

Lekcija 7

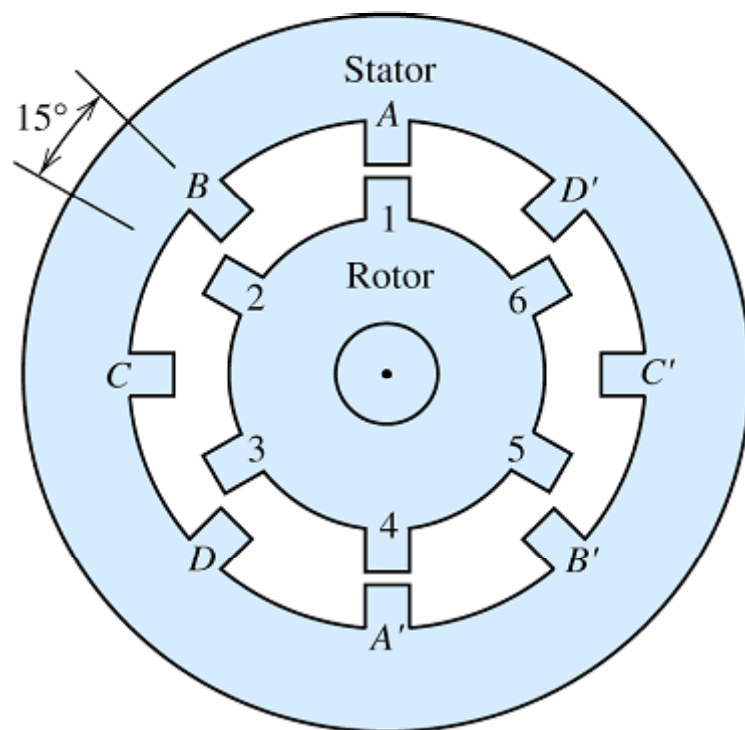
Upravljanje koračnim motorima

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić

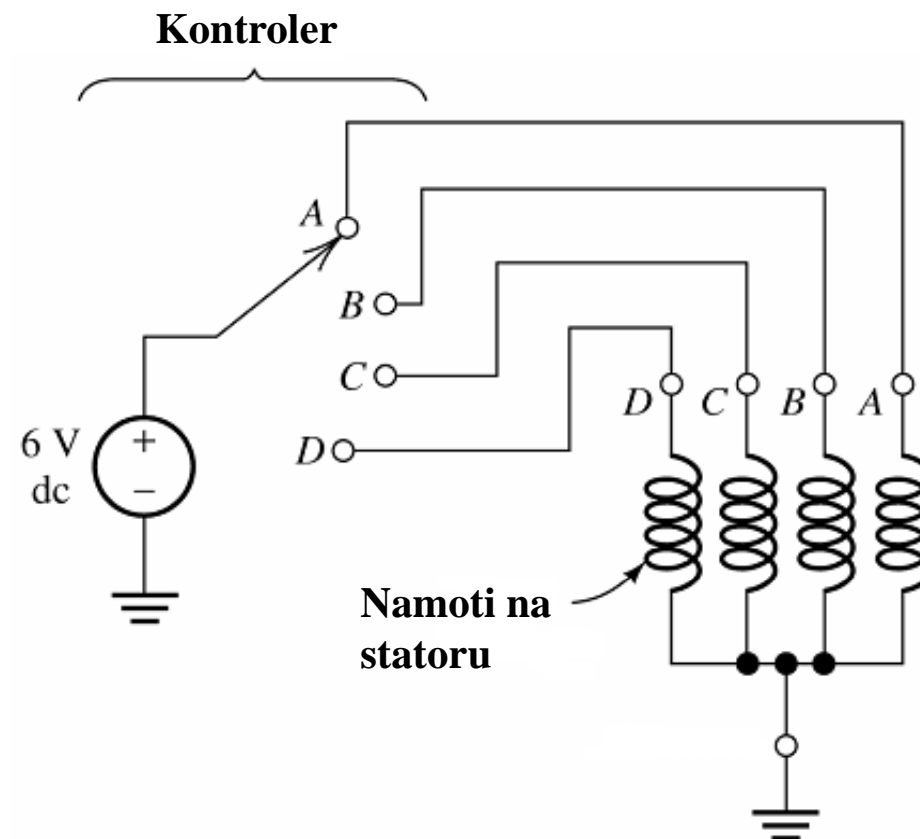
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Aktuatori

7.1. Upravljanje koračnim motorima



Poprečni presjek koračnog motora. Namoti na statorskim polovima nisu prikazani.



Električni krug koračnog motora.

Otvoreni sistem upravljanja koračnim motorom

- Osnovni elementi otvorenog sistema upravljanja su:
 - **upravljački uređaj** – izvodi algoritam upravljanja (režim rada motora),
 - **kontroler stanja faza** – određuje redoslijed uključenja faza i smjer kretanja,
 - **pojačalo snage** – osigurava nominalan napon i struju svake faze.
- **Tačnost pozicioniranja** je određena iznosom koraka i momentom tereta.
- **Brzina vrtnje** jednaka je frekvenciji upravljačkih impulsa.
- **Pomak** – proporcionalan broju upravljačkih impulsa.

Otvoreni sistem upravljanja koračnim motorom

- Osnovni nedostaci:
 - maksimalna brzina nije velika (velika zaliha momenta zbog pouzdanosti rada),
 - nije moguće upravljati oscilacijama brzine vrtnje i pozicijom pri zaletu i zaustavljanju.
- Povećanje brzine vrtnje moguće uvođenjem **povratne veze s davača impulsa direktno na kontroler stanja faza** – upravljački uređaj je izvan zatvorene petlje.
- Kontroler stanja faza daje nalog za sljedeći korak čim se izvrši prethodni korak.
- Moguće je smanjiti potrebnu zalihu momenta.

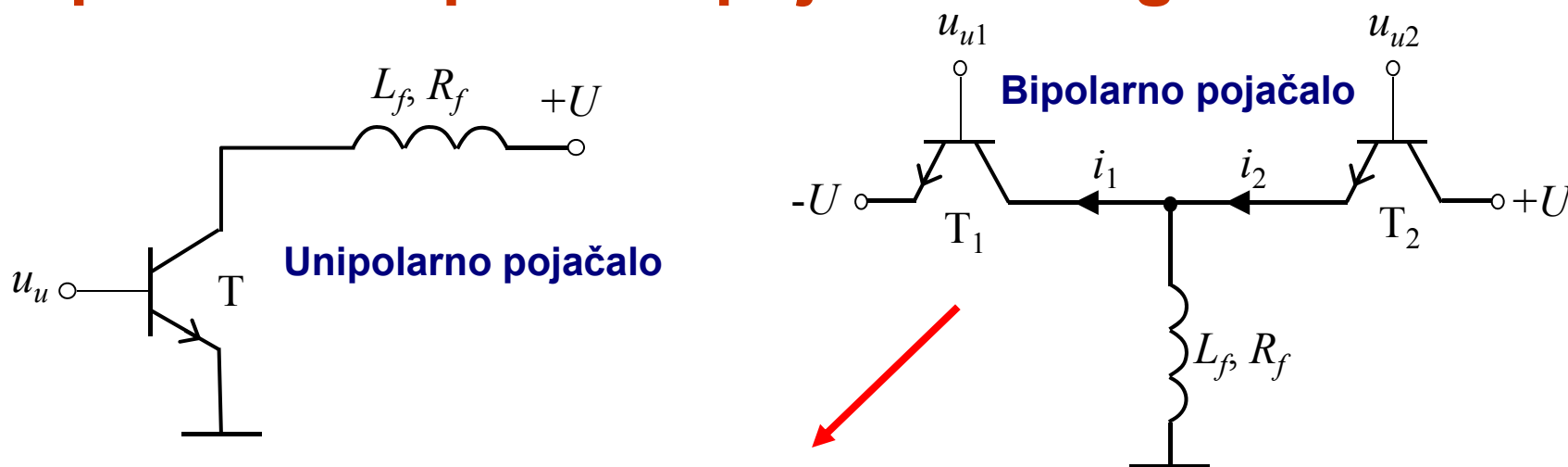
Zatvoreni sistem upravljanja koračnim motorom

- Povratna veza s davača impulsa na upravljački uređaj.
- Poboljšava se momentna karakteristika (optimalno upravljanje).
- Povećana je brzina vrtnje.
- Smanjena je zaliha momenta.
- Nedostatak – zbog korištenja davača impulsa značajno veća cijena sistema.
- Rješenje: umjesto davača impulsa mogu se koristiti električki signali (napon i struja faze) za određivanje položaja i brzine vrtnje.

