



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
Fakultet  
elektrotehnike i  
računarstva

/Zavod za  
elektrostrojarstvo i  
automatizaciju

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA  
ZAVOD ZA ELEKTROSTROJARSTVO I AUTOMATIZACIJU

## OSNOVE UPRAVLJANJA ELEKTRIČNIM STROJEVIMA

Laboratorijske vježbe

### Vježba 3

**Kompenzacija pada napona na otporu armature  
Rad istosmjernog stroja pri promjenjivom teretu**

Autori: Dr. sc. Filip Jukić  
Dr. sc. Luka Pravica  
Ivana Pavlić, mag. ing.  
Izv. prof. dr. sc. Martina Kutija

Zagreb, 2024.

# 1. Kompenzacija pada naponu na otporu armaturnog namota

## 1.1. Propad brzine vrtnje opterećenog istosmjernog stroja

Momentna karakteristika istosmjernog stroja s nezavisnom uzbudom definirana je pravcem u  $(M, \omega)$  ravnini:

$$\omega = \frac{U_a}{k_e \phi} - \frac{R_a}{k_m k_e \phi^2} M_{em}. \quad (1.1)$$

Prema (1.1) neopterećeni istosmjerni stroj u idealnom praznom hodu ( $M_{em} = 0$ ) uz narinuti armaturni napon  $U_a$  vrti se brzinom praznog hoda:

$$\omega_0 = \frac{U_a}{k_e \phi}. \quad (1.2)$$

Oduzmu li se izrazi za brzinu praznog hoda (1.2) i momentnu karakteristiku (1.1), dobiva se izraz za propad brzine vrtnje istosmjernog stroja uslijed opterećenja:

$$\Delta\omega = -\frac{R_a}{k_m k_e \phi^2} M_{em}. \quad (1.3)$$

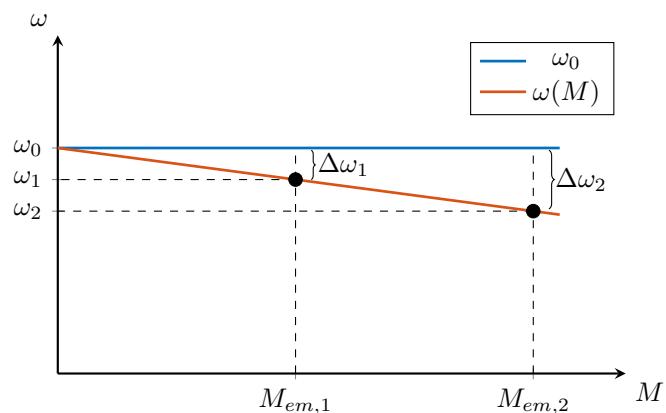
Na slici 1.1 prikazane su brzina praznog hoda i momentna karakteristika istosmjernog stroja za isti armaturni napon  $U_a$ . S obzirom da je propad brzine  $\Delta\omega$  proporcionalan opterećenju, tj. elektromagnetskom momentu  $M_{em}$ , očito je da će porast opterećenja uzrokovati veći propad brzine ( $\Delta\omega_2 > \Delta\omega_1$ )

Budući da je održavanje željene brzine vrtnje neovisno o opterećenju očekivani zahtjev u reguliranim pogonima, ovakvo ponašanje opterećenog istosmjernog stroja nije poželjno. Iz tog razloga se u reguliranim pogonima koriste različite metode upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog stroja koje se mogu podijeliti na:

- 1) metode u otvorenoj petlji,
- 2) metode u zatvorenoj petlji.

Metode u zatvorenoj petlji su složenije, imaju veću točnost i zahtijevaju dodatne komponente (npr. PI regulator brzine vrtnje s mjernim članom brzine), dok se metode u otvorenoj petlji zbog svoje jedostavnosti koriste u primjenama s nižim zahtjevima na točnost.

Jedna od često korištenih metoda upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog stroja **u otvorenoj petlji** je upravljanje u otvorenoj petlji s kompenzacijom pada naponu na otporu armaturnog kruga – **IR kompenzacija**.



