

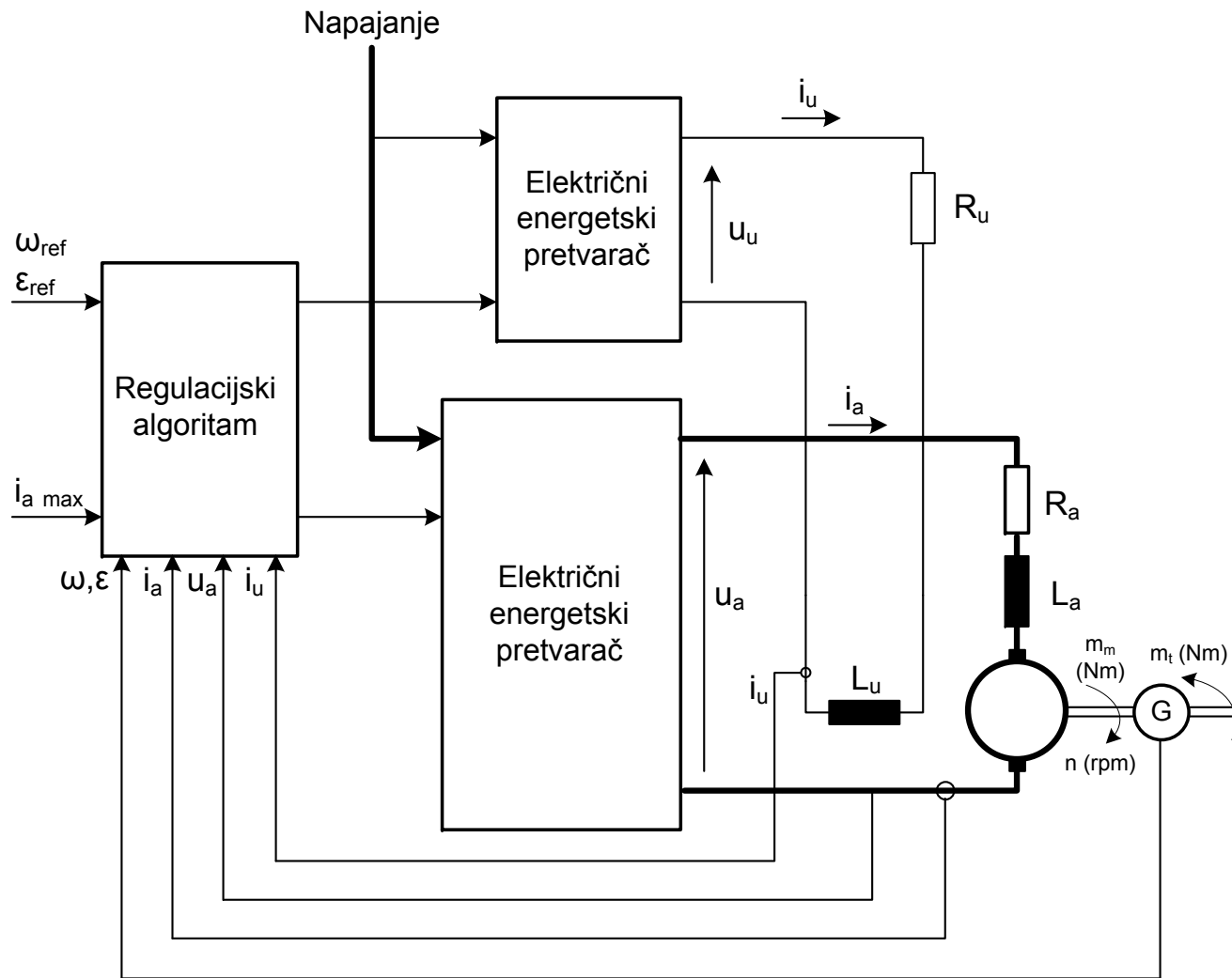
Regulacija istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom pomoću sklopova učinske elektronike

- Dosadašnja analiza pokazala je da se istosmjernom stroju **brzina može podešavati** na tri neovisna načina: **promjenom napona armature**, **promjenom uzbudnog polja** i **promjenom ukupnog otpora u armaturnom krugu**
- Pokazano je da je **upravljanje brzinom vrtnje promjenom ukupnog otpora u armaturnom krugu energetski neučinkovito** zbog disipacije snage na dodanim otpornicima a i činjenice da **oslobođena toplina ne smije dovesti do povišenja radne temperature emp-a**.
- To znači da se u slučajevima kada se toplina ne može iskoristiti, ona se mora odvesti iz okoline stroja.
- Upravljanje **promjenom napona armature i promjenom napona uzbude** stroja (a samim tim i uzbudnog polja) zahtijeva dobivanje promjenljivog istosmjernog napona
- Razvojem učinske elektronike, u zadnjih 30-tak godina afirmirala su se kvalitetna rješenja poluvodičkih učinskih pretvarača, koji istosmjerni stroj napajaju s **promjenljivim istosmjernim naponom iz istosmjerne i iz standardne izmjenične mreže**. To su **usmjerivači (AC/DC)** i **istosmjerni pretvarači, tzv. čoperi (DC/DC)**.

Regulacija istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom pomoću sklopova učinske elektronike

- U određenim primjenama potrebno je upravljati pozicijom stroja, a nekada je potrebno upravljati samo strujom stroja. Sve to mora biti ostvareno sa što manjim gubicima, što većom točnošću, pouzdanošću i uz što nižu cijenu.
- Dinamički zahtjevi uvjetuju korištenje sustava regulacije struje, brzine i pozicije (sustavi s povratnom vezom). Današnji industrijski sustavi realizirani u digitalnoj tehnici zasnovanoj na mikroprocesorima mogu zadovoljiti zahtjeve za brzim prikupljanjem i procesiranjem mjerenih podataka.
- Sada se u potpunosti mogu definirati komponente emp-a s istosmjernim strojem koji može osigurati regulaciju elektromehaničkih varijabli (struja, akceleracija, brzina, pozicija) u rasponu od 0 do minimalno nazivnih vrijednosti
- Pored istosmjernog stroja kao osnovne komponente kojeg smo upoznali u dosadašnjim predavanjima, minimalna konfiguracija emp-a bi trebala sadržavati učinski pretvarač, digitalni sustav na kojem se realiziraju upravljačko-regulacijske strukture i sustav za mjerenje i prikupljanje podataka o reguliranim varijablama emp-a

Regulacija istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom pomoću sklopova učinske elektronike



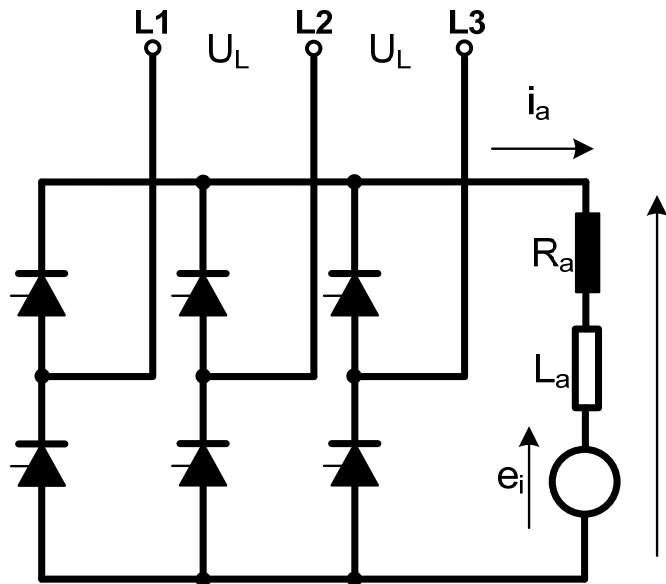
Sl.1 Načelna shema sustava regulacije istosmjernog nez. uzbuđenog stroja

Regulacija istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom pomoću sklopova učinske elektronike

- U sustavu postoje **dva učinska pretvarača** koji omogućavaju promjenu iznosa napona **napajanja uzbudnog i armaturnog kruga**. Na taj način moguće je **mijenjati struju uzbude i struju armature**.
- Sustav mjeri varijable koje se žele regulirati ali i one koje se žele nadzirati. To su struja armature, napon armature, brzina (pozicija) i struja uzbude.
- Mjerene veličine se uvode u sustav za regulaciju čime je ostvarena povratnu vezu u regulacijskoj strukturi. **Povratnom vezom znatno se mogu poboljšati dinamička svojstva** cijelog sustava.
- Upravljački sustav na osnovu **mjerenih veličina i zadanih referentnih veličina** (postavnih veličina) određuje izlazne veličine koje utječu na promjenu armaturnog i uzbudnog napona.
- **Pretvarači** koji se koriste u upravljanju istosmjernih strojeva, a koji koriste izmjenični (mrežni) **napon na ulazu se zovu usmjerivači**. Širi naziv je **mrežom vođeni (komutirani) usmjerivači** (pretvarači), engl. *Line Commutated Converters*.

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje istosmjernog stroja

- **Usmjerivač** je poseban tip ispravljača (općenitiji pojam) koji omogućava oba smjera energije; **s izmjenične na istosmjernu**, ali i **istosmjerne na izmjeničnu stranu**. Više o usmjerivačima može se pronaći u [5].
- Usmjerivač omogućava jedan smjer struje i dva polariteta napona na istosmjernoj strani. Kada energija prelazi s izmjenične na istosmjernu, usmjerivač radi kao ispravljač. Kada energija prelazi s istosmjerne na izmjeničnu, usmjerivač radi kao izmjenjivač.



Sl.2. Trofazni tiristorski usmjerivač u mosnom spoju

Izlazni napon se mijenja prema izrazu

$$U_a = 2,34 \cdot U_L \cos \alpha \quad (1)$$

$U_a \rightarrow$	srednja vrijednost ispravljenog napona
$U_L \rightarrow$	efektivna vrijednost izmjeničnog napona
$\alpha \rightarrow$	kut okidanja tiristora

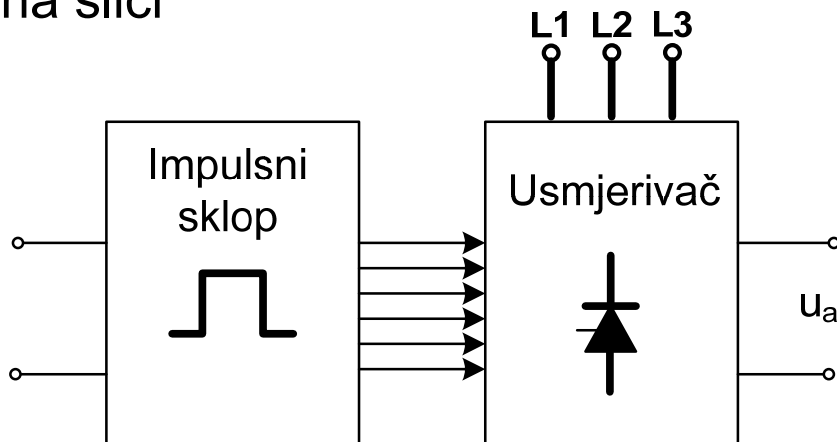
Regulacija istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom pomoću sklopova učinske elektronike

Koje zahtjeve mora ispuniti učinski pretvarač za istosmjerni elektromotorni pogon ?

- Mora omogućiti izlazni **napon oba polariteta i struju u oba smjera za IV-kvadrantni rad**, odnosno **napon oba polariteta za II-kvadrantni rad** (ako se želi samo motorski način rada u oba smjera)
- Za vrijeme kratkih ubrzavanja i usporavanja, **struja pretvarača se mora držati na najvišoj dozvoljenoj vrijednosti**. Struja armature u dinamičkim prijelaznim pojavama **može biti i nekoliko puta veća od struje u stacionarnom režimu rada**.
- Srednja vrijednost izlaznog napona treba linearno ovisiti o ulaznom upravljačkom naponu.
- Valovitost struje armature, odnosno faktor oblika, mora biti što manja
- **Izlaz iz pretvarača mora što brže slijediti signal na ulazu** kako bi se pretvarač mogao nadomjestiti elementom s konstantnim pojačanjem, bez mrtvog vremena

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje istosmjernog stroja

- Usmjerivački spojevi za istosmjerni emp su uglavnom **realizirani s tiristorskim poluvodičkim sklopama** koje karakterizira visoka strujna i naponska opteretivost.
- **Sastavni dio usmjerivača je upravljački sklop** (impulsni sklop, vidi sliku), koji osigurava sinkroniziran rad poluvodičkih tiristorskih sklopki s frekvencijom pojne mreže (mrežom vođeni usmjerivači).
- **Za potrebe regulacije usmjerivač je potrebno matematički opisati** prijenosnom funkcijom kako bi ga se moglo uključiti u strukturnu blokovsku shemu istosmjernog emp-a. Usmjerivač se može prikazati kao na slici



$$U_a = 2,34 \cdot U_L \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha$$

$U_{d0} \rightarrow$ Napon uz $\alpha=0$ (napon nereguliranog usmjerivača (diodnog ispravljača))

Sl.3. Blokovski prikaz usmjerivača

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- Na ulazu usmjerivača (okidnog sklopa) djeluje istosmjerni upravljački napon u_{ul} , kojim se određuje kut okidanja tiristora α . Na izlazu usmjerivača dobije se srednja vrijednost ispravljenog napona u_d , tj. napon armature istosmjernog stroja u_a
- Iz izraza (1) očita je nelinearnost izlazne veličine u_{ul} o kutu okidanja α . Ako se osigura da kut okidanja α ovisi o naponu u_{ul} s funkcijom \arccos , tada je moguće pisati da je prijenosna funkcija usmjerivača:

$$F(s) = \frac{u_a(s)}{u_{ul}(s)} = K_{Ty} e^{-s\tau} \quad (2)$$

K_{Ty}	\rightarrow	pojačanje usmjerivača
τ	\rightarrow	mrtvo vrijeme usmjerivača

- Prilikom promjene kuta upravljanja s promjenom napona u_{ul} dolazi do određenog kašnjenja (mrtvog vremena, τ) nakon kojeg se izlazna veličina u_d počinje mijenjati.
- Do ove pojave dolazi jer se tiristoru ne može promijeniti kut vođenja u bilo kojem trenutku. Nakon okidanja tiristora u trenutku t_1 , tiristor može promijeniti kut okidanja tek u narednoj sekvenci vođenja, u trenutku t_2 .

