

KATEDRA ENERGETYKI

Laboratorium Elektrotechniki

Temat ćwiczenia:

***UKŁAD REGULACJI PRĘDKOŚCI
SILNIKA PRĄDU STAŁEGO
(LEONARD TYRYSTOROWY)***

I. WSTĘP TEORETYCZNY

1. Charakterystyki mechaniczne silnika obcowzbudnego

Układy regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego wykorzystują podstawowe zalety silników prądu stałego, a mianowicie:

- możliwość nastawiania prędkości obrotowej w bardzo szerokim zakresie,
- duży moment obrotowy przy rozruchu,
- duża przeciążalność momentem obrotowym oraz prądem,
- szerokie możliwości kształtowania charakterystyki mechanicznej $n = f(M)$,
- możliwość pracy ze zmianą kierunku wirowania oraz zmianą kierunku przetwarzania energii.

Prędkość obrotowa silnika prądu stałego jest wyrażona wzorem:

$$n = \frac{U - I_t(R_{tc} + R_d)}{k \cdot \Phi}$$

gdzie: U - napięcie na zaciskach twornika

I_t - prąd twornika

R_{tc} - rezystancja całkowita twornika

R_d - rezystancja dodatkowa w obwodzie twornika