Slika 1.1: Propad brzine vrtnje istosmjernog stroja s nezavisnom uzbudom prilikom terećenja

## 1.2. IR kompenzacija

Na slici 1.2a prikazana je struktura upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog stroja u otvorenoj petlji bez IR kompenzacije. Referentni armaturni napon  $U_{a,ref}$  računa se iz željene referentne vrijednosti brzine vrtnje  $\omega_{ref}$  pomoću izraza za brzinu vrtnje praznog hoda (1.2). Kako bi se na armaturni namot primijenio referentni napon  $U_{a,ref}$  potrebno je izračunati okidni kut tiristorskog usmjerivača  $\alpha$  koristeći izraz za izlazni napon usmjerivača:

$$U_a = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha, \quad (1.4)$$

gdje je

$U_m$  – vršna vrijednost mrežnog napona,  $\alpha$  – okidni kut tiristora.

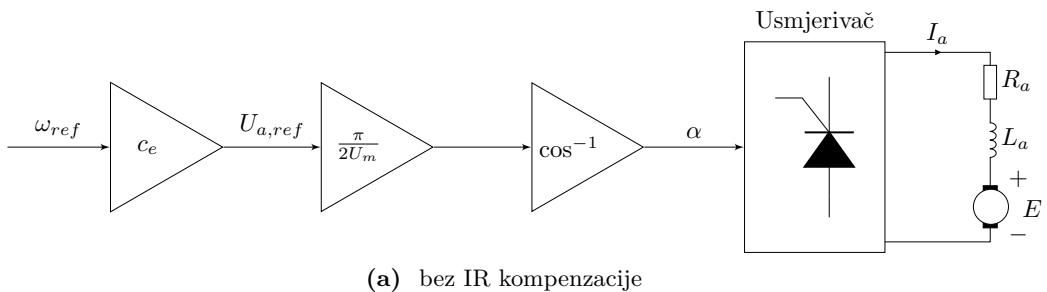
Okidni kut  $\alpha$  može se izračunati iz (1.4):

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{U_{a,ref}\pi}{2U_m} \right). \quad (1.5)$$

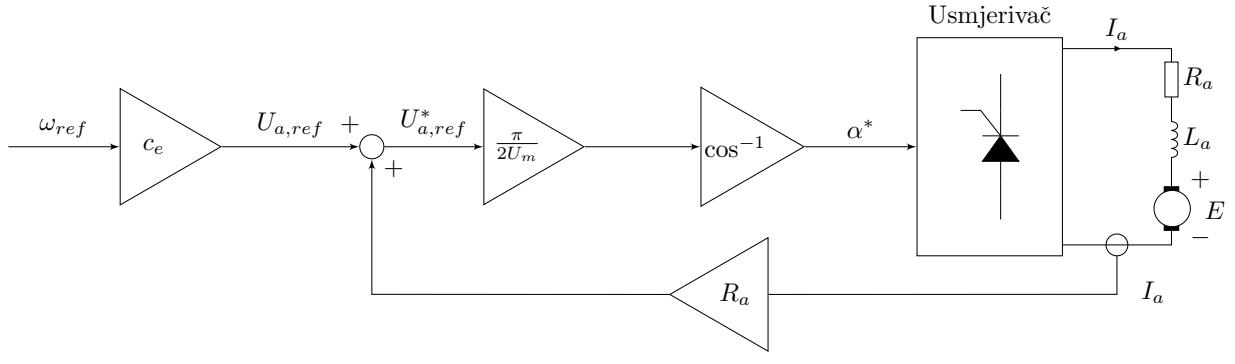
Ako se koristi prethodno opisana struktura upravljanja, prilikom opterećenja istosmjernog stroja doći će do propada brzine vrtnje  $\Delta\omega$  određenog izrazom (1.3) i prikazanog na slici 1.1.

Kako bi se izbjegao propad brzine vrtnje uslijed opterećenja u otvorenoj petlji, koristi se upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog stroja s IR kompenzacijom kako je prikazano na slici 1.2b. U ovoj metodi referentni armaturni napon  $U_{a,ref}$  se također računa iz željene referentne vrijednosti brzine vrtnje  $\omega_{ref}$  pomoću izraza za brzinu vrtnje praznog hoda (1.2). Međutim, tako izračunatom referentnom armaturnom naponu pridodaje se pad napona na armaturnom otporu koji se određuje kao umnožak mjerene armaturne struje  $I_a$  i armaturnog otpora  $R_a$ . Na taj način dobiva se kompenzirani referentni armaturni napon:

$$U_{a,ref}^* = U_{a,ref} + R_a I_a. \quad (1.6)$$

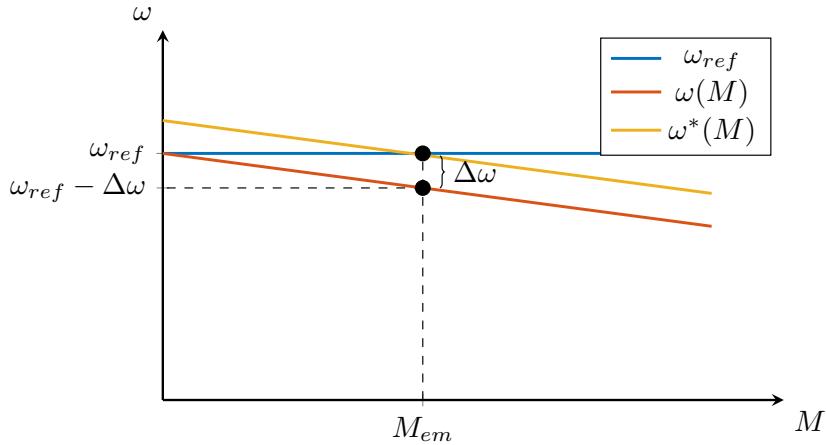


(a) bez IR kompenzacije



(b) s IR kompenzacijom

Slika 1.2: Upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog stroja u otvorenoj petlji



**Slika 1.3:** Radne točke pri opterećenju istosmjernog stroja upravljanog u otvorenoj petlji bez i s IR kompenzacijom

Ako se kompenzirani referentni armaturni napon  $U_{a,ref}^*$  uvrsti u izraz za momentnu karakteristiku istosmjernog stroja (1.1) i u izraz za brzinu praznog hoda (1.2) te se njih dvoje oduzmu, dobiva se da je u tom slučaju propad brzine vrtnje  $\Delta\omega = 0$ . Armaturni krug napaja se kompenziranim armaturnim naponom  $U_{a,ref}^*$  primjenom kompenziranog kuta upravljanja  $\alpha^*$ :

$$\alpha^* = \cos^{-1} \left( \frac{U_{a,ref}^* \pi}{2U_m} \right). \quad (1.7)$$

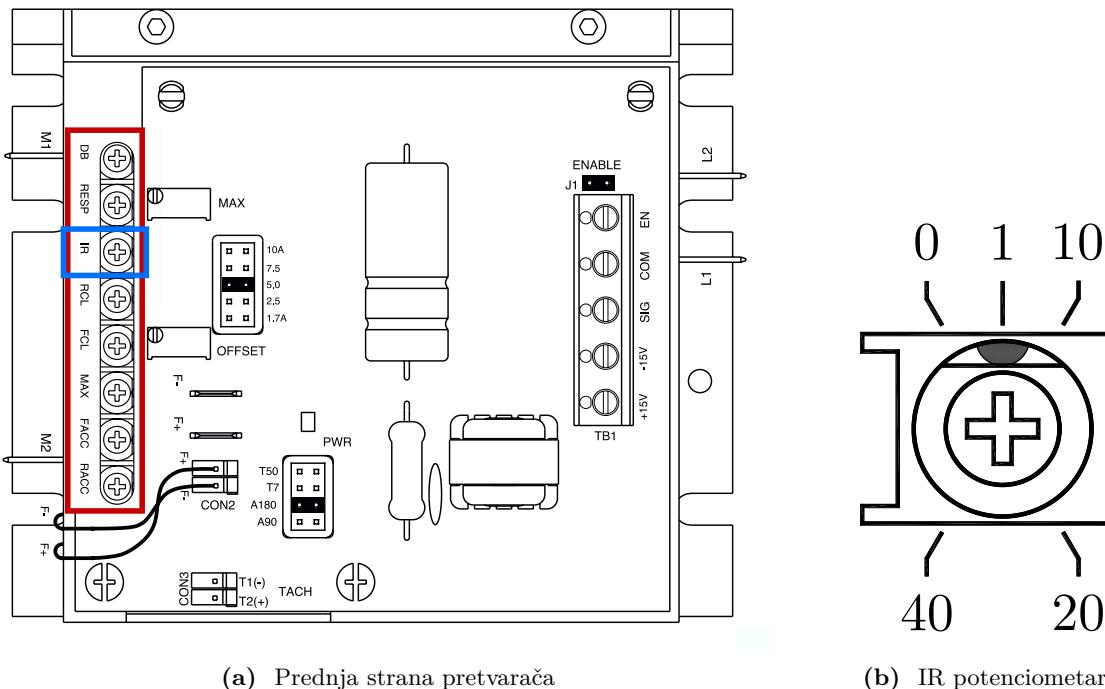
Na slici 1.3 prikazane su momentne karakteristike istosmjernog stroja upravljanog u otvorenoj petlji bez i s IR kompenzacijom,  $\omega(M)$  i  $\omega^*(M)$ . Ako se koristi struktura upravljanja bez IR kompenzacije, referentni armaturni napon  $U_{a,ref}$  se određuje iz referentne vrijednosti brzine vrtnje  $\omega_{ref}$  prema (1.2). Referentni armaturni napon  $U_{a,ref}$  definira momentnu karakteristiku  $\omega(M)$ . Terećenjem istosmjernog stroja pogon dolazi u radnu točku definiranu sjecištem elektromagnetskog momenta  $M_{em}$  koji stroj mora razviti da bi pokrio moment tereta te gubitke trenja i ventilacije i momentne karakteristike stroja  $\omega(M_{em})$ . Očito je da je u toj radnoj točki brzina vrtnje manja od referentne,  $\omega = \omega_{ref} - \Delta\omega$ , što je posljedica propada brzine vrtnje opterećenog istosmjernog stroja definiranog izrazom (1.3).