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- Prosječno mrtvo vrijeme usmjerivača se definira kao

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f} \quad (3)$$

$m \rightarrow$	broj (pulzacija) u jednoj periodi napona napajanja
$f \rightarrow$	frekvencija izmjeničnog napona napajanja

- Trofazni usmjerivač u mosnom spoju ima 6 pulzacija, a frekvencija izmjeničnog napona je najčešće 50 Hz. Prema izrazu (3), mrtvo vrijeme iznosi 1,67ms.
- Budući da se radi o prosječnom mrtvom vremenu, ovaj iznos se, zbog jednostavnijeg računa, najčešće zaokružuje na iznos od 2 ms.
- Prijenosna funkcija usmjerivača se u praksi najčešće aproksimira prema izrazu

$$F(s) = \frac{u_a(s)}{u_{ul}(s)} = K_{Ty} \frac{1}{1 + s\tau} \quad (4)$$

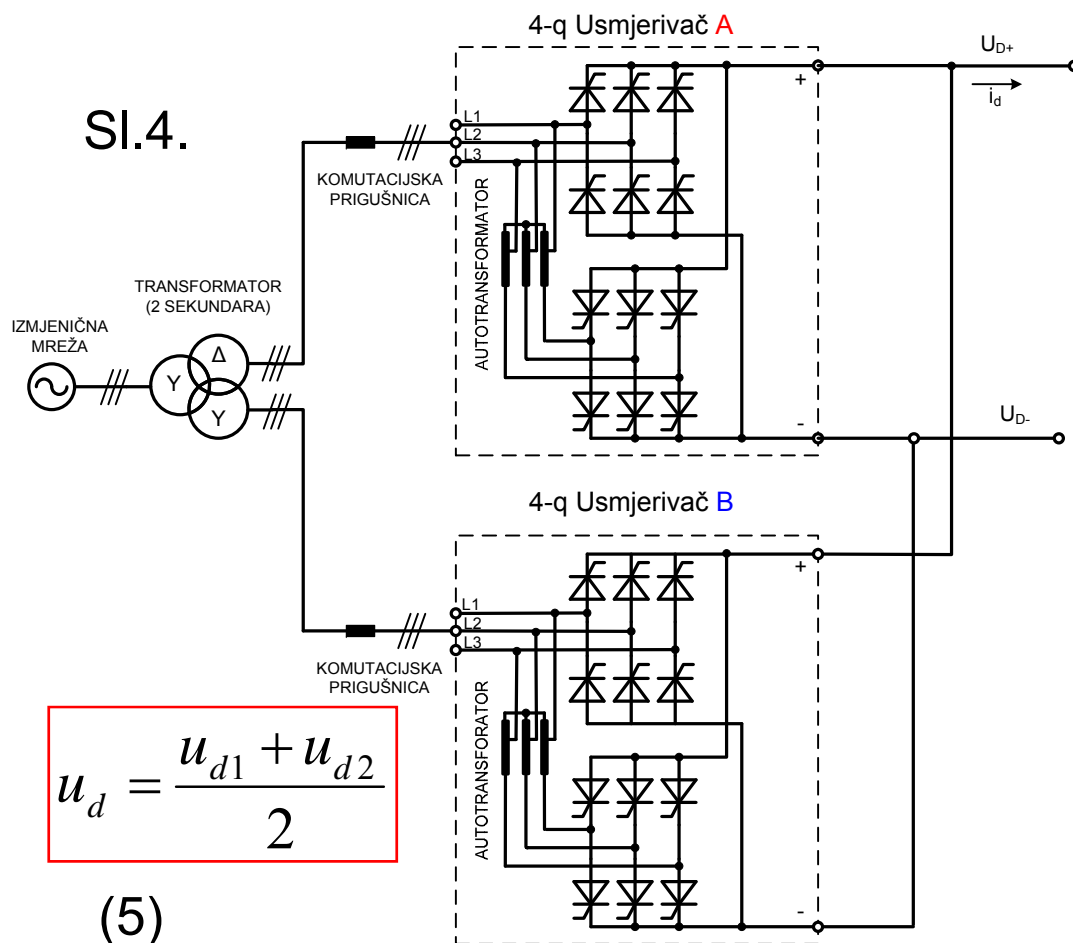
Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- Ovakva aproksimacija je dovoljno dobra s obzirom da vremenska konstanta iznosa **2 ms** za elektromotorni pogon **ne predstavlja značajnu vremensku konstantu** (u odnosu na ostale vremenske konstante)
- U prijenosnoj funkciji $F(s)=\omega(s)/u_a(s)$, $F(s)=i_a(s)/u_a(s)$, ta vremenska konstanta bi u kompleksnoj ravnini definirala tzv. “**brzi pol**” koji ne bi značajnije utjecao na dinamiku emp-a
- Usmjerivači mogu biti napajani iz jednofaznih ili trofaznih izvora.
- Usmjerivač **omogućuje izlazni napon jednog ili oba polariteta, te struju jednog smjera**. Tzv. **antiparalelnim spajanjem dvaju usmjerivača moguće je osigurati oba smjera struje**, odnosno rad pogona u sva četiri kvadranta.
- Važna značajka usmjerivača je i osnovna frekvencija valovitosti napona na izlazu. **Valovitost izlaznog napona utjecati će i na valovitost struje**, a to za posljedicu može imati i **valovitost momenta** što je nepoželjna pojava pogotovo kod sustava pozicioniranja. (**PITANJE: Zašto baš kod emp-a za pozicioniranja?**)

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- U tehnološki zahtjevnim operacijama gdje se zahtijeva iznimno mala valovitost struje (momenta), nije dovoljan samo 6-pulsni pretvarač. Primjeri su 12-pulsni i 24-pulsni usmjerivači koji se na trofaznu mrežu priključuju preko posebnih (višenamotnih) transformatora (1 primar-2 sekundara)

Sl.4.



$$u_d = \frac{u_{d1} + u_{d2}}{2}$$

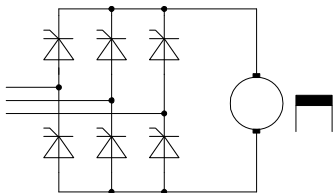
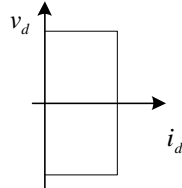
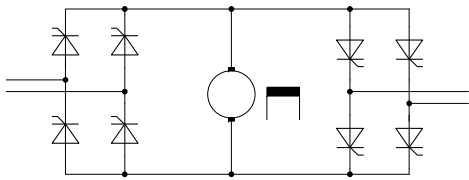
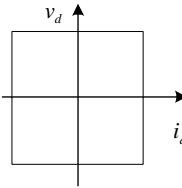
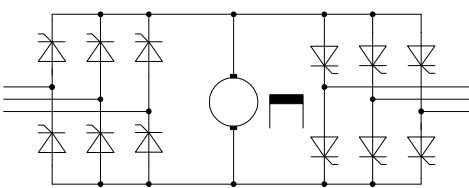
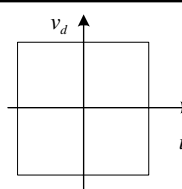
(5)

Primjer 12-pulsnog usmjerivača snage 1MVA za napajanje istosmjernog međukruga grupe izmjenjivača na tehnološkoj liniji proizvodnje i namatanja žice $\phi 5$, brzina linije 100m/s !

Radi se o sustavu s vraćanjem energije iz istosmjernog međukruga u izmjeničnu mrežu.

Komutacijske prigušnice ograničavaju kružnu struju između pretvarača A i B

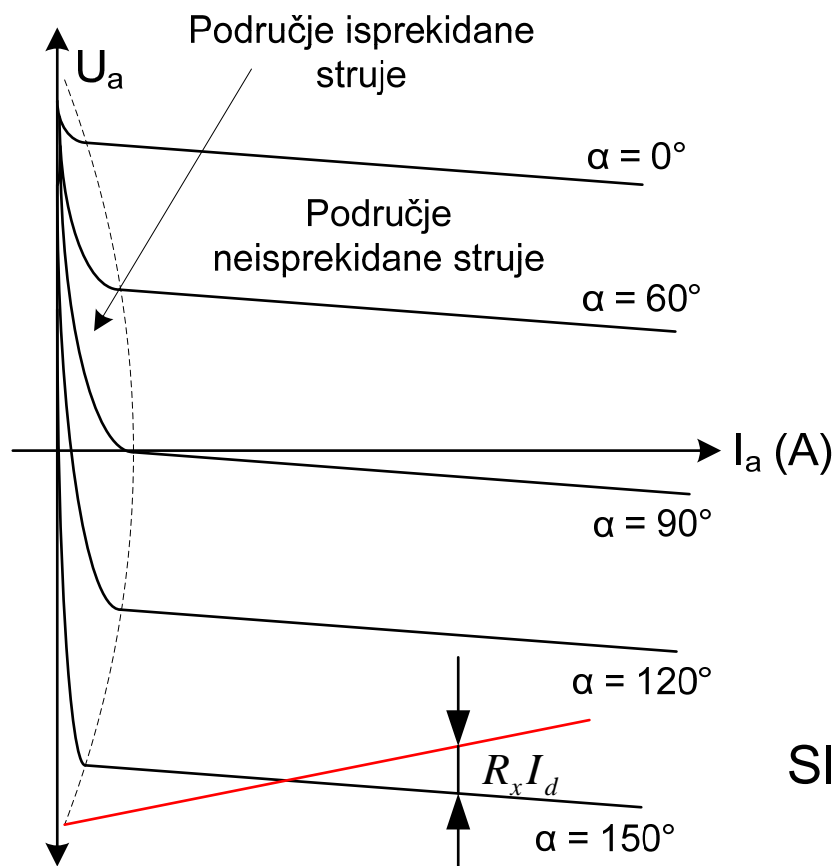
Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

Topologija	Vrsta sklopa	Raspon snage	Valovitost	Područje rada
	Trofazni punoupravljivi usmjerivač	Do 150 kW	$6f_s$	 2-kvadrantni
	Jednofazni antiparalelni usmjerivač	Do 15 kW	$2f_s$	 4-kvadrantni
	Trofazni antiparalelni usmjerivač	Do 1.5 MW	$6f_s$	 4-kvadrantni

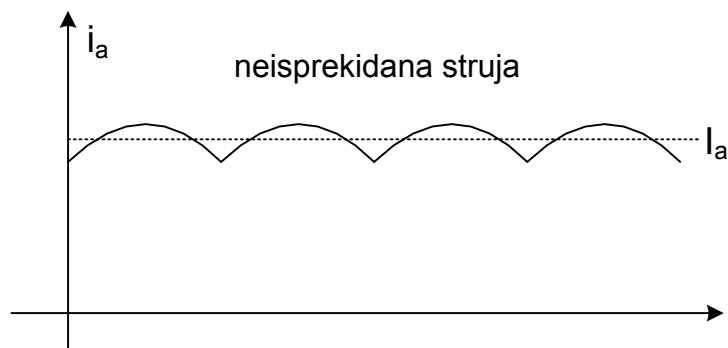
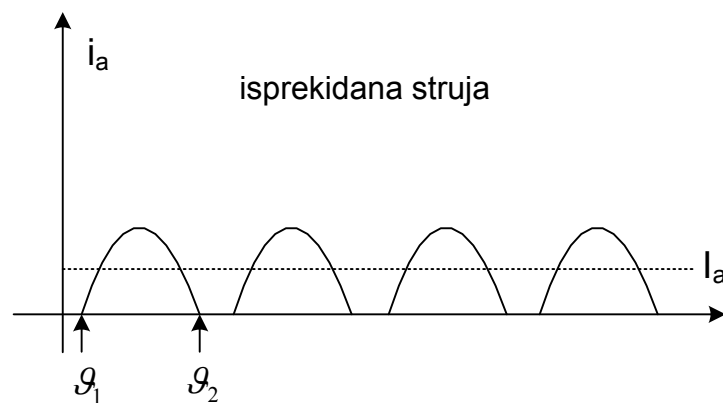
S.5. Najčešće korištene topologije usmjerivačkih spojeva u upravljanju s istosmjernim emp-om

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- Kako bi se istakla jedna **specifičnost kod upravljanja istosmjernim strojevima upotrebom usmjerivača**, potrebno je razmotriti vanjsku karakteristiku usmjerivača
- Na slici je prikazana **vanjska karakteristika usmjerivača**, $U_d=f(I_d)$, tj. $U_a=f(I_a)$, uz parametar kut okidanja α .



Sl.6.



Sl.7.