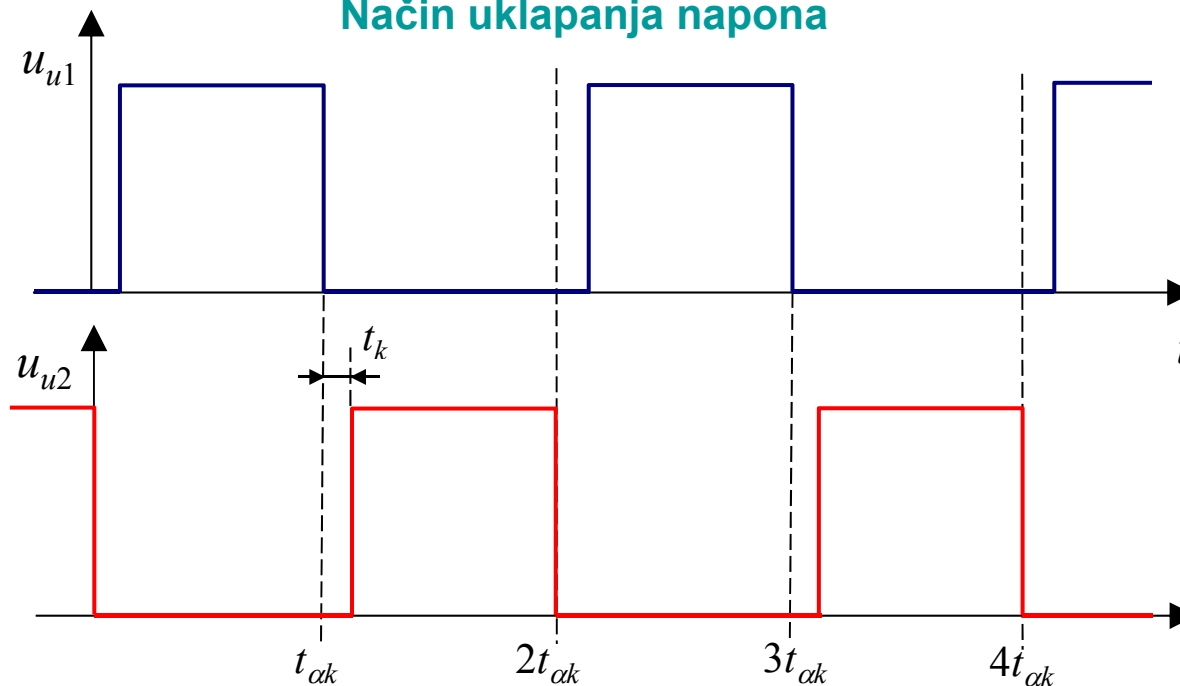
7.2. Pojačala snage (pobudni (uzbudni) krugovi)

- Za napajanje svake faze koristi se zasebno pojačalo snage.
- **Unipolarna pojačala** - protjecanje struje u jednom smjeru i njezino isključenje (jednosmjerna uzbuda).
- Primjer: faza motora u kolektorskom krugu tranzistora koji radi kao sklopka.
- **Bipolarna pojačala** (dvosmjerna uzbuda)- protjecanje struje u oba smjera (mogu biti s bipolarnim i unipolarnim izvorom napajanja).
- **Za pouzdan rad – treba onemogućiti kratki spoj tranzistora (prvo sigurno gašenje prvog tranzistora, a tek onda uključenje drugog)** – vidi sliku.
- Bipolarno pojačalo s jednostrukim izvorom napajanja - mosni (H) spoj tranzistora.