Primjenom upravljanja u otvorenoj petlji s IR kompenzacijom za istu referentnu vrijednost brzine vrtnje  $\omega_{ref}$ , referentni armaturni napon  $U_{a,ref}^*$  je veći za iznos pada napona na otporu armature ( $R_a \cdot I_a$ ). Budući da se porastom armaturnog napona momentna karakteristika pomiče prema gore, dobiva se nova momentna karakteristika  $\omega^*(M)$ . U novoj radnoj točki definiranoj sjecištem istog elektromagnetskog momenta  $M_{em}$  (uz prepostavku da je moment trenja i ventilacije konstantan) i nove momentne karakteristike  $\omega^*(M)$ , istosmjerni stroj vrati se brzinom koja je jednaka referentnoj brzini vrtnje  $\omega_{ref}$ .

### 1.3. Podešavanje IR kompenzacije

Na slici 1.4a prikazana je prednja strana pretvarača *Baldor BC204* na kojoj se nalaze različiti kratkospojnici i potenciometri pomoću kojih je moguće mijenjati određene postavke pretvarača. U crvenom pravokutniku nalazi se grupa od osam potenciometara za podešavanje postavki istosmjernog stroja kao što su vrijeme uzlazne i silazne rampe, maksimalna brzina i sl. Plavim pravkutnikom označen je potenciometar IR koji koristi se za podešenje IR kompenzacije. Ovisno o položaju potenciometra, IR kompenzacija se mijenja od 0 do 40V, a tvornička postavka IR kompenzacije iznosi 10V. Na slici 1.4b prikazan je IR potenciometar s označenim vrijednostima napona u ovisnosti o položaju potenciometra.

Kratkospojnikom J4 na pretvaraču *Baldor BC204* podešena je bazna struja tako da odgovara nazivnoj struci motora s kojim upravlja (5 A). Ta postavka utječe na skaliranje vrijednosti s potenciometara za podešenje dozvoljenih iznosa pozitivnih i negativnih struja u preopterećenju ali i potenciometra IR kompenzacije. Kada pretvarač izmjeri struju armaturnog kruga jednaku podešenoj baznoj struci, tada će pretvarač kompenzirati armaturni napon za onaj iznos koji je podešen na IR potenciometru. Ako pretvarač mjeri struju koja se razlikuje od podešene bazne struje, tada će pretvarač kompenzirati armaturni napon za iznos koji je jednak omjeru mjerene i bazne struje pomnožene s vrijednosti koja je podešena na IR potenciometru. Odnosno, podešenjem IR potenciometra se neposredno podešava vrijednost armaturnog otpora za koji pretvarač treba izvršiti kompenzaciju pada napona.