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- U području **izmjenjivačkog načina rada karakteristika opterećenja je ograničena s pravcem** koji se može opisati na sljedeći način

$$U_a = -U_{a0} \cos \gamma + R_k \cdot I_a \quad (6)$$

- Pri tome kut γ **objedinjuje vrijeme odmaranja tiristorske sklopke i vrijeme komutacije**. Ograničenje je također određeno **opterećenjem** kao što pokazuje gornji izraz.
- Na slikama 6. i 7. se vide dva karakteristična područja vanjske karakteristike usmjerivača
 - područje **isprekidane** (diskontinuirane) struje
 - područje **neisprekidane** (diskontinuiranje) struje
- U području **isprekidanog vođenja** (struja pada na nulu) dolazi do znatne promjene nagiba karakteristike.
- U području **neisprekidanog vođenja pojačanje, tj. nagib krivulja di_a/du_a , je i do 10 puta veći** od nagiba u području isprekidane struje
-

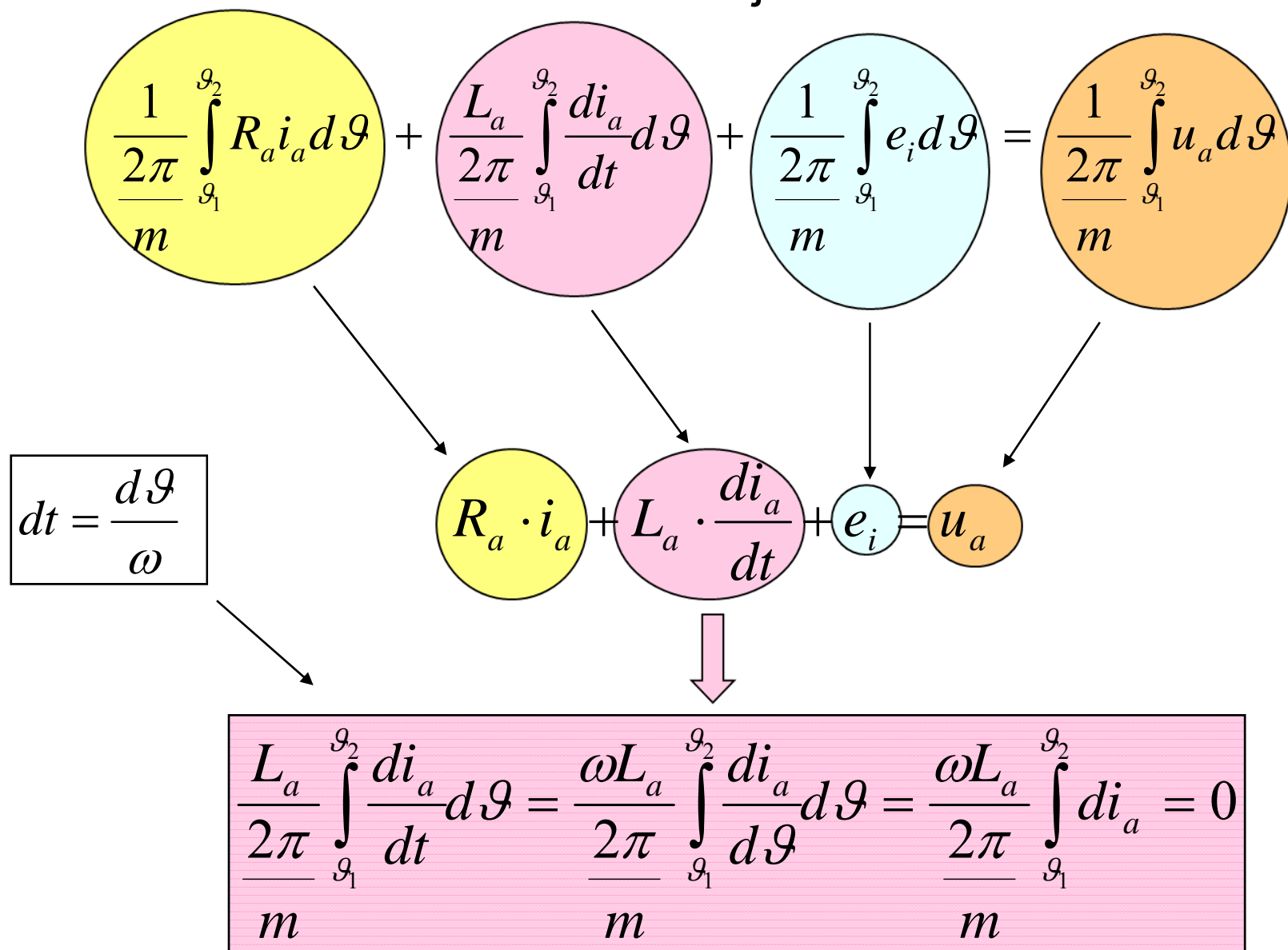
Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- Usmjerivač radi u **isprekidanom području** pri **malim opterećenjima**. Takav rad usmjerivača rezultira i **drugačijim matematičkim opisom istosmjernog stroja koji je opterećenjem isprekidanom strujom**
- Uzevši u obzir da je matematički opis istosmjernog stroja koji radi u području **neisprekidane struje standardan** (uzima se da je struja glatka i iznosa i_d), onda će **regulirani emp s istosmjernim strojem napajanim iz usmjerivača zahtijevati adaptivni regulator** (ovisno o području rada).
- Razlog je u tome što se **osim pojačanja**, koje je bitno različito u ova dva slučaja, **mijenja se i struktura (prijenosna funkcija)** kojom se opisuje istosmjerni stroj.
- Polazeći od slike koja prikazuje **isprekidanu struju $i_a=f(\nu)$** , jednačba

$$\boxed{R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e_i = u_a} \quad (7)$$

za m pulsni usmjerivač se može opisati kao

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem



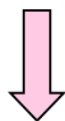
Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

Sada se mogu izračunati i preostale komponente i one iznose

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} R_a i_a d\vartheta + \frac{L_a}{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{di_a}{dt} d\vartheta + \frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} e_i d\vartheta = \frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} u_a d\vartheta$$



$$\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} i_a R_a d\vartheta = I_a R_a$$



$$= 0$$



$$\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} e_i d\vartheta = E_i$$



$$\frac{1}{2} U_{a0} (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2)$$

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

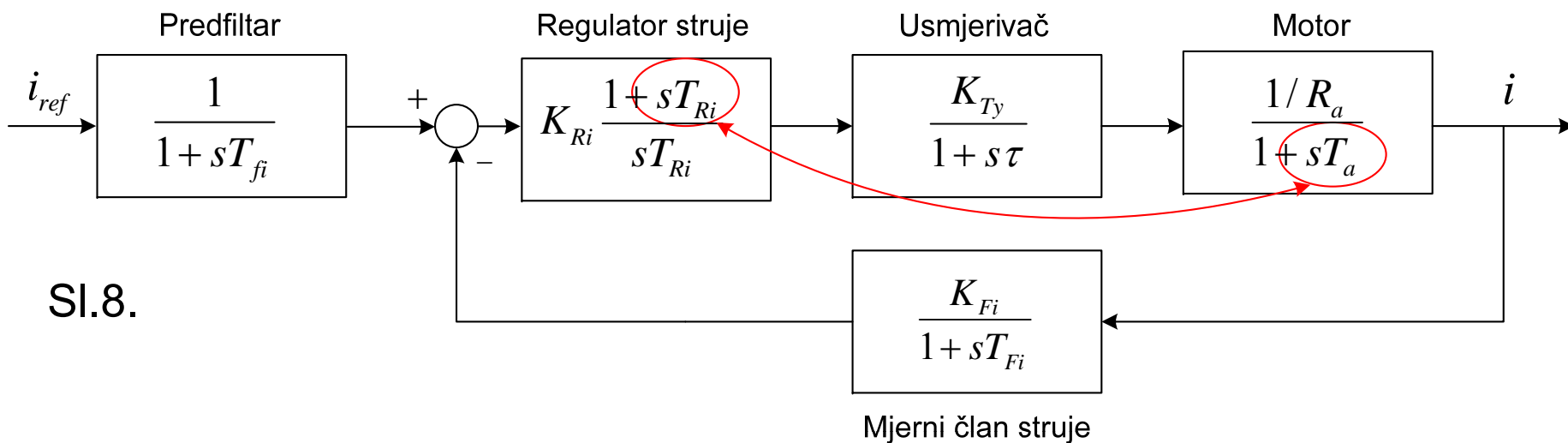
- Konačan opis ponašanja istosmjernog stroja napajanog iz usmjerivača u području isprekidane struje je:

$$I_a R_a + \frac{1}{\frac{2\pi}{m}} E_i = \frac{1}{2} U_{a0} (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2) \quad (8)$$

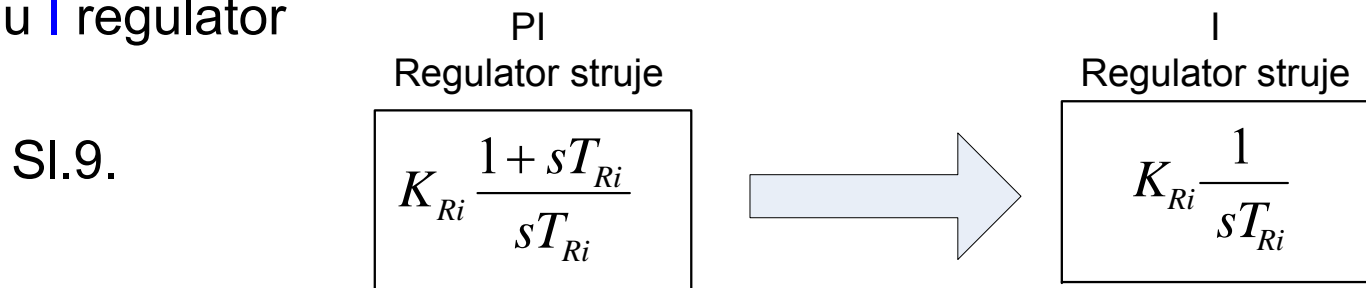
- Izraz (8) ne sadrži induktivitet L_a , što znači da u području isprekidane struje struja prati promjene napona armature bez vremenske konstante T_a ($T_a=0$).
- Sustav regulacije struje armature potrebno je adekvatno prilagoditi ovakvoj prijenosnoj funkciji stroja
- Ako se krug regulacije struje armature optimira po pravilu tehničkog optimuma, regulator struje pri isprekidanom vođenju treba biti “I” tipa (integralni regulator) jer nema armaturene vremenske konstante koju treba poništiti.
- Pri neisprekidanom vođenju regulator treba biti PI tipa (proporcionalno integralni) jer se takvim regulatorom poništava armaturna vremenska konstanta T_a .

Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- Primjer: **krug regulacije struje podešen po tehničkom optimumu**, regulator struje je **PI** tipa, T_{Ri} konstanta regulatora poništava T_a (dominantnu armaturnu vremensku konstantu motora), **vrijedi za neisprekidanu struju !**



- Za rad **u području isprekidane struje**, $T_a=0$ pa brojnik u prijenosnoj funkciji regulatora struje postaje jednak 1, što znači da **PI** regulator struje prelazi u **I** regulator



Osnovni usmjerivački sklopovi za upravljanje s istosmjernim strojem

- U području kontinuiranog vođenja (**neisprekidana struja**, struja niti u jednom trenutku ne pada na nulu), karakteristika ima blagi i konstantan nagib
- Ovaj nagib je **posljedica padova napona zbog komutacije struje u usmjerivaču te padova napona na poluvodičkim sklopkama, usmjerivačkom transformatoru i spojnim vodovima.**
- Uzevši u obzir sve to, precizniji izraz za srednju vrijednost napona kojim usmjerivač napaja armaturu stroja je

$$U_a = U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_s - (R_T + R_v + R_k) I_d \quad (9)$$

gdje su:

$\Delta U_s \rightarrow$ pad napona na poluvodičkim sklopkama

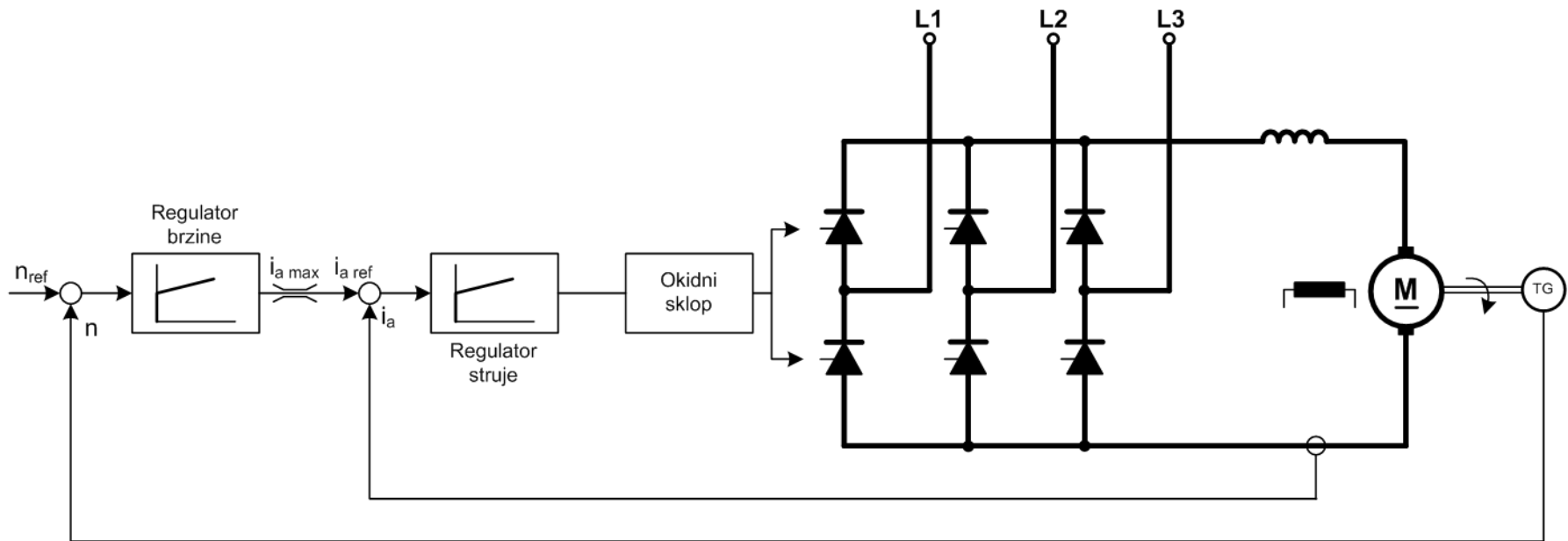
$R_T \rightarrow$ otpor namota transformatora