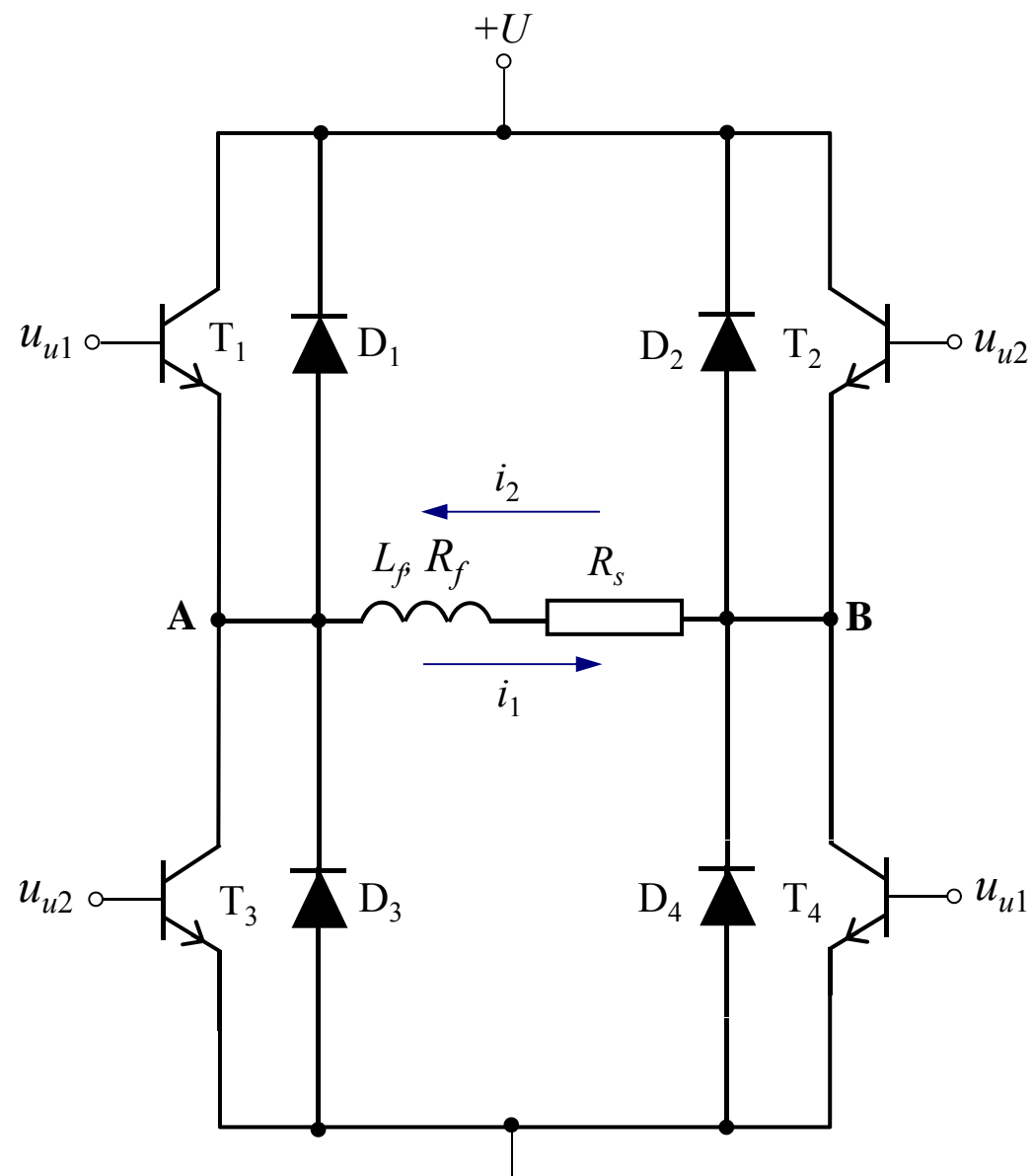
Unipolarno i bipolarno pojačalo snage



Način uklapanja napona



7.2.1. Mosni (H) spoj pojačala 1 faze motora



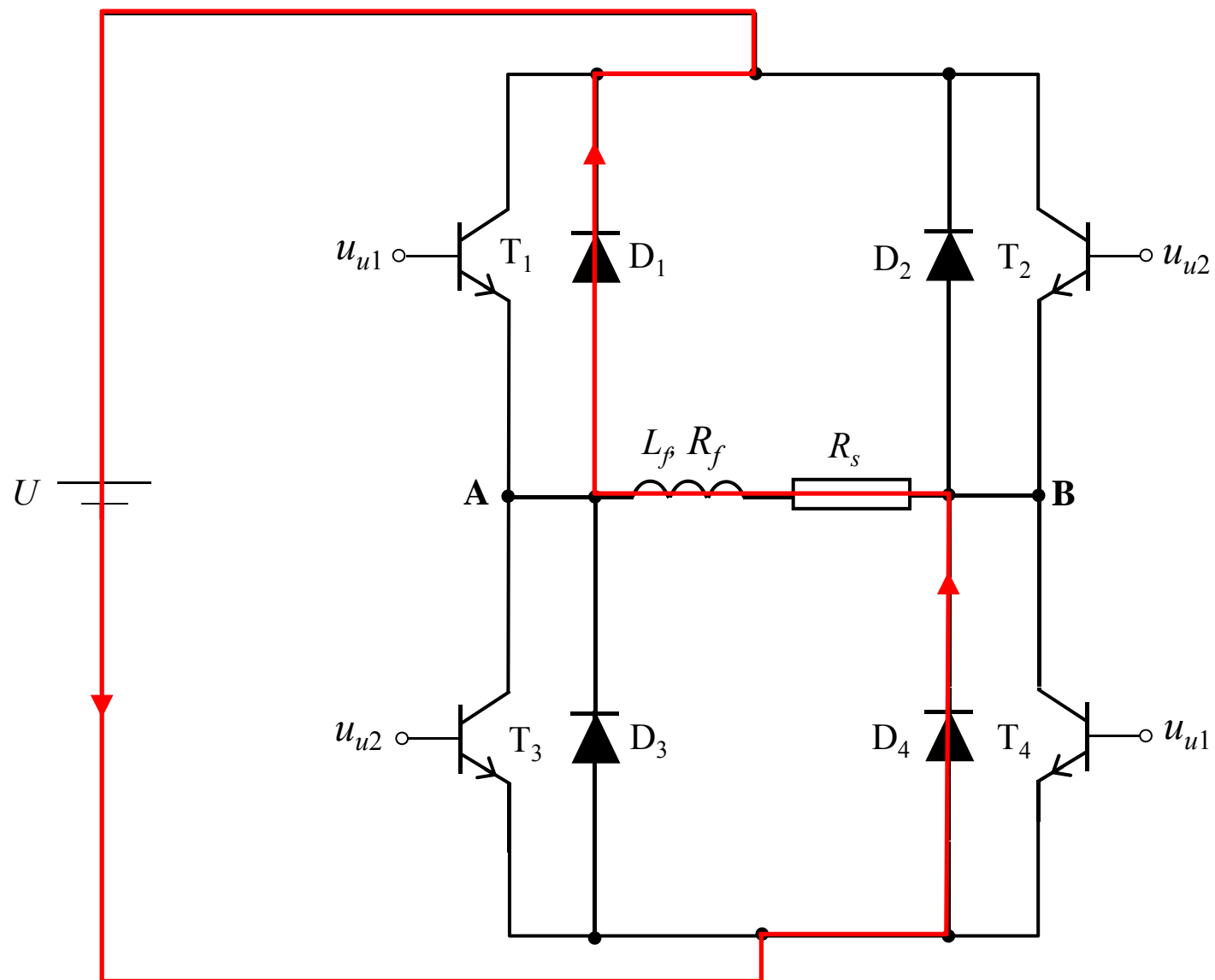
Princip rada mosnog spoja

- Radi se o krugu za dvosmjernu pobudu svake pojedine faze motora.
- **Dvosmjerna pobuda se koristi kod koračnih motora s permanentnim magnetima** (permanentnomagnetski koračni motori).
- Ovisno o zahtijevanom polaritetu uključuje se jedan ili drugi par tranzistora.
- Za pozitivnu pobudu faze otvaraju se tranzistori T_1 i T_4 .
- U tom slučaju struja teče od pozitivnog pola napona napajanja preko tranzistora T_1 , faznog svitka, korekcijskog otpora i tranzistora T_4 na negativni pol.
- Za negativnu pobudu otvaraju se tranzistori T_2 i T_3 , tako da struja kroz fazni svitak teče u suprotnom smjeru.

Princip rada mosnog spoja

- Svaki pojedini od četiri tranzistora u mosnom spoju ima svoj zasebni pogon baze koji pojačava upravljački signal.
- Četiri diode spojene reverzno paralelno tranzistorima omogućuju razgradnju magnetskog polja faznog svitka izvan tranzistorske petlje (sljedeća slika).
- Na slici je prikazana struja razgradnje poslije iskapčanja tranzistora T_2 i T_3 , koja prolazi kroz energijski izvor.
- Tako se jedan dio energije vraća natrag u izvor, za razliku od kruga za jednosmjernu uzбудu (unipolarno pojačalo), u kome se ta energija troši na dodanom otporu (u seriji s diodom).
- Zbog ove uštede energije ovi krugovi se mogu koristiti i kod reluktantnih motora s više od 1 kW snage.

Struja razgradnje mosnog spoja

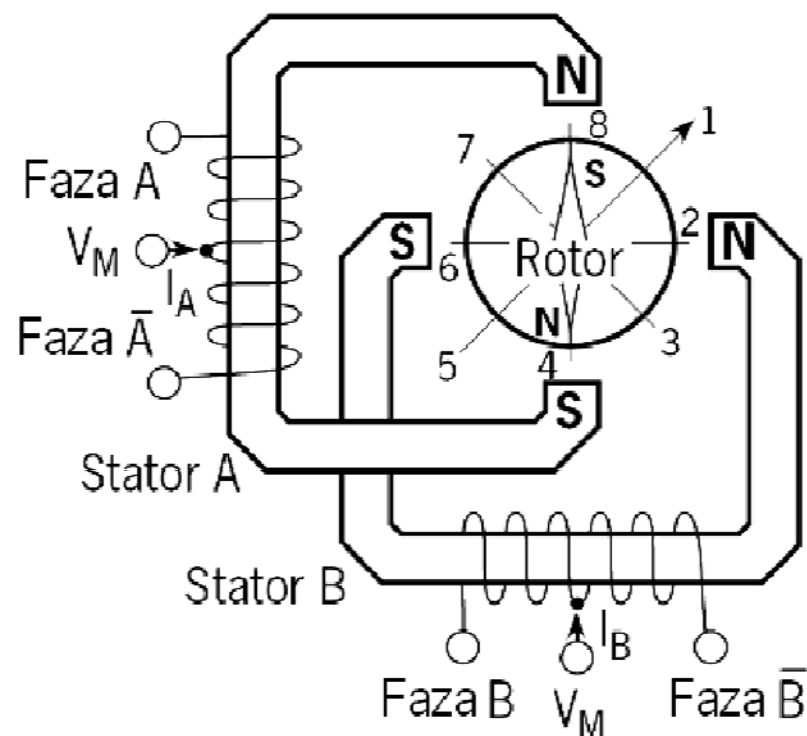
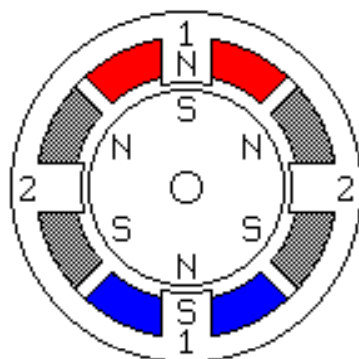
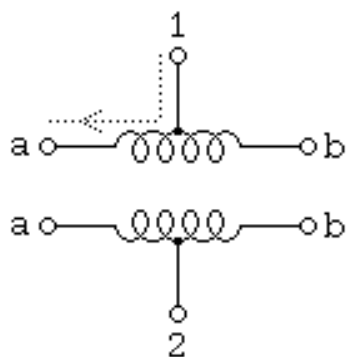