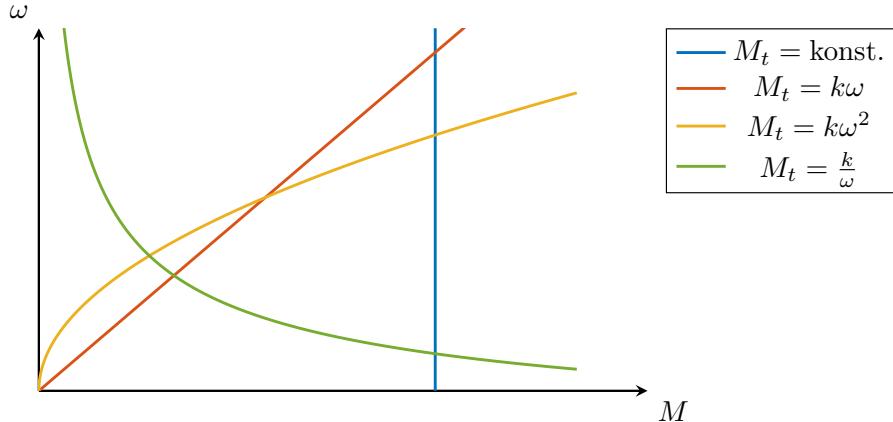


Slika 1.4: Pretvarač *Baldor BC204*

## 2. Karakteristike tereta

Tereti priključeni na osovinu istosmjernog stroja mogu imati različite karakteristike. Momentne karakteristike tereta su najčešće funkcije brzine vrtnje  $M_t(\omega)$ , a mogu biti i neovisne o brzini (konstantni tereti). Na temelju ovisnosti o brzini vrtnje, karakteristike tereta se mogu podijeliti na (slika 2.1):

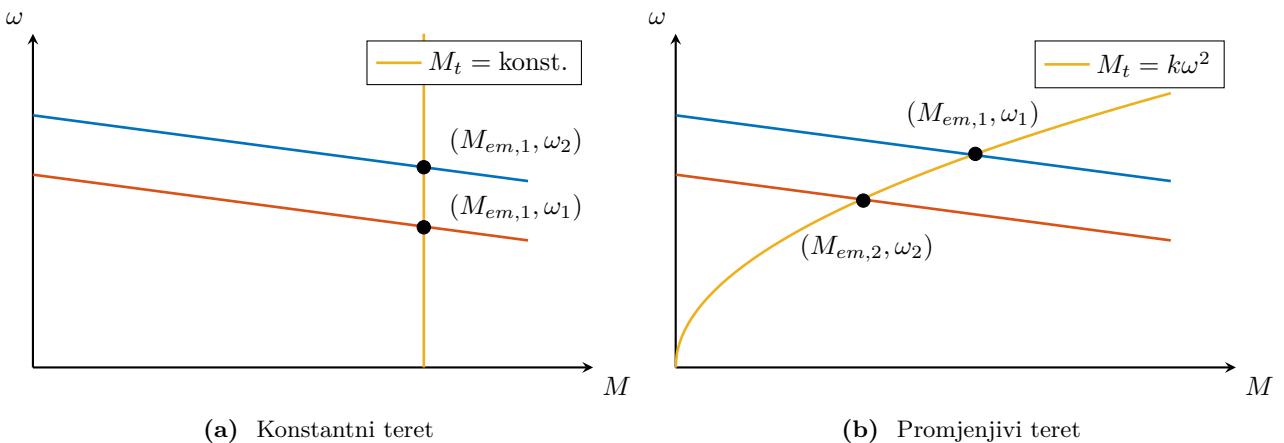
- 1) konstantne,  $M_t = \text{konst.} \rightarrow$  dizala, valjački stanovi,
- 2) linearne,  $M_t = k\omega \rightarrow$  motalica papira,
- 3) kvadratne,  $M_t = k\omega^2 \rightarrow$  centrifugalne pumpe, kompresori i ventilatori,
- 4)  $M_t = \frac{k}{\omega}$  → namatači žice.



Slika 2.1: Različite karakteristike momenta tereta

Na slici 2.2 prikazane su radne točke istosmjernog stroja za različite napone armature pri konstantom i promjenjivom opterećenju. Za promjenjivi teret odabran je teret ovisan o kvadratu brzine vrtnje budući da opisuje pumpe i ventilatore koji se često upotrebljavaju.

Kada se istosmjerni stroj tereti momentom konstantnog iznosa  $M_t = \text{konst.}$ , razvijeni elektromagnetski moment istosmjernog stroja  $M_{em}$  također je konstantan neovisno o promjeni brzine vrtnje (slika 2.2a). Razlika pri terećenju istosmjernog stroja teretom ovisnim o brzini vrtnje, kao što je slučaj prikazan na slici 2.2b, u odnosu na konstantni teret je što uslijed promjene brzine vrtnje dolazi i do promjene momenta tereta, tj. opterećenja istosmjernog stroja.



Slika 2.2: Radne točke istosmjernog stroja pri konstantnom i promjenjivom opterećenju