$R_k \rightarrow$ nadomjesni otpor komutacijskog kruga

$R_v \rightarrow$ otpor spojnih vodova

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Na slici je prikazana shema sustava regulacije brzine vrtnje istosmjernog stroja s promjenljivim naponom armature. Uzbuda stroja se održava konstantnom. Sustav se sastoji od dva regulacijska kruga
 - unutarnji krug regulacije struje armature
 - vanjski krug regulacije brzine vrtnje

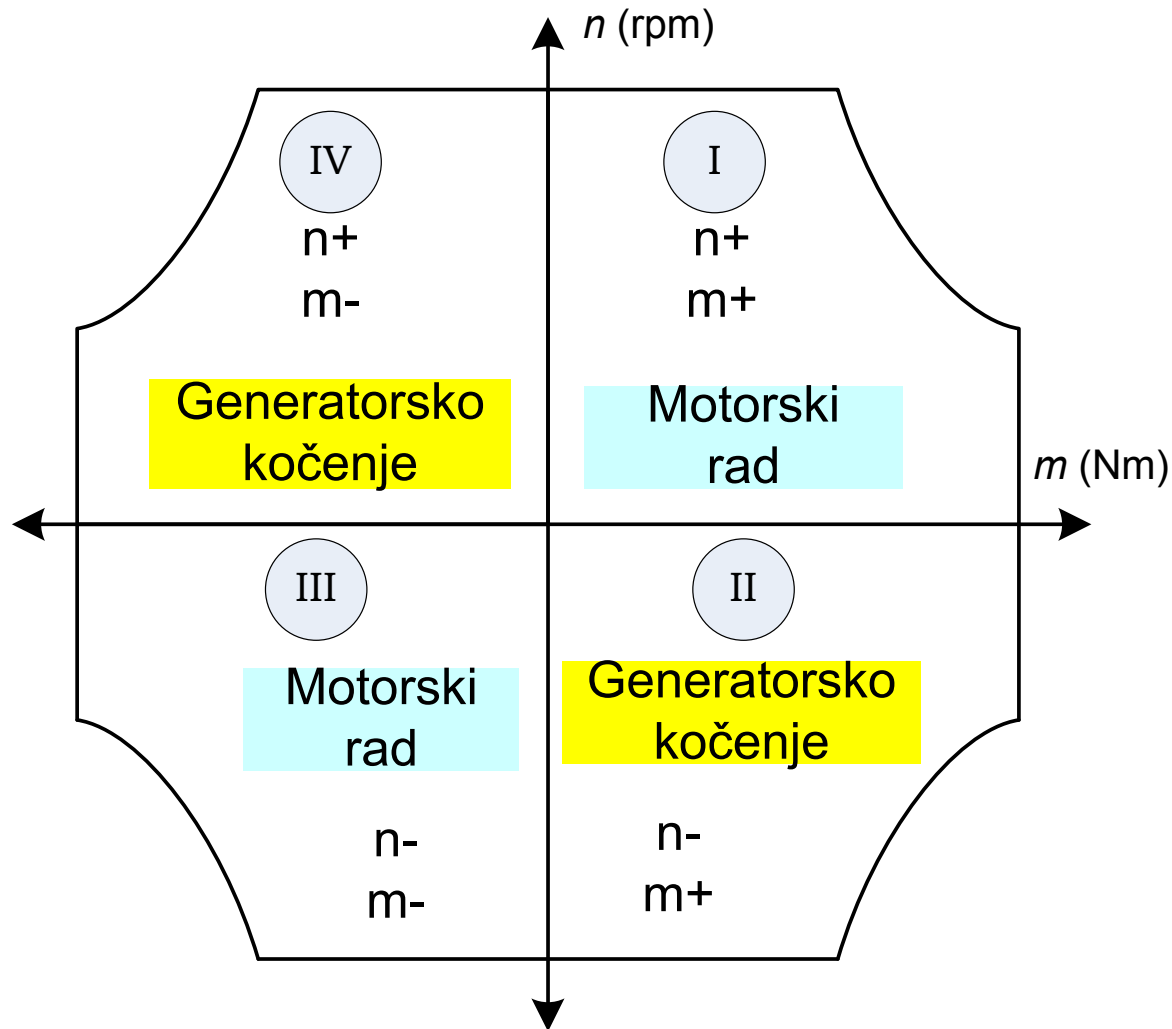


Sl.10. Sustav regulacije brzine vrtnje istosmjernog nezavisno uzbuđenog stroja za dvokvadrantni rad

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Unutrašnju povratnu vezu čine **mjerni član struje armature, regulator struje** te **impulsni uređaj**. Vanjsku povratnu vezu čine mjerni član brzine vrtnje te regulator brzine vrtnje.
- **Regulator struje armature** pomoću **impulsnog uređaja povećava ili smanjuje struju** kako bi brzina vrtnje dostigla zadani iznos
- Regulatori u ovakvim sustavima obično imaju **proporcionalno i integralno djelovanje (PI)**.
- Struju armature je **potrebno ograničiti na neki maksimalan iznos** (tipično **dvostruka nazivna struja stroja**) jer bi u protivnom postojala opasnost da struja u određenim uvjetima (brza dinamika) postane toliko velika da može dovesti **do kolektorske vatre** ili **problema u komutaciji**.
- Sustav na slici omogućava **dvokvadrantni način rada u I. i II. kvadrantu** (jedan smjer momenta i dva smjera brzine vrtnje, sl.11.). Pogon može raditi u motorskom načinu rada za jedan smjer vrtnje (npr. dizanje tereta), te u generatorskom kočenju za drugi smjer vrtnje (spuštanje tereta, izmjenjivački način rada. **U koliko kvadranta radi pogon na slici ako nema potencijalnog momenta tereta?**

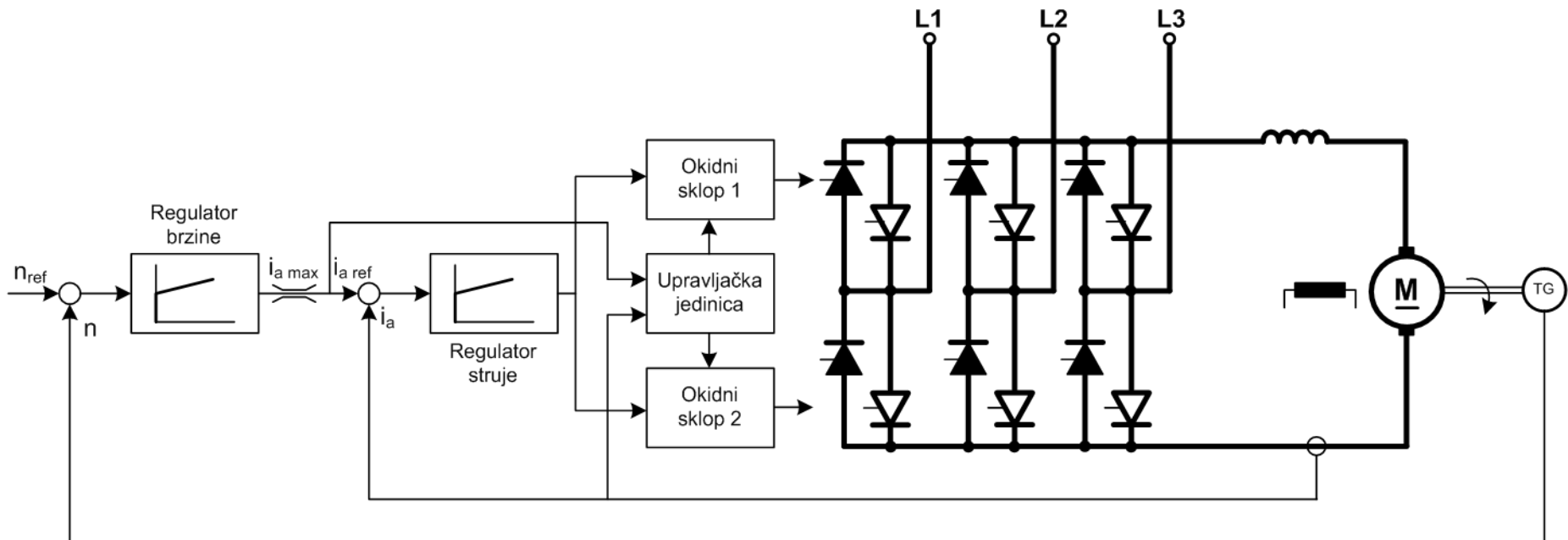
Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.



Sl.11. Pogonska stanja istosmjernog elektromotornog pogona

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Sustav prikazan na slici omogućava rad pogona u sva četiri kvadranta. Ovaj sustav ima **dva antiparalelno spojena tiristorska mosta**, što omogućava promjenu smjera struje i promjenu polariteta napona
- Sustav zahtijeva upravljačku jedinicu za svaki most. Postoji logika za upravljanje mostovima, koja osigurava **vremensku pauzu kod izmjene mostova!**



Sl.12. Sustav regulacije brzine vrtnje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora za četverokvadrantni rad

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Da bi se izbjegao neizbježni kratki spoj na priključnoj (mrežnoj) strani mora se osigurati da **SAMO JEDAN usmjerivač mora biti aktivan u svakom trenutku**. Prednost je da u tom slučaju što samo jedan tiristor u paru stvara gubitke što znači da se kompletan tiristorski PAR može staviti na jedan hladnjak (naravno, mora postojati **električna izolacija između njih!!!**).
- Izlazna vrijednost **regulatora brzine** određuje zahtjev za momentom (strujom) koji se proslijeđuje **regulatoru struje** (npr, kočenje, $i_r < 0$). U tom slučaju regulator struje smanjuje armaturni napon što u jednom trenutku dovodi do $i_a = 0$.
- U tom trenutku **upravljačka logika** odlučuje koji most treba biti aktivan:
 $i_{ar} > 0$ i $i_a = 0 \rightarrow$ Most “A” uključen (“gornji” most)
 $i_{ar} < 0$ i $i_a = 0 \rightarrow$ Most “B” uključen (“donji” most)
- Iz **sigurnosnih razloga** prelazak vođenja s jednog na drugi most se izvodi uz **vremensku pauzu** (tzv “bezstrujna” pauza), **2-5ms**, maksimalno **10ms!**

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Aktiviranje jednog od tiristora u **mostu B** prije nego svi tiristori u **mostu A** **ne budu sigurno blokirani**, **rezultira strujom kratkog spoja na mrežnoj strani** i ta struja se ne može kontrolirati regulatorom struje.
- Sprečavanje ove struje kratkog spoja **u nadležnosti su osigurača u mrežnim dovodima** usmjerivača.
- Rezolucija mjerenja struje $i_a=0$ je od **velike** važnosti za pravilan rad usmjerivača. Naime, ako se okidni impulsi prema usmjerivaču koji vodi struju ukinu samo malo prije nego što je postignuto $i_a=0$ (slijed: vrem. pauza → priprema za vođenje drugog mosta), tiristor koji bi još uvijek trebao voditi **neće iskomutirati struju što rezultira opet strujom kratkog spoja**, ali sada izazvanom komutacijskim problemom.
- Upravo zbog navedenog problema, često se koriste **2 senzora struje za pogone većih snaga**. Jedan senzor služi za **sustav regulacije struje armature kao signal povratne veze** i takav senzor struje je linearan u čitavom radnom području

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Drugi senzor struje služi za **mjerenje struje pri malim vrijednostima struje armature**, tj. **za detekciju struje $i_a=0$** . Taj signal opslužuje upravljačku logiku sa zadatkom **pravilnog aktiviranja mostova u usmjerivaču**.
- Kao što se vidi, velika se važnost pridaje kvalitetnom senzoru. Upravo je problem detekcije struje **$i_a=0$** , ovog relativno jednostavnog reverzibilnog 4q usmjerivača, bio **razlog kašnjenju uvođenja u opću upotrebu**.
- 4q pretvarači **pokrivaju široko područje od nekoliko kW do 10MW**. Za veće snage predviđeno je **zračno i vodeno hlađenje rashladnih tijela tiristorskih sklopki (modula)**.
- Postoje različite modifikacije osnovne sheme 4q usmjerivača. Jedna od modifikacija je ta da se **koristi samo jedan okidni sklop za usmjerivače u pretvaraču**. **Kako je to moguće?**
- Sa stanovišta potpunog pogona, **4q sustav upravljanja je proširen na područje konstantne snage** (upravljanje poljem), a to znači da se u **uzbudnom krugu** mora osigurati mijenjanje **uzbudnog napona** (a s tim i struje, polja).