Princip rada mosnog spoja

- Druga prednost ovih pojačala u odnosu na unipolarne je manja vremenska konstanta iskapčanja.
- Zbog svoje energijske efikasnosti ova pojačala su ekonomična za uzbudu motora većih snaga, ali su s druge strane, zbog složenosti električkog kruga, neekonomični za uzbudu motora manjih snaga.
- Npr. krug za jednosmjernu pobudu ima po fazi jedan tranzistor i jednu diodu, a krug za dvosmjernu pobudu četiri tranzistora i četiri diode.
- Uzbudni krug trofaznog reluktantnog motora ima ukupno tri tranzistora i tri diode, a pobudni krug dvofaznog hibridnog motora osam tranzistora i osam dioda.
- Ekonomičnija dvosmjerna uzbuda se može riješiti bifilarnim namatanjem polnih svitaka, koji se tada mogu pobuđivati krugovima za jednosmjernu uzbudu.

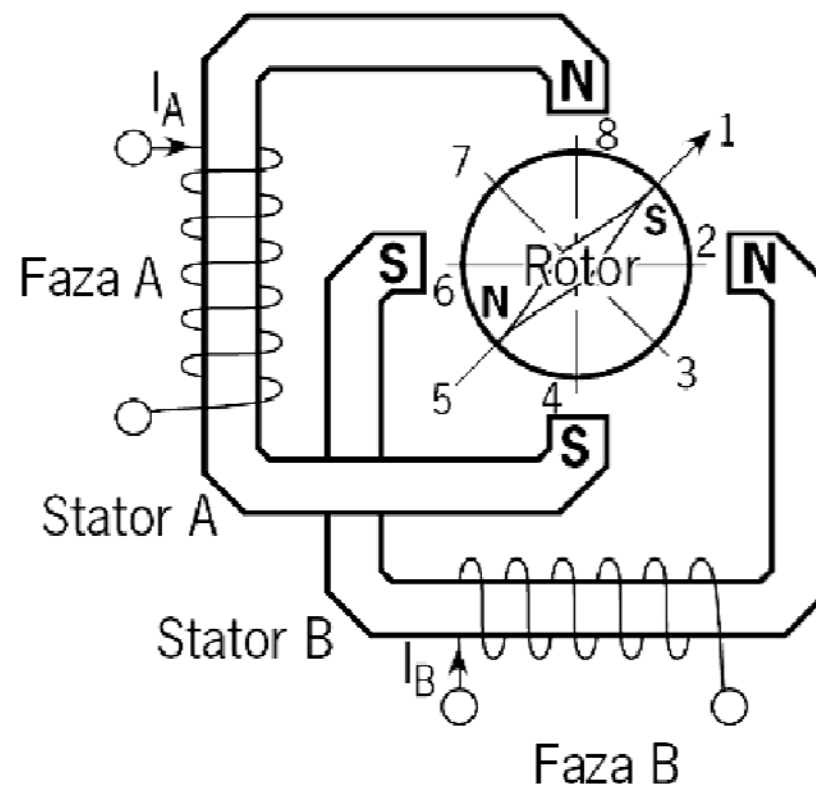
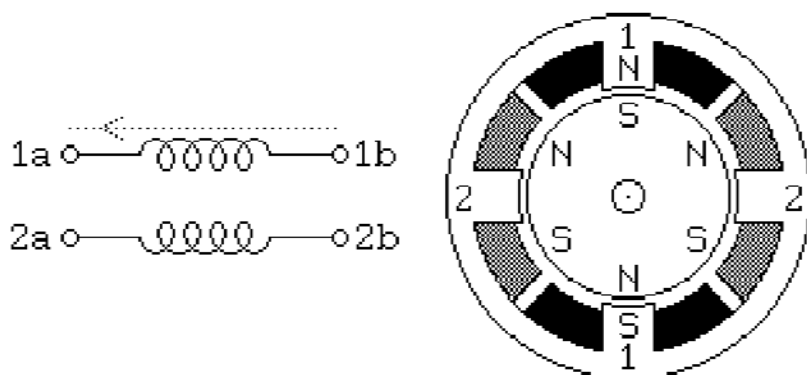
Unipolarno upravljanje koračnim motor

- Primjer: *Unipolarni* 2-fazni koračni motor s jednim parom polova po fazi i jednim parom polova rotora.
- Tok struje se može promijeniti prekapčanjem napajanja sa faze A/B u fazu \bar{A}/\bar{B} .



