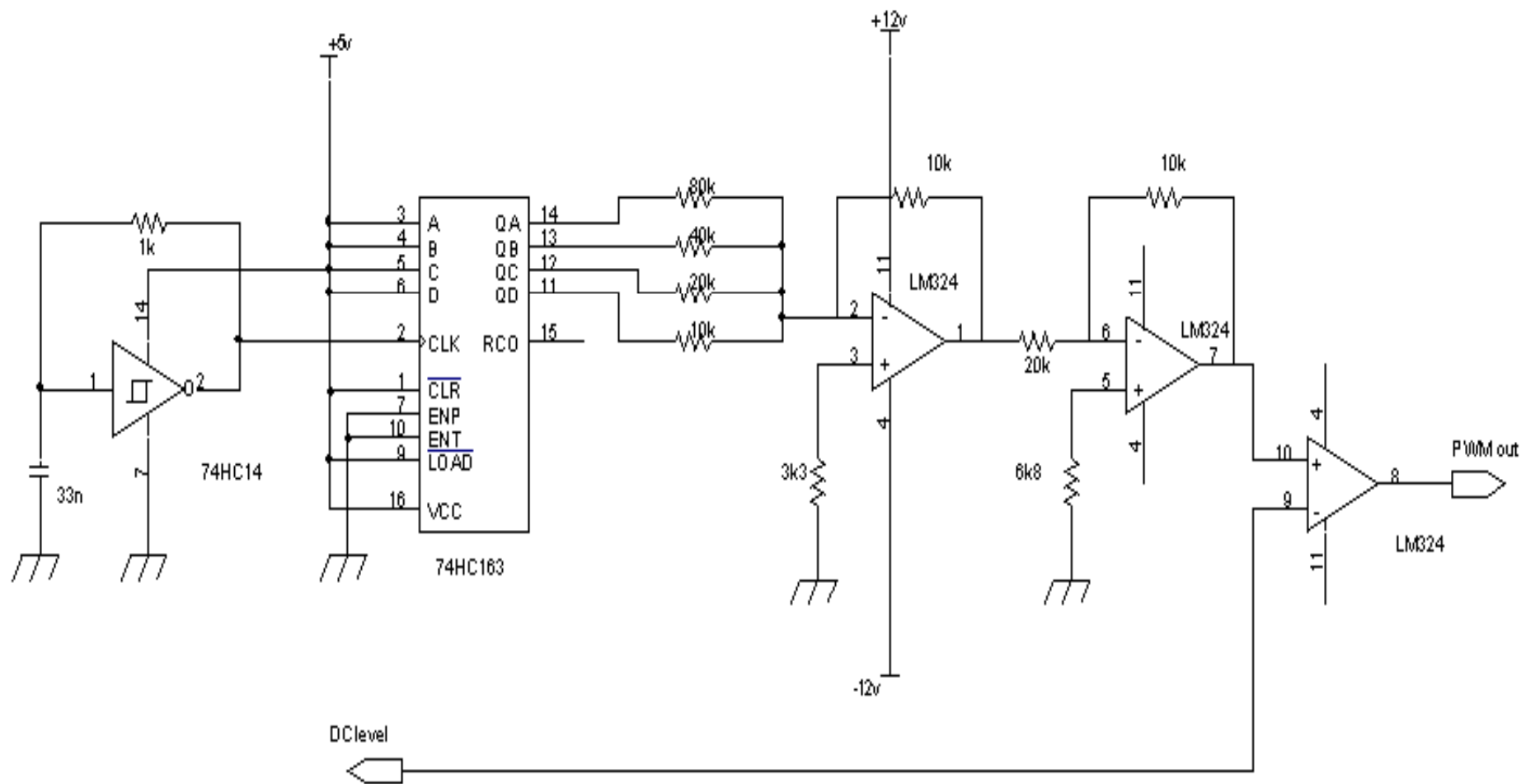


## Generiranje PWM signala

- Kada je napon trokutastog signala veći od razine DC signala, izlaz operacijskog pojačala je visoka razina, a kada je napon manji izlaz je niska razina.
- Sa dijagrama se vidi da ako je DC razina veća, tada su impulsi kraćeg trajanja.
- Primjer kruga za generiranje PWM signala pomoću elemenata analogne elektronike prikazan je na sljedećoj slici.
- On koristi brojač i težinski ljestvicu otpora za generiranje trokutastog signala.

## Generiranje PWM signala

- Elektronička realizacija sklopa za generiranje PWM signala



## Generiranje PWM signala

- Kod **digitalne metode** uspoređuju se vrijednost iz brojača i prethodno pohranjena vrijednost u registru.
- Digitalna verzija prethodno opisane analogne metode je prikazana na sljedećoj slici.
- Zahtijevana PWM razina upisuje se u registar pomoću mikrokontrolera.