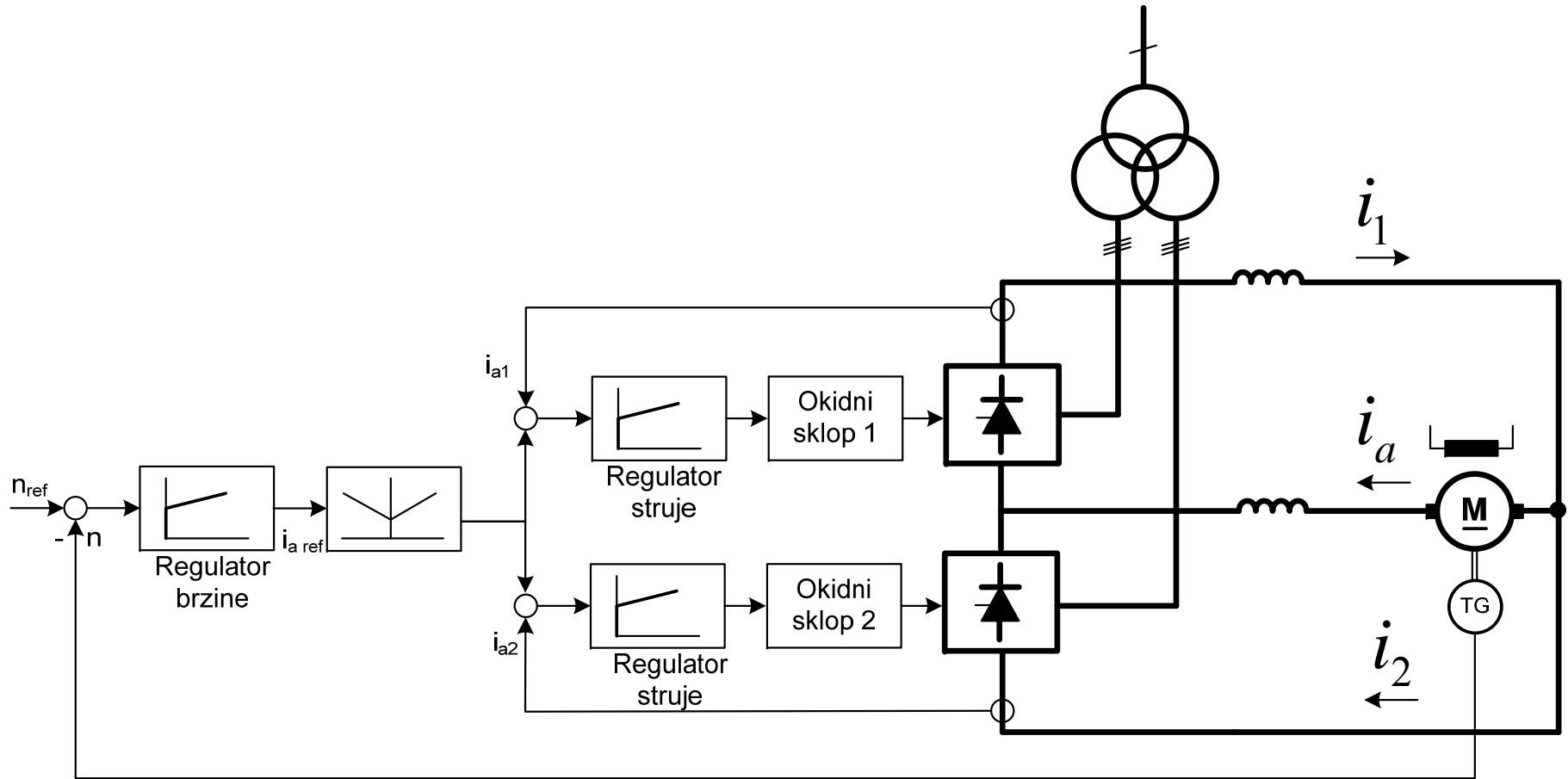
Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- To se može postići postiže s poluupravljivim tiristorskim usmjerivačem. Postoje i inačice s komutacijskom diodom (nul-dioda). To su jeftinije inačice koje osiguravaju ono što se zahtijeva u uzbuđi, a to je promjena toka (uzbudne struje) od nazivnog prema minimalnom (kritičnom) toku (uzbudnoj struji)
- Ovakvi sustavi zahtijevaju sofisticirane upravljačke strukture i danas su realizirani u isključivo digitalnoj tehnici zasnovanoj na mikroprocesorskim sustavima
- U prethodnim razmatranjima je napomenuto da, primjerice, sustav u području isprekidane i neisprekidane struje mora zadržati približno iste karakteristike bez obzira što se mijenja ukupno pojačanje u krugu upravljanja.
- Dakle, adaptivni regulator je nužan, struktura regulatora se mijenja (PI→I), a želja nam je da se sklopovska složenost ne povećava. Kako se to postiže?

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Dodatna zahtjevnost zadatak je sigurnosno (tzv. “mrtvo” vrijeme) u 4q pretvaraču koje u nekim zahtjevnim industrijskim primjenama mora biti jako malo (područje “nulte” struje). Primjer su valjaonički pogoni gdje taj iznos ne smije preći 5ms!
- U takvim primjenama se postavljaju i strožiji zahtjevi na digitalni sustav upravljanja (brzina procesora). Također, za tako zahtjevne primjene jasno se definira kontinuiran prelazak struje vođenja s jednog usmjerivača na drugi (prediktivno upravljanje, eliminacija skokovitih prijelaza $\rightarrow \mu P$)
- Budući da ovakvi sustavi upravljanja u pravilu trebaju osigurati regulaciju brzine vrtnje iznad nazivne brzine, mora se regulirati i uzbudna struja. U tom slučaju se u krugu regulacije brzine vrtnje mijenja ukupno pojačanje (zbog promjene pojačanja u uzbudnom dijelu kruga). Zadatak sustava upravljanja je da osigura kompenzaciju promjenljivog pojačanja, adaptivno upravljanje $\rightarrow \mu P$.
- Za te primjene koristit će se drugi tip 4q pretvarača, tzv. pretvarač s kružnim strujama

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.



Sl. 13. Sustav regulacije brzine vrtnje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora s **dvosmjernim tiristorskim usmjerivačem s kružnom strujom** u krugu armature

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Ovaj sustav osim kruga regulacije brzine i kruga regulacije struje armature sadrži krugove regulacije struja tiristorskih usmjerivača.
- Ovisno o režimu rada stroja, jedan od usmjerivača radi u ispravljačkom, a drugi u izmjenjivačkom režimu rada.
- Dvosmjerni tiristorski usmjerivač s kružnom strujom (sl. 13.) ne zahtijeva upravljačku jedinicu. (Zbog čega?)
- Oba dvo-kvadrantna usmjerivača rade istovremeno, što povlači za sobom dva razdvojena sekundarna namota (za trofazno napajanje)
- Iako je na prvi pogled za uvjet istovremenog rada oba usmjerivača dovoljna jednakost srednjih vrijednosti napona na usmjerivačima, ostaje problem različitih trenutnih vrijednosti napona na usmjerivaču.
- Zbog toga se koriste prigušnice u armaturnom krugu koje ograničavaju tzv. kružnu struju između dvaju usmjerivača, koja je upravo posljedica različitih trenutnih vrijednosti struja.

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Kao što se vidi iz sl.13, struja armature može biti različitog smjera (naravno, i iznosa)

$$i_a = i_1 - i_2 < 0; \quad i_a = i_1 - i_2 > 0$$

- Manja od struja i_1 i i_2 predstavlja tzv. **kružnu struju**, koja je **posljedica različitih trenutnih vrijednosti napona koja daju usmjerivači**. Ta struja “premošćuje” armaturu motora, tj. ona se zatvara izravno preko usmjerivača
- Usmjerivači se upravljaju simetrično, što znači da je **kut upravljanja usmjerivača u ispravljačkom načinu rada α jednak kutu upravljanja usmjerivača u izmjenjivačkom načinu rada β** , odnosno

$$\alpha = 180^\circ - \beta \quad (10)$$

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Kružna struja se mora održavati na što manjoj vrijednosti da bi se smanjili gubici radne a posebno jalove snage (zbog prigušnica za ograničenje kružne struje).
- Preporučljiva maksimalna vrijednost kružne struje iznosi 10% nazivne struje
- Kružna struja mora bit što više glatka, da bi se izbjegla moguća kašnjenja u sustavu regulacije struje (zbog “pauza” u području isprekidane struje)
- Ovisno o području rada, za npr. $m_m > 0$, jedan od usmjerivača vodi struju armature i kružnu struju, dok drugi vodi samo kružnu struju. U kvadrantu gdje je $m_m < 0$, usmjerivači zamjenjuju uloge
- Treba voditi računa da se prigušnice moraju projektirati na (minimalno) nazivnu vrijednost struje armature
- Ako su ispunjeni uvjeti jednakosti srednje vrijednosti napona usmjerivača i malog iznosa kružne struje koja je prigušnicama dovoljno “filtrirana”, preuzimanje struje armature svakog pretvarača će biti brzo i bez skokovitog prijelaza (engl. *bumpless*)

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

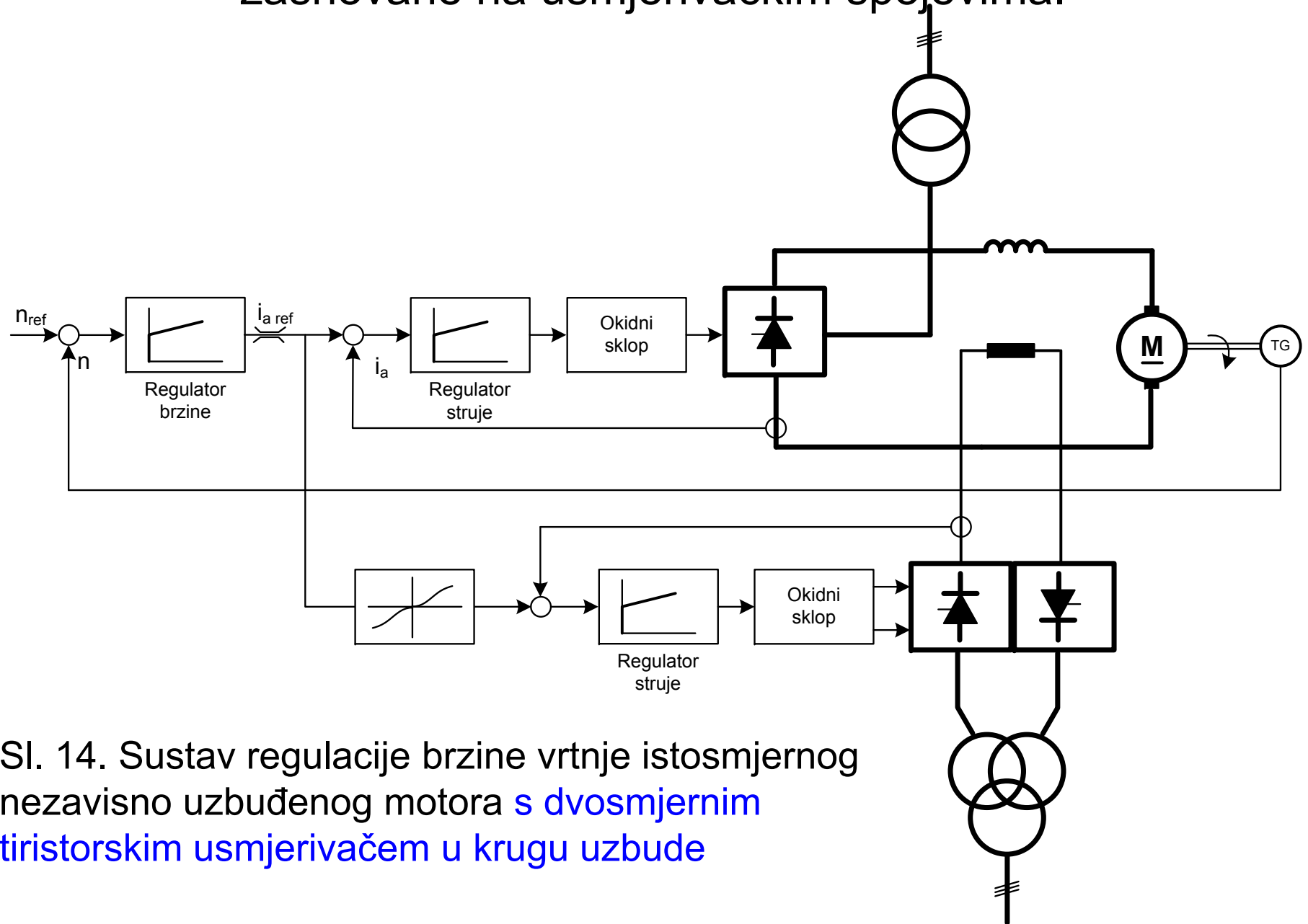
- Iznos kružne struje se mora kontrolirati. Da li je dovoljno da se održavanjem uvjeta (10) osigura kontrola kružne struje?
- Odgovor je negativan a razlog je u tome što uvijek postoji različitost u karakteristikama upravljačkih (okidnih) sklopova a osim toga postoji i strujna ovisnost padova napona na sklopkama
- To može rezultirati povećanom kružnom strujom ali i isprekidanom kružnom strujom što onda utječe na dinamiku sustava (spor odziv) kod reverziranja
- Upravo regulacijska struktura na sl. 13. osigurava. Na osnovi i_{aref} , koja dolazi od nadređenog regulatora, određuju se referentne struje i_{1ref} i i_{2ref} tako da vrijedi

$$\begin{aligned} i_{1ref} - i_{2ref} &= i_{aref}, \\ \min(i_{1ref} - i_{2ref}) &= i_{kref} = konst \end{aligned} \quad (11)$$

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Upravo funkcijski generator na sl.13. u grani referentne vrijednosti struje armature osigurava kontrolu kružne struje, tako da ona nikad ne može pasti na nižu vrijednost od i_{kref} određene izrazom (11)
- Zaključak je da upravljanje s pretvaračem u otvorenoj petlji koristeći izraz (10), o jednakosti srednjih vrijednosti usmjerivača, nije dovoljan za osiguranje optimalnosti sustava (gubici, dinamika, blagi prijelazi pri reverziranju)

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.