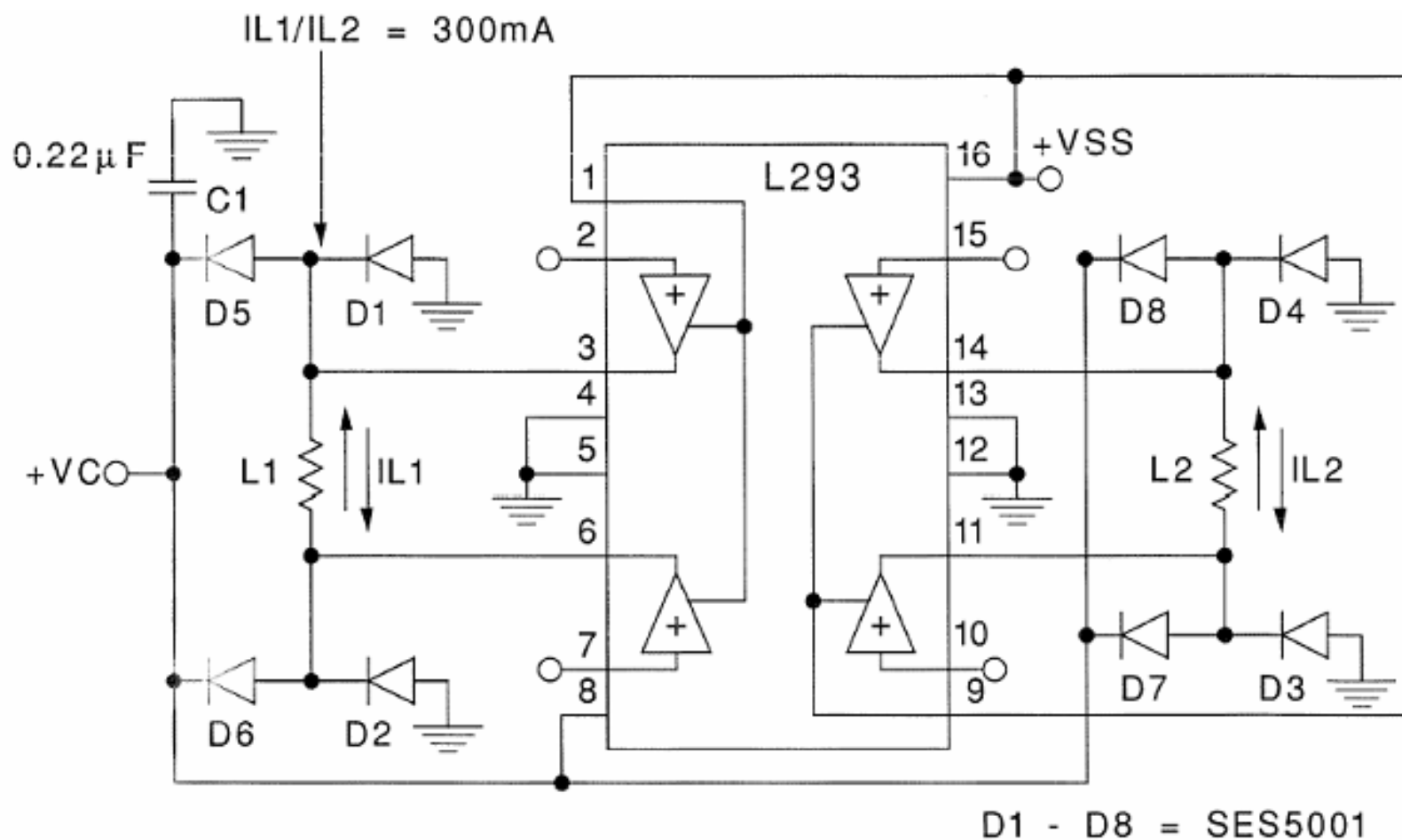
Bipolarni koračni motor

- Primjer: *Bipolarni* 2-fazni koračni motor s jednim parom polova po fazi i jednim parom polova rotora.
- Tok struje se može promijeniti zamjenom + i – polova napajanja.
- 8 punih koračnih pozicija je moguće (osnovni koračni ugao: 45°).



Bipolarno upravljanje koračnim motorom

- Koristi logiku uključivanja/isključivanja signala na mjestima 2, 7, 10 i 15.



7.2.2. Načini ubrzanja smanjenja struje

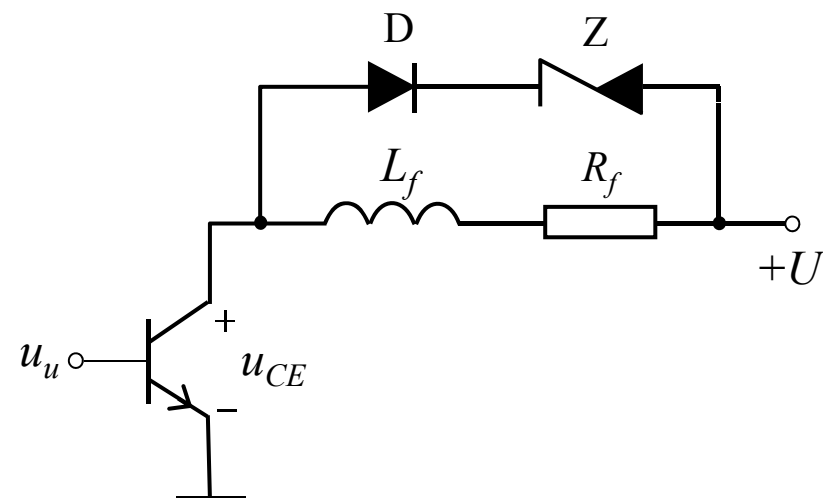
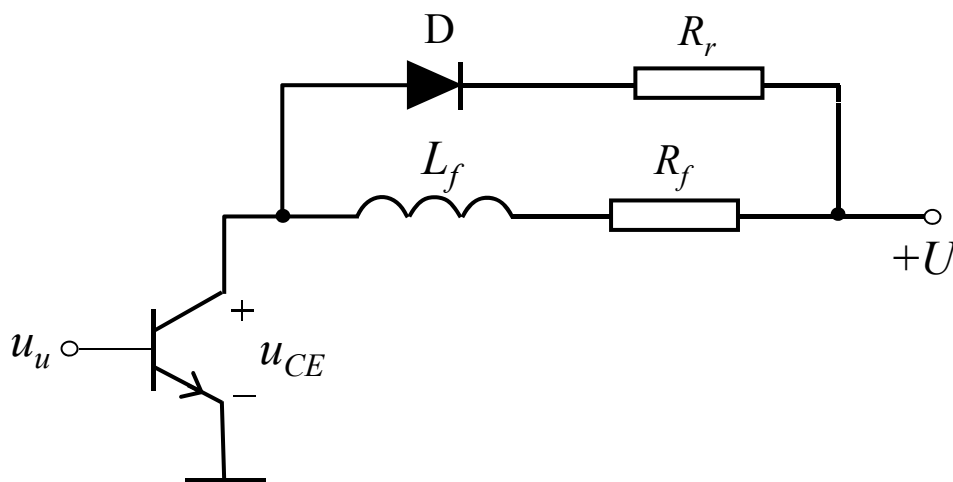
- Za vrijeme isključenja se na tranzistoru pojavljuje napon u_{CE} proporcionalan $L_f di_f/dt$.
- To je zbog toga što akumulirana energija u magnetskom polju ne dozvoljava trenutni prekid fazne struje (loš utjecaj induktiviteta faznog svitka).
- Ako se naglo ukloni upravljački signal s baze tranzistora, veliki se inducirani napon pojavljuje između kolektora i emitera, koji može oštetiti upravljački krug.
- Ovaj napon je 10-100 puta veći od napona faze U .
- Za zaštitu tranzistora i ubrzanje smanjenja struje, paralelno namotu faze spaja se:
 - dioda i otpornik,
 - zener dioda i dioda.

Načini ubrzanja smanjenja struje

- Kada se paralelno faznom namotu spoji serijski spoj diode i otpornika tada se kroz njih zatvara struja razgradnje magnetskog polja faznog svitka.
- Ako je samo dioda spojena paralelno namotu, tada:
 - tranzistor vodi – dioda nepropusno polarizirana
 - tranzistor prestaje voditi – dioda vodi
- Maksimalni napon na tranzistoru U_{CEm} je približno jednak U .
- Vremenska konstanta smanjenja struje $T = T_f = L_f/R_f$.
- Disipacija energije na R_f .
- Primjenjuje se kod manjih brzina vrtnje – sporije smanjenje struje prigušuje odziv koraka.

Načini ubrzanja smanjenja struje

- Dioda i otpornik $\rightarrow U_{CEm} > U$, $T = L_f / (R_f + R_r)$, disipacija na R_f i R_r , primjenjuje se kad se žele postići veće brzine vrtnje.
- Zener dioda i dioda (vidi sliku) $U_{CEm} = U + U_D + U_z$, brzina smanjenja struje veća nego kod diode i otpornika (napon zener diode kao aktivni napon), disipacija energije na zener diodi i namotu faze.