Sl. 14. Sustav regulacije brzine vrtnje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora s dvosmjernim tiristorskim usmjerivačem u krugu uzbuđene

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Smjer brzine vrtnje istosmjernog motora može se mijenjati i **promjenom smjera uzbudne struje** pomoću dvosmjernog tiristorskog usmjerivača za napajanje kruga uzbuđivanja (sl.14.)
- U krugu armature je dvokvadrantni usmjerivač; dakle, **polaritet napona se može promijeniti ali smjer struje se ne može promijeniti**
- Upravljanje radom usmjerivača u uzbuđnom krugu je određeno **zahtjevom za armaturnom strujom** (referentnom vrijednošću).
- Regulator struje uzbuđivanja upravlja usmjerivačima u uzbuđivanju na sličan način kao i regulator struje armature pri upravljanju usmjerivačima u armaturi. Pri tome se **kod reverziranja struje uzbuđivanja mora “blokirati” usmjerivač u armaturi stroja**, budući da se struja uzbuđivanja pri reverziranju mijenja od nula do nazivne struje (u jednu i drugu stranu)
- Karakteristike ovakvog sustava su da mu je dinamika lošija od dinamike kod upravljanja u krugu armature. **Zašto?**

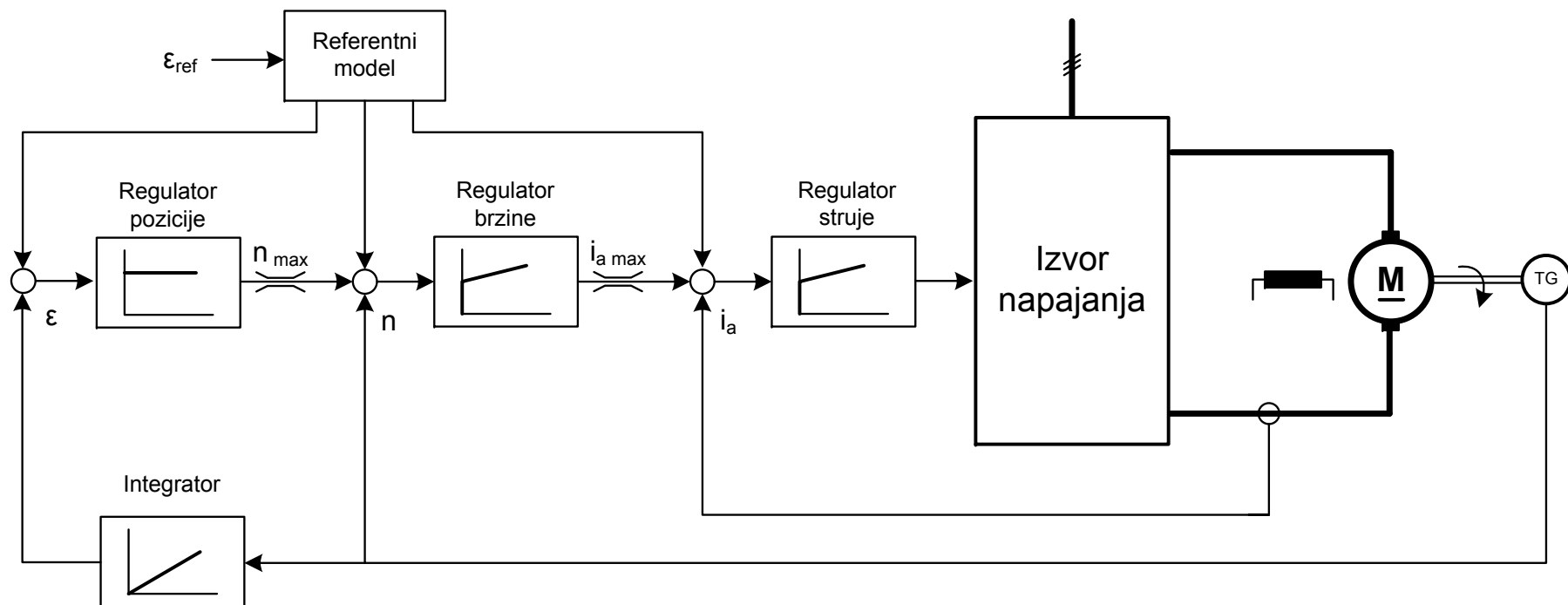
Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Prednosti ovakvog upravljanja je u **jeftinijem rješenju** jer se u uzbudi **upravlja vrlo malom snagom**, pa su **usmjerivači malih snaga**
- Upravljanje malim strujama u uzbudi znači da se **sve komponente u energetskom krugu dimenzioniraju na niže vrijednosti**
- Ovakva koncepcija upravljanja se koristi samo onda ako **zahtjevi za dinamikom u 4q pogonu nisu visoki**

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

- Do sada su uglavnom razmatrani **kaskadni sustavi s nadređenom petljom brzine vrtnje**
- Pri tome su korišćeni **P** ili **Pi regulatori brzine** s podređenom petljom struje armature
- Za kaskadne **sustave regulacije pozicije** potrebna je još jedna vanjska povratna veza po poziciji te regulator pozicije koji bi na izlazu davao referentni signal za regulator brzine
- Regulatori pozicije su obično **P** tipa (3 PI regulatora u kaskadi bi sustav mogla učiniti nestabilnim).
- S obzirom da **su kaskadni sustavi** regulacije **sporije dinamike** od onih koji imaju samo jednu povratnu vezu (pod uvjetom da je ostvariva), moguće je kaskadni sustav uvesti i **predupravljanje** (unaprijedne signale, eng. *feed-forward*) koje **poboljšava dinamiku** sustava (**slieđenje** referentne vrijednosti)

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.



Sl. 15. Sustav regulacije pozicije istosmjernog nezavisno uzbuđenog stroja s predupravljanjem (s unaprijednim signalima) za poboljšanje dinamike em-p-a

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na usmjerivačkim spojevima.

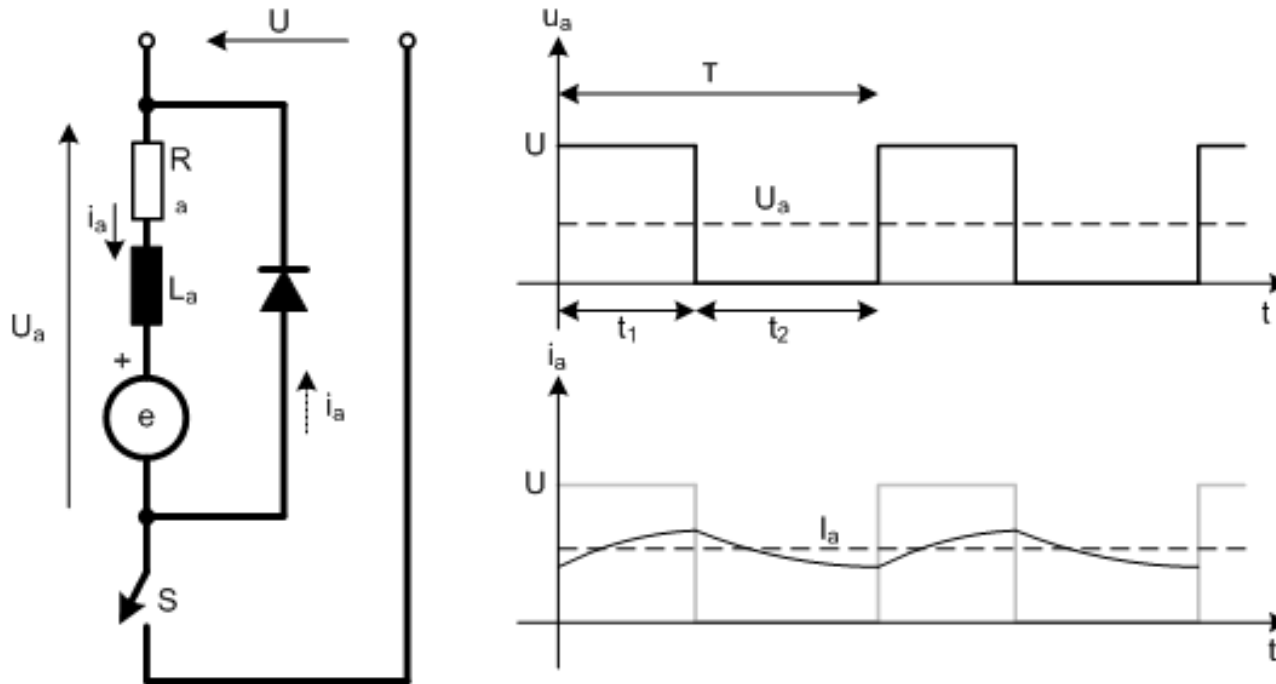
- Na osnovi **referentnog modela sustava** i zadavanja **referentne pozicije** u sustavu je moguće „ubrizgati“ signale u **unutarnje povratne veze po struji i brzini** (u granu referentne vrijednosti brzine i struje struje) kako bi se **ubrzao odziv** sustava.
- Ukoliko se generira određeni **profil trajektorije željene pozicije**, jednostavno se mogu dobiti i **trajektorije željene brzine i ubrzanja** koje se onda kao **predupravljački** (unaprijedni) signali mogu dodati u **direktne grane referentne brzine i struje** , sl.15.

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Istosmjerni pretvarači se koriste u upravljanju istosmjernih strojeva **gdje god postoji konstantan istosmjerni napon kao izvor napajanja**
- To može biti **baterija, diodni mosni spoj napajan izmjeničnim ulaznim naponom** ili bilo koji drugi istosmjerni uzvor napajanja.
- Zadaća istosmjernog pretvarača je da **konstantan istosmjerni izvor napajanja** (neregulirani istosmjerni ulazni napon) **pretvori u promjenljivi (izlazni) napon** s kojim se napaja stroj (armatura)
- Takvi pretvarači se zovu **istosmjerni pretvarači** ili **čoperi** (od engl. *Chopper, DC/DC converter*).
- Osnovne topologije istosmjernih pretvarača su:
 - **silazni istosmjerni pretvarač** (engl. *step-down (buck)*)
 - **uzlazni istosmjerni pretvarač** (engl. *step-up (boost)*)
 - **silazno-uzlazni istosmjerni pretvarač** (eng. *buck-boost*)

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Najčešće korištena topologija istosmjernog pretvarača je **mosni spoj** koji je izveden iz **silaznog istosmjernog pretvarača**



Sl.16. Silazni istosmjerni pretvarač s valnim oblicima napona i struje armature (kao trošilom)

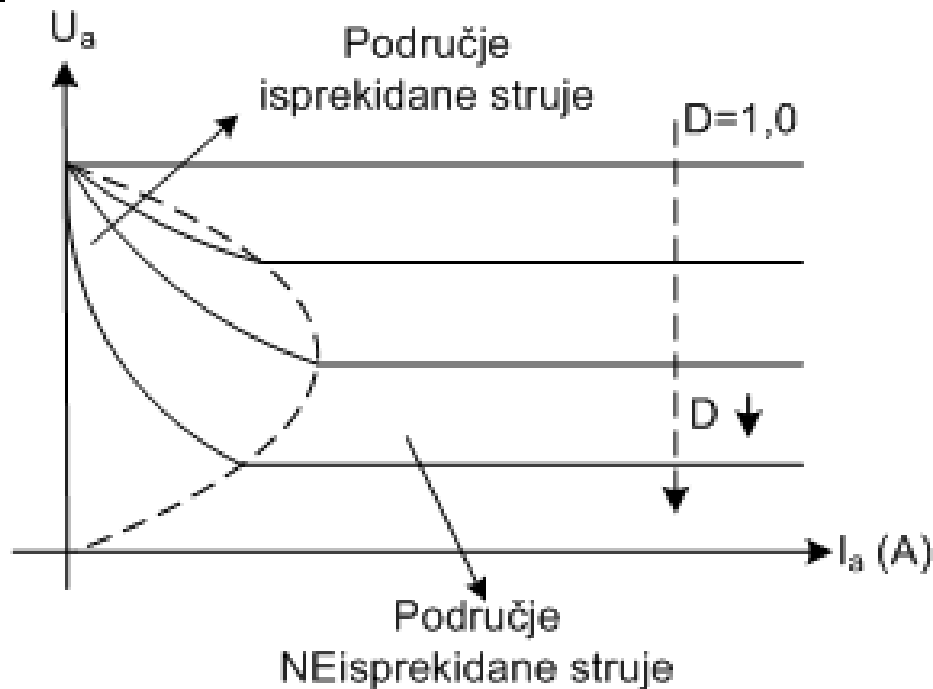
Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Pretvorba istosmjernog napona postiže se **sklapanjem sklopke S**
- Kada je sklopka uključena **armatura stroja je spojena na napon U i struja armature raste**. Brzina porasta ovisi o **vremenskoj konstanti (L_a / R_a)**. Kada se sklopka S isključi napon armature jednak je nuli a struja armature pada.
- Na **valovitost struje** može se utjecati promjenom frekvencije sklapanja sklopke S. Uz **veću frekvenciju** sklapanja **valovitost struje je manja** ali se istovremeno **povećavaju sklopni gubici**. **Valovitost struje armature** potrebno je uzeti u obzir zbog njenog utjecaja na **pulzacije momenta i gubitke u željezu motora** (izmjenično magnetiziranje!)
- Uz manji moment inercije cijelog pogona frekvencija sklapanja treba biti manja. Red veličine sklapanja je 1 kHz.
- Ako je D faktor (opterećenja) vođenja sklopke, srednja vrijednost napona armature računa se prema izrazu

$$U_a = \frac{t_1}{T} U = D \cdot U \quad (12)$$

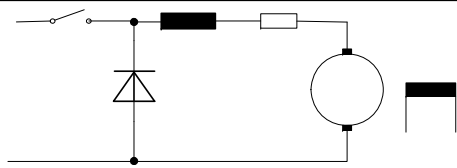
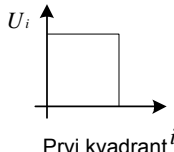
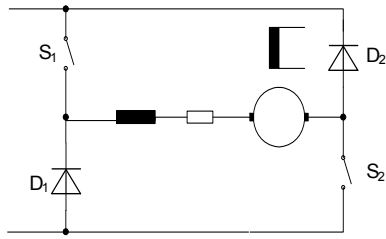
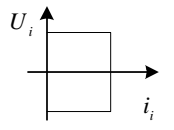
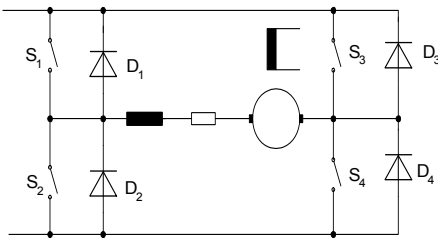
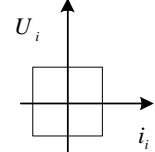
Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Način upravljanja pretvaračem prilikom kojeg se mijenja širina impulsa zove se **pulsno širinska modulacija** (engl. **Pulse Width Modulation**, PWM)
- Na sl. 16. struja je **neisprekidana**. Međutim, kao i kod usjmerivača, struja može biti **isprekidana** što narušava **linearnost karakteristike istosmjernog pretvarača**, sl.17.



Sl.17. Struno-naponska karakteristika istosmjernog silaznog pretvarača

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

Topologija	Vrsta sklopa	Funkcija	Područje rada
	Silazni (1-kvadrantni) čoper	$U_i = U_{ul}$ za S=on $U_i = 0$ za S=off	 <p>Prvi kvadrant i_i</p>
	2-kvadrantni čoper	$U_i = +U_{ul}$ za S_1 i S_2 on $U_i = -U_{ul}$ za S_1 i S_2 off	 <p>2-kvadrantni</p>
	4-kvadrantni čoper	S_3 off, S_4 on, upravljanje S_1 i S_2 $V_i > 0$, i_i reverzibilna S_1 off, S_2 on upravljanje S_3 i S_4 $V_i < 0$ i i_i reverzibilna	 <p>4-kvadrantni</p>

Pregled najčešće korištenih topologija istosmjernih pretvarača u istosmjernim elektromotornim pogonima

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- **Prijenosna funkcija** silaznog pretvarača može se izraziti kao:

$$F(s) = \frac{u_a(s)}{u_{ul}(s)} = K_{sp} e^{-s\tau} \quad (13)$$

K_{sp} - pojačanje istosmjernog silaznog pretvarača

τ - mrtvo vrijeme pretvarača

u_{ul} - upravljački napon kojim se određuje faktor vođenja D

- **Srednja vrijednost mrtvog vremena** τ može se izraziti kao

$$\tau = T / 2$$

- Prijenosnu funkciju iz izraza (13) moguće je aproksimirati **prijenosnom funkcijom prvog reda**

$$F(s) = \frac{u_a(s)}{u_{ul}(s)} = K_{sp} \frac{1}{1 + s\tau} \quad (14)$$

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

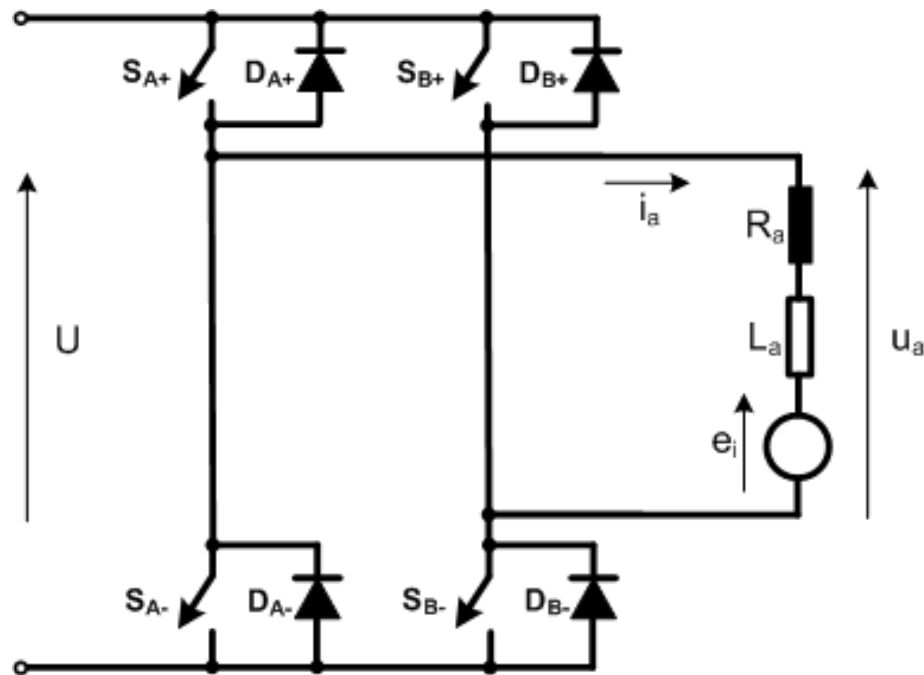
- S obzirom da je **frekvencija sklapanja kod istosmjernih pretvarača relativno velika** u odnosu na vremenske konstante stroja, **prijenosna funkcija istosmjernog pretvarača se može prikazati samo pojačanjem**, dakle

$$F(s) = \frac{u_a(s)}{u_{ul}(s)} = K_{sp} \quad (15)$$

- Formalno, **struktura prijenosne funkcije kruga regulacije struje armature stroja upravljanog iz usmjerivača i istosmjernog pretvarača se ne razlikuje.**
- Ako se usporede izrazi za prenosnu funkciju usmjerivača (4) i istosmjernog pretvarača (14), one su strukturno potpuno iste.
- Ako bi se sada na istosmjerni emp upravljan istosmjernim pretvaračem primijenila tehnika tehničkog optimuma na krug regulacije struje, **zaključci doneseni o promjeni strukture regulatora struje u isprekidanom načinu rada vrijede u potpunosti i za slučaj istosmjernog emp-a upravljanog s istosmjernim pretvaračem!!! (VAŽNO)**

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

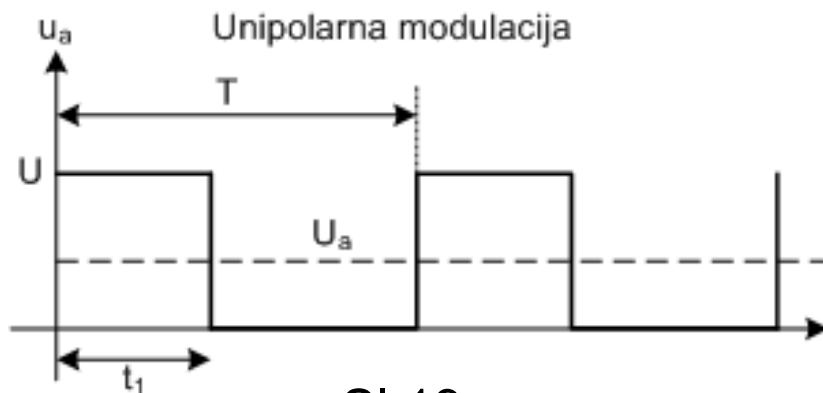
- Najčešće korišten **istosmjerni 4q pretvarač** u upravljanju istosmjernog stroja je prikazan na sl.18



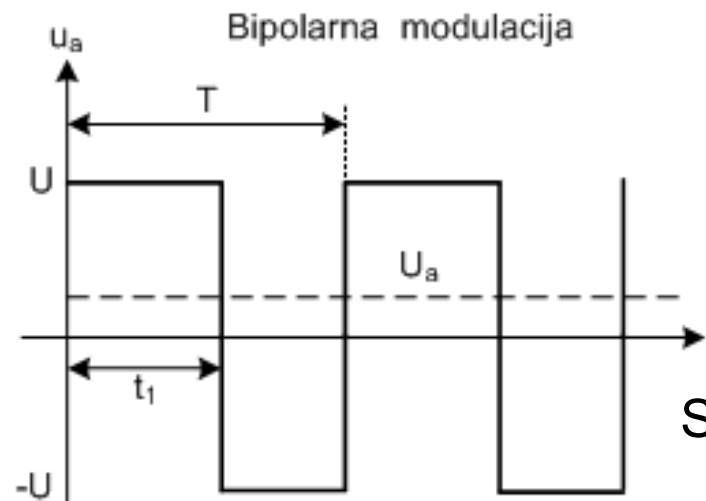
Sl.18. Istosmjerni silazni 4q pretvarač u mosnom spoju

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Dvije sklopke iz iste grane (S_{A+} i S_{A-} ili S_{B+} i S_{B-}) **ne smiju biti istovremeno uključene** jer bi se izvor U na taj način kratko spojio
- Diode omogućavaju nesmetan smjer struje bez obzira na polaritet napona na stroju. Trenutni iznos napona na stroju, ovisno o stanju upravljivih sklopki, može iznositi $+U$, $-U$ ili 0 .
- Upravljive sklopke su najčešće bipolarni tranzistori, MOSFET, ili IGBT. Dva su osnovna načina upravljanja sklopkama mosnog pretvarača:
 - **Bipolarna modulacija širine impulsa** – napon ima vrijednosti $+U$ i $-U$
 - **Unipolarna modulacija širine impulsa** – napon ima vrijednosti $+U$ i 0



Sl.19.a



Sl.19.b

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Ako je faktor opterećenja (omjer vođenjenja) definiran kao u izrazu (12) onda se je srednja vrijednost napona za unipolarnu modulaciju računa kao:

$$U_a = D \cdot U$$

a za bipolarnu modulaciju kao

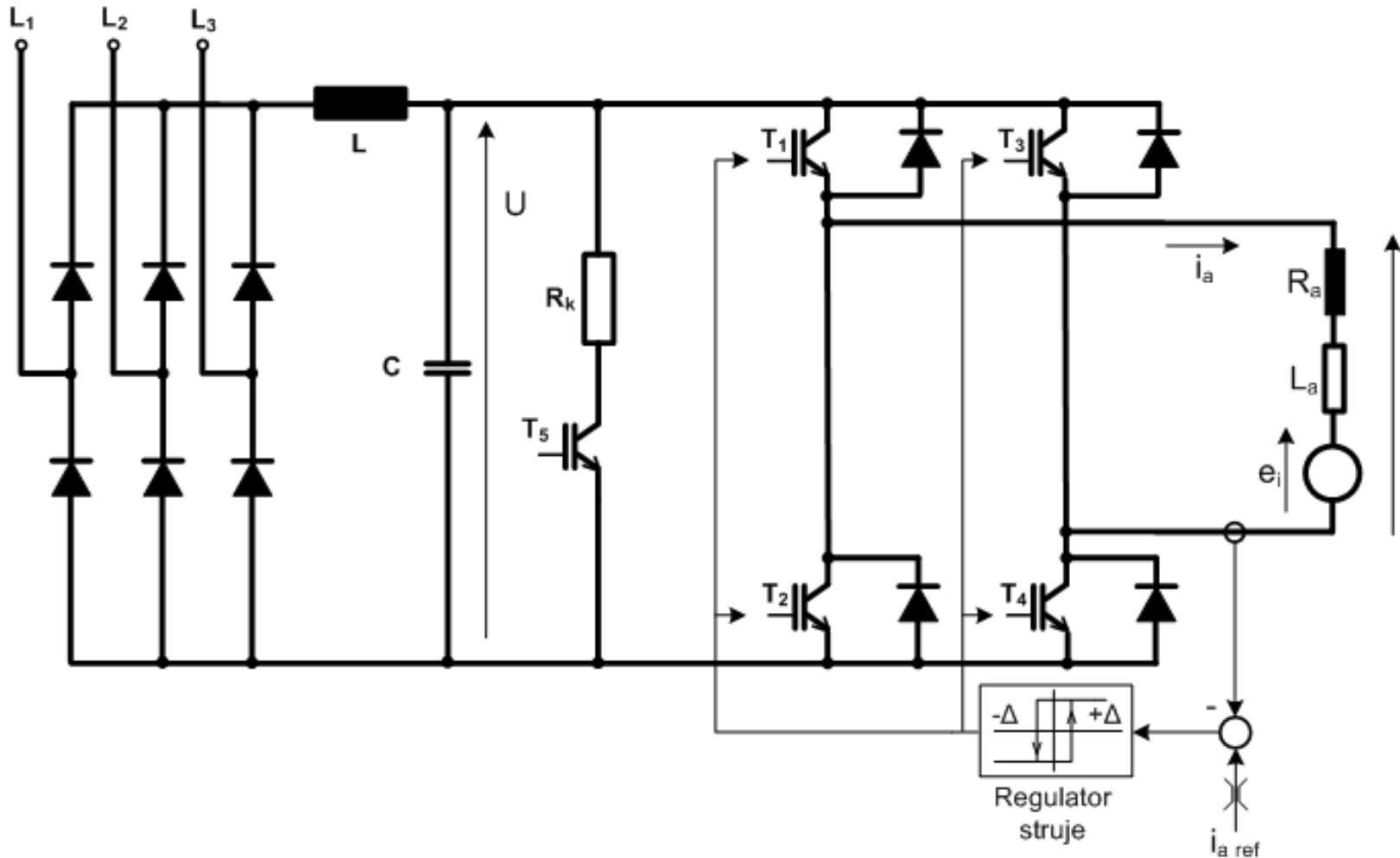
$$U_a = U(2D - 1)$$

- Mijenjanjem srednje vrijednosti napona na izlazu pretvarača (U_a) mijenja se struja armature istosmjernog stroja prema karakteristici na sl.17 . Frekvencija sklapanja za oba slučaja modulacije fiksno je određena (red veličine 1kHz).