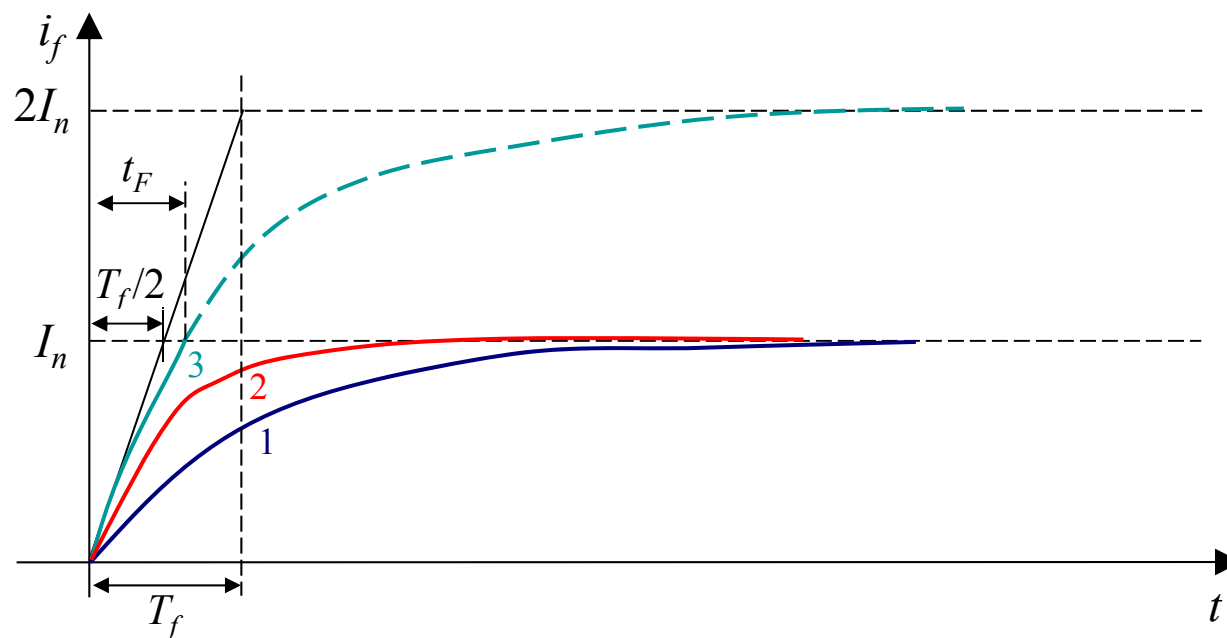


7.2.3. Metode povećanja brzine porasta struje

- Povećanjem brzine vrtnje, zbog djelovanja L_f i e , struja i moment motora se smanjuju ($i_f < I_n$, $M < M_0$).
- Povećanjem brzine porasta struje povećava se iznos struje i momenta motora na većim brzinama vrtnje.
- Metode povećanja brzine porasta struje
 - dodatni serijski otpor R_s ,
 - dvostruki napon napajanja (impulsno forsiranje struje),
 - regulacija struje faze.

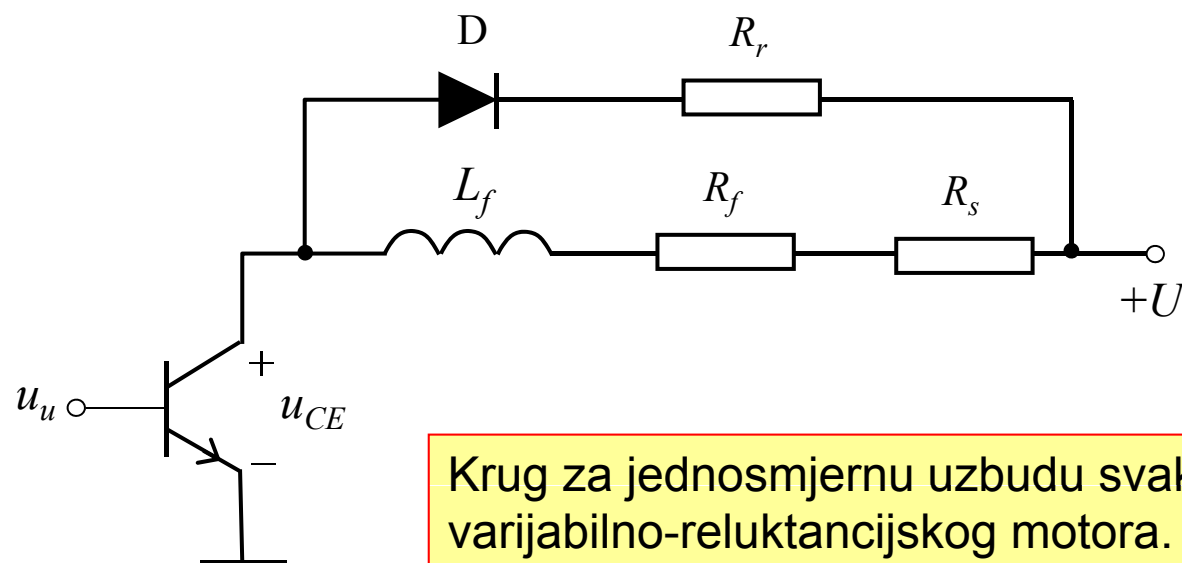
Dodatni serijski otpor

- Koeficijent forsiranja $k_F = (R_f + R_s)/R_f$.
- Napon napajanja $U = k_F U_n$.
- Vremenska konstanta $L_f/(R_f + R_s) = T_f/k_F$.
- Prijelazna pojava struje k_F puta brža.
- Nedostatak je velika disipacija snage na serijskom otporu – manji koeficijent korisnosti.



Dodatni serijski otpor

- Otpornik R_s služi za korekciju vremenske konstante.
- Kroz serijski spoj diode D i otpornika R_r se zatvara struja razgradnje magnetskog polja faznog svitka.
- U nastavku se ilustrira primjer dimenzioniranja komponenti kruga za jednosmjernu pobudu.



Krug za jednosmjernu uzbuđu svake faze varijabilno-reluktancijskog motora.

Primjer 1 – dimenzioniranje komponenti motora

Induktivitet po fazi trofaznog reluktantnog koračnog motora iznosi 60 mH, omska otpornost $R_f = 1\Omega$, a nazivna struja 1 A. Treba dimenzionirati komponente kruga za jednosmjernu uzбудu (unipolarno pojačalo) tako da električka vremenska konstanta pri ukapčanju bude 3 ms, a pri iskapčanju 1.5 ms. Motor se kreće brzinom od 300 [k/s] (koraka u sekundi).

Rješenje:

Za vremensku konstantu ukapčanja ukupna fazna otpornost iznosi:

$$R_{uf} = \frac{L_f}{T_{uk}} = \frac{0.06}{0.003} = 20\Omega.$$

Budući da je omska otpornost faznog svitka 1 Ω , slijedi da je korekcijski (dodatni serijski) otpor:

$$R_s = R_{uf} - R_f = 20 - 1 = 19\Omega.$$

Primjer 1

Korekcijski otpornik mora biti u stanju disipirati toplinu koja se na njemu razvija uz neprekidnu faznu uzбудu s nazivnom strujom od 1 A. Snaga korekcijskog otpornika zbog toga će iznositi:

$$P_s = I^2 R_s = 1 \cdot 19 = 19 \text{ W.}$$

Da bi kroz fazni svitak protekla nazivna struja od 1 A, napon energijskog izvora će biti:

$$U = I(R_f + R_s) = 1 \cdot 20 = 20 \text{ V.}$$

Na vremensku konstantu pri iskapčanju utječu induktivnost faze i omska otpornost cijelog strujnog kruga:

$$T_{isk} = \frac{L_f}{R_s + R_f + R_r}.$$

Primjer 1

Iz zadnjeg izraza slijedi:

$$R_r = \frac{L_f}{T_{isk}} - (R_f + R_s) = \frac{0.06}{0.0015} - 20 = 20 \Omega.$$

Snaga otpornika R_r ovisi o brzini kretanja motora. Najgori je slučaj kada struja uzbude dostiže svoju nazivnu vrijednost, a to je za zadanu brzinu od 300 k/s. Akumulirana energija u faznom svitku bit će:

$$E_m = L_f \frac{I^2}{2} = 0.03 \text{ J.}$$

Budući da pri tome na otpornik R_r otpada polovica ukupne otpornosti kruga, na njemu će se disipirati 0.015 J. Pri brzini od 300 k/s svaka od tri faze se pobudi 100 puta u sekundi.

Primjer 1

Na temelju navedenog ,otpronik R_r valja dimensionirati na snagu od:

$$P_r = 100 \cdot 0.015 = 1.5 \text{ W.}$$

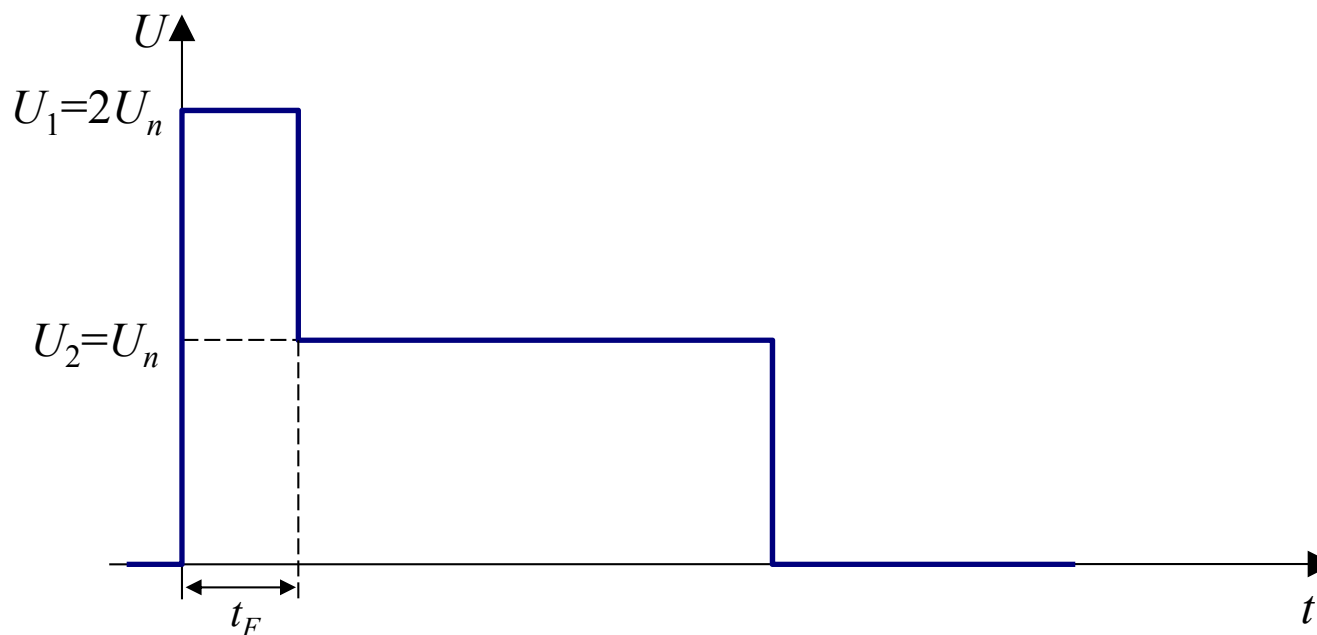
Dioda vezana u seriju s otpornikom R_r mora biti dimensionirana tako da u nepropusnom smjeru drži napon izvora od 20 V , a u propusnom vršnu vrijednost struje faze od 1 A.

Konačno, tranzistor mora propuštati nazivnu struju od 1 A, a između kolektora i emitera podnijeti napon od:

$$U_{CEm} = U + R_r I = 20 + 20 \cdot 1 = 40 \text{ V.}$$

Dvostruki napon napajanja

- Prijelazna pojava struje faze je brža nego kod dodatnog serijskog otpora uz isti iznos napona $U = 2U_n$.
- Isključenje napona U_1 i uključenje napona U_2 može se obaviti kada struja poprimi nominalnu vrijednost ili nakon vremena t_F .
- Nedostaci: potrebna su 2 izvora napajanja, na većim brzinama vrtnje napon $U_2 = U_n$ nije dovoljan za postizanje nominalne struje (zbog e i L_f) – napon U_2 može se koristiti samo kada motor stoji.

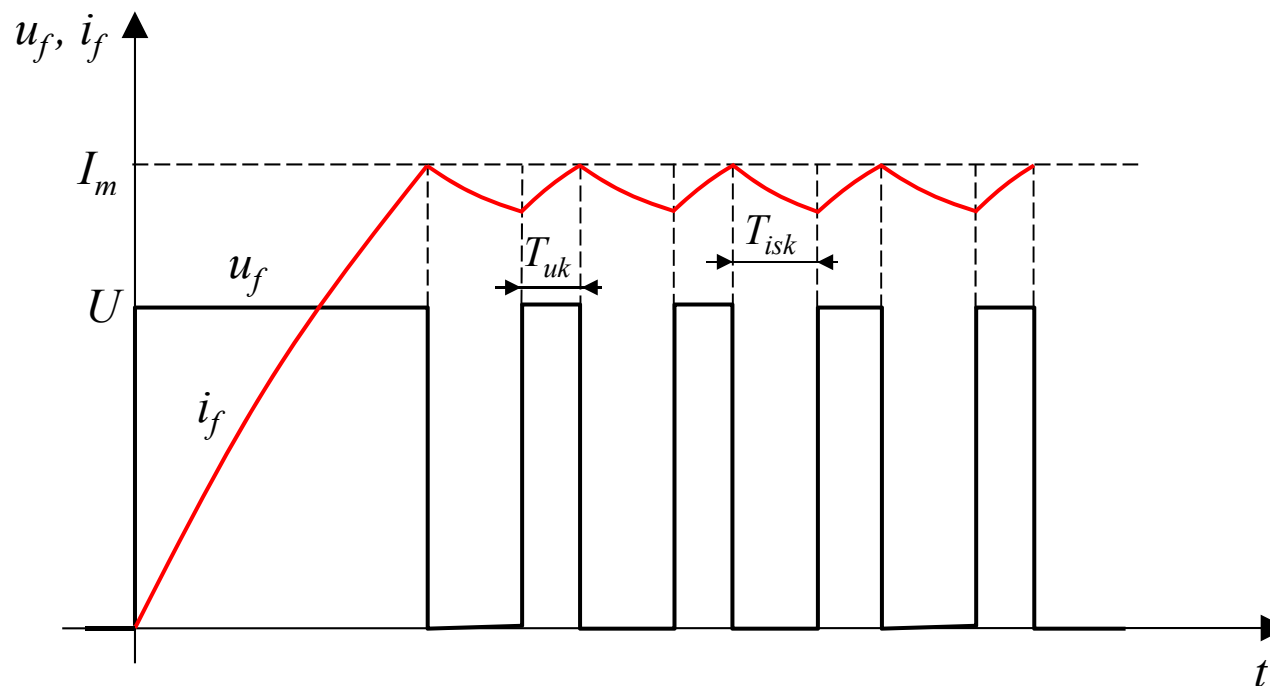


Regulacija struje faze

- Principi regulacije struje:
 - maksimalna vrijednost struje (konstantno vrijeme isključenja tranzistora),
 - srednja vrijednost struje (histerezni regulatori $\Delta I = I_m - I_{min}$, $I_n = (I_m + I_{min})/2$).
- Regulacija maksimalne struje je jednostavnija pa se više koristi za koračne motore – male snage → integrirani sklopovi.

Regulacija struje faze

- Vrijeme isključenja tranzistora T_{isk} je konstantno, ali se može podešavati.
- Vrijeme uključanja tranzistora T_{uk} ovisi o vremenskoj konstanti faze T_f i naponu U .
- Frekvencija oscilacija $f_o = 1/(T_{isk} + T_{uk}) \rightarrow$ područje vrijednosti 10-20 kHz.