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Sustav regulacije istosmjernog stroja s istosmjernim pretvaračem u mosnom spoju može se realizirati na sličan način kao kad se istosmjerni stroj napaja iz usmjerivača (vidi sl.10.)
- U tom slučaju bi se PI regulator struje s okidnim sklopom kod usmjerivača trebao zamijeniti s Pi regulatorom struje s pulsno-širinskom modulacijom impulsa za upravljanje istosmjernim pretvaračem (PWM-om).
- Frekvencija rad sklopki u istosmjernom pretvaraču u tom slučaju bi bila fiksna
- Međutim, sustav regulacije istosmjernog stroja s istosmjernim pretvaračem u mosnom spoju može se realizirati na drugačiji način; s histereznim regulatorom struje, često korištenom za upravljanje istosmjernog stroja napajanog iz istosmjernog pretvarača, (vidi sl.20)
- U ovom slučaju frekvencija rada sklopki se mijenja ovisno o definiranom pojasu histereze Δ kojom su određene pulzacije struje armature

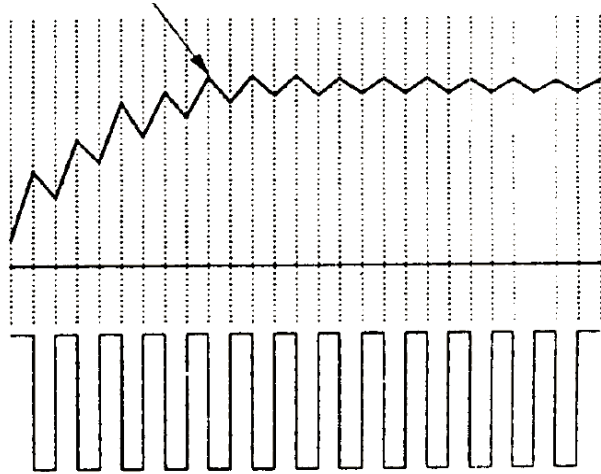
Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).



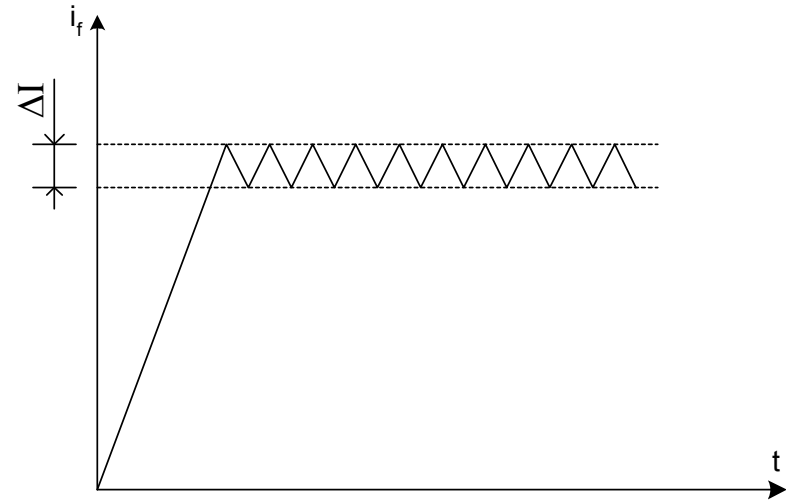
Sl.20. Sustav regulacije istosmjernog stroja s pretvaračem u mosnom spoju i histereznim regulatorom struje

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

odziv struje na skok ref. vrijednosti



Sl. 21. Regulator struje s PWM-om

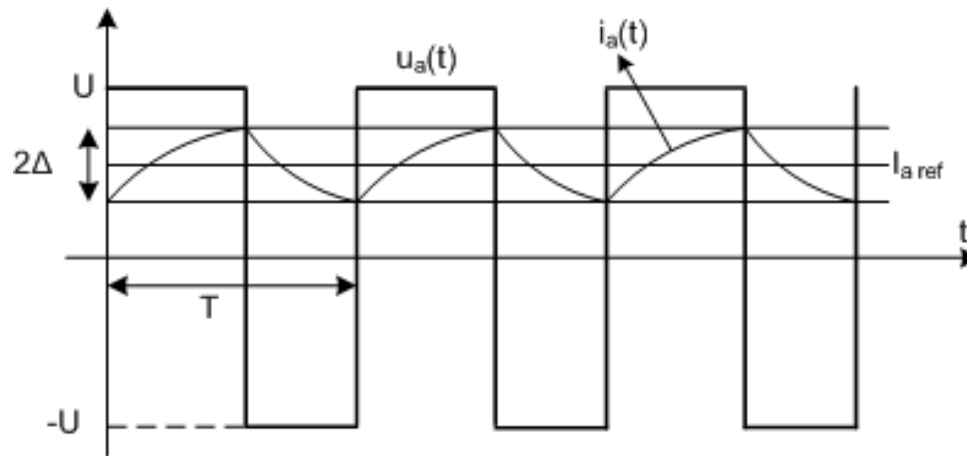


Sl.22. Histerezni regulator struje

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Sustav se napaja iz trofaznog izvora napona koji se ispravlja s diodnim ispravljačem.
- Kondenzator služi za smanjenje valovitosti napona, a zavojnica za smanjenje valovitosti struje. Otpornik R_k i sklopka T_5 su elementi tzv. kočnog sklopa
- Kada istosmjerni stroj vraća struju (generatorski rad), napon na kondenzatoru raste. Uključenjem sklopke dio struje se zatvara preko otpornika R_k kako bi se smanjilo naponsko naprezanje kondenzatora.
- Mjerena struja armature se uspoređuje s zadanom referentnom strujom, a signal razlike se odvodi u histerezni regulator.
- Valni oblik struje i napona armature prikazan je na sl.23.

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).



Sl.23. Valni oblik struje i napona armature istosmjernog stroja s histereznim regulatorom struje armature

Regulacija struje armature s histereznim regulatorom djeluje na slijedeći način:

$$i_a < I_{a\text{ ref}} - \Delta$$

sklopke se postavljaju u sklopno stanje koje osigurava porast struje, odnosno napon armature iznosa $+U$,

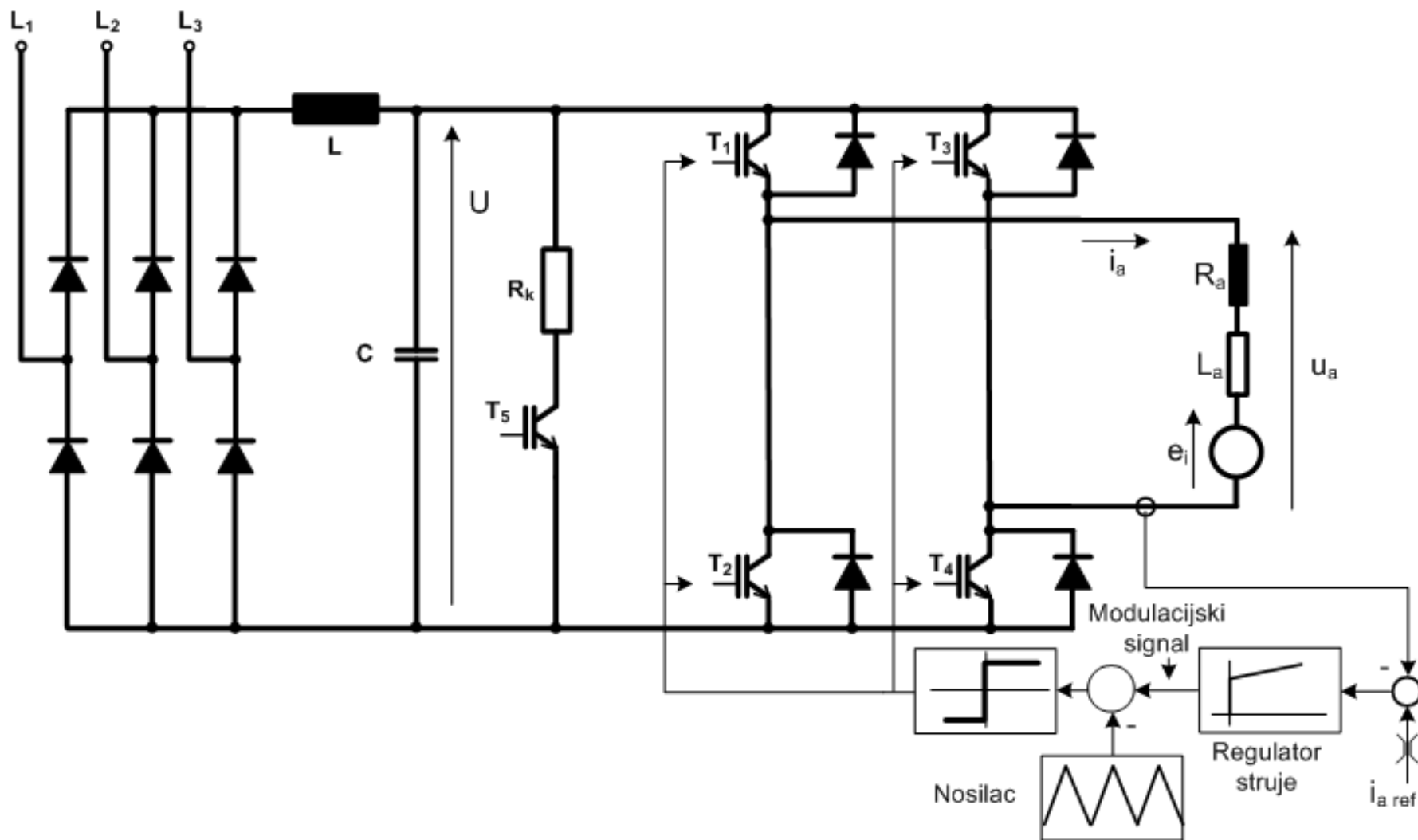
$$i_a > I_{a\text{ ref}} + \Delta$$

sklopke se postavljaju u sklopno stanje koje osigurava pad struje, odnosno napon armature iznosa $-U$ (ili 0).

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).

- Povećanjem iznosa Δ povećava se valovitost struje.. Ako je Δ konstantnog iznosa tada se za različite iznose I_{aref} mijenja i vrijeme T , odnosno frekvencija sklapanja, a s tim i valovitost napona i struje armature.
VAŽNO!
- Sustav regulacije istosmjernog stroja s istosmjernim pretvaračem u mosnom spoju i PI regulatorom struje (s PWM-om) prikazan je na sl.24.
- Na osnovi odstupanja mjerene struje od zadane referentne vrijednosti, sustav regulacije generira **upravljačke signale** za sklapanje sklopki.
- Napon armature u ustaljenom stanju ima iznos koji osigurava da struja armature bude na zadanom referentnom iznosu
- **Za razliku od regulacije struje histereznim regulatorom, frekvencija napona armature i valovitosti struje kod ovakve regulacije je nepromjenljiva**, a određena je frekvencijom signala kojim se generiraju impulsi za sklopke
- Regulacija brzine vrtnje i pozicije istosmjernih strojeva napajanih iz istosmjernih pretvarača ne razlikuje se od onih napajanih iz usmjerivača

Uobičajene regulacijske strukture s istosmjernim strojem zasnovane na istosmjernim pretvaračima (DC/DC).



Sl.24. Sustav regulacije istosmjernog stroja s pretvaračem u mosnom spoju i PI regulatorom struje (s PWM-om).

LITERATURA

- [1] R Wolf, *Osnove električnih strojeva*, Školska knjiga Zagreb, 1995.
- [2] Z.Vukić, Lj. Kuljača, *Automatsko upravljanje*, Kigen Zagreb, 2005.
- [3] B. Jurković, *Elektromotorni pogoni*, Školska knjiga Zagreb, 1990.
- [4] R. Krishnan, *Electric motor drives*, Prentice Hall New Jersey, 2001.
- [5] Mohan, Undeland, Robbins, *Power Electronics* John Wiley & Sons
- [6] W. Leonhard, *Control of electrical drives*, Springer 1996.