Integrirani sklopovi za pojačala snage

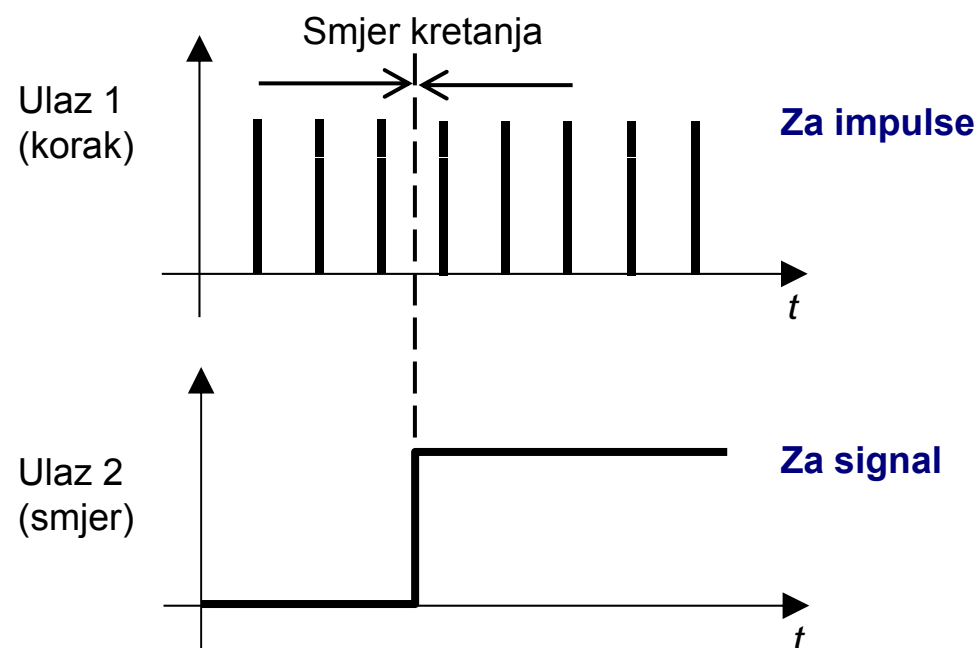
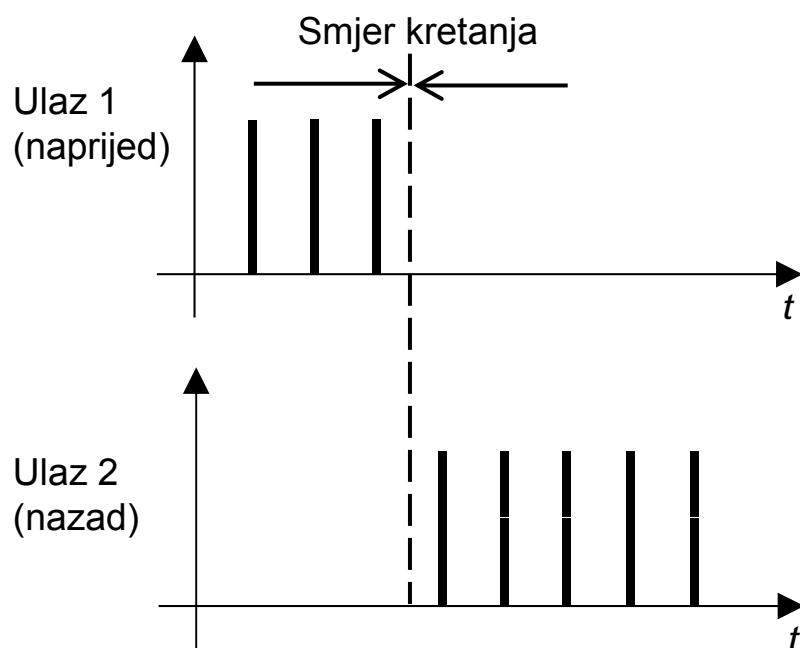
- **ULN 20xx, USN 20xx** – 7 Darlington pojačala i dioda
- **ULN 28xx, USN 28xx** – 8 Darlington pojačala i dioda
- $I_m = 0.5 \text{ A}$, $U_m = 50 \text{ V}$
- **PIC 900** - 4 Darlington pojačala i diode
- $I_m = 5 \text{ A}$, $U_m = 60, 80, 100 \text{ V}$ (mosni spoj za napajanje jedne faze koračnog motora)
- **L298** – 2 mosna spoja pojačala
- $I_m = 2 \text{ A}$, $U_m = 50 \text{ V}$ (napajanje dvije faze koračnog motora)

7.3. Kontroleri stanja faza

- Osnovni zadatak – pretvorba upravljačkih impulsa u višekanalni (prema broju faza) niz impulsa za pojačala snage.
- Zahtjevi:
 - formiranje niza impulsa uz minimalni broj elemenata,
 - rad u vrlo širokom području frekvencija, uključivo i mogućnost dugotrajnog pamćenja stanja,
 - mogućnost promjene smjera, u bilo kojem trenutku, bez gubitka informacije,
 - velika pouzdanost rada (izgubljena informacija može se nadoknaditi samo u pogonima s povratnom vezom položaja).

Kontroleri stanja faza

- Načini promjene stanja kretanja:
 - jedan ulaz za impulse “naprijed”, a drugi ulaz za impulse “natrag” – vidi sliku,
 - jedan ulaz za impulse koraka, a drugi ulaz za signal smjera – vidi sliku.



Kontroleri stanja faza

- Ovisno o ukupnom broju uključenih faza komutacija može biti:
 - **simetrična** (uključen uvijek isti broj faza),
 - **nesimetrična** (uključen različiti broj faza).
- Četverofazni koračni motor
 - **simetrične komutacije:**
 - ✓ uključena samo jedna faza,
 - ✓ uključene po dvije faze,
 - ✓ uključene po tri faze.
 - **nesimetrične komutacije:**
 - ✓ uključene maksimalno dvije faze,
 - ✓ uključene maksimalno tri faze.

Kontroleri stanja faza

- Kontroleri stanja faza mogu se napraviti pomoću:
 - reverzibilnog brojila,
 - posmačnog registra.
- Integrirane izvedbe kontrolera stanja faza

L297 omogućava:

- kontrolu stanja faza motora s unipolarnim napajanjem (4 faze),
- kontrolu stanja faza motora s bipolarnim napajanjem (2 faze),
- primjenu simetrične (FULL STEP) i nesimetrične (HALF STEP) komutacije.

PBL 3717 sadrži:

- kontroler stanja jedne faze,
- pojačalo snage (mosni spoj).

Kontroleri stanja faza

- Logičke ulaze I_0 , I_1 za regulaciju struje faze $(0; 0.2; 0.6; 1)I_n$
→ 8 mikrokoraka.
- Maksimalne vrijednosti napona i struje: $U_m = 45 \text{ V}$, $I_m = 1 \text{ A}$.

CY 500 namijenjen za upravljanje:

- četverofaznog unipolarno napajanog koračnog motora,
- dvofaznog bipolarno napajanog koračnog motora,
- čip ima mogućnosti:
 - generiranja programa (22 instrukcije),
 - generiranja funkcije zaleta i zaustavljanja,
 - kretanja s punim i pola koraka.

7.4. Upravljački uređaj

- Djeluje na pokazatelje kvalitete upravljanja pogonom:
 - maksimalna brzina,
 - tačnost pozicioniranja,
 - kvaliteta kretanja.
- Algoritmi upravljanja u otvorenoj petlji
 - zalet i zaustavljanje.
- Algoritmi zaleta u zatvorenoj petlji
 - P, PI, PID,
 - optimalni
 - maksimalna brzina kretanja – minimalno trajanje prijelazne pojave (pozicioniranja),
 - kvaliteta kretanja – minimalno nadvišenje (mikrokoračanje, prigušenje kretanja).

Upravljački uređaj

- Mikroračunar kao upravljački uređaj → integracija pogona i mikroračunala.
- Obavlja funkcije:
 - upravljačkog uređaja,
 - kontrolera stanja faza,
 - obrade signala davača impulsa,
 - regulacije struje faze.
- PLC kao upravljački uređaj
- Funkcijski moduli FM253 i FM353 za Simatic S7

Upravljački uređaj

- Rješenje sistema upravljanja dvoosnim slijednim sistemom s koračnim motorima.
- Zadatak – pakiranje gotovih proizvoda u kartonsku ambalažu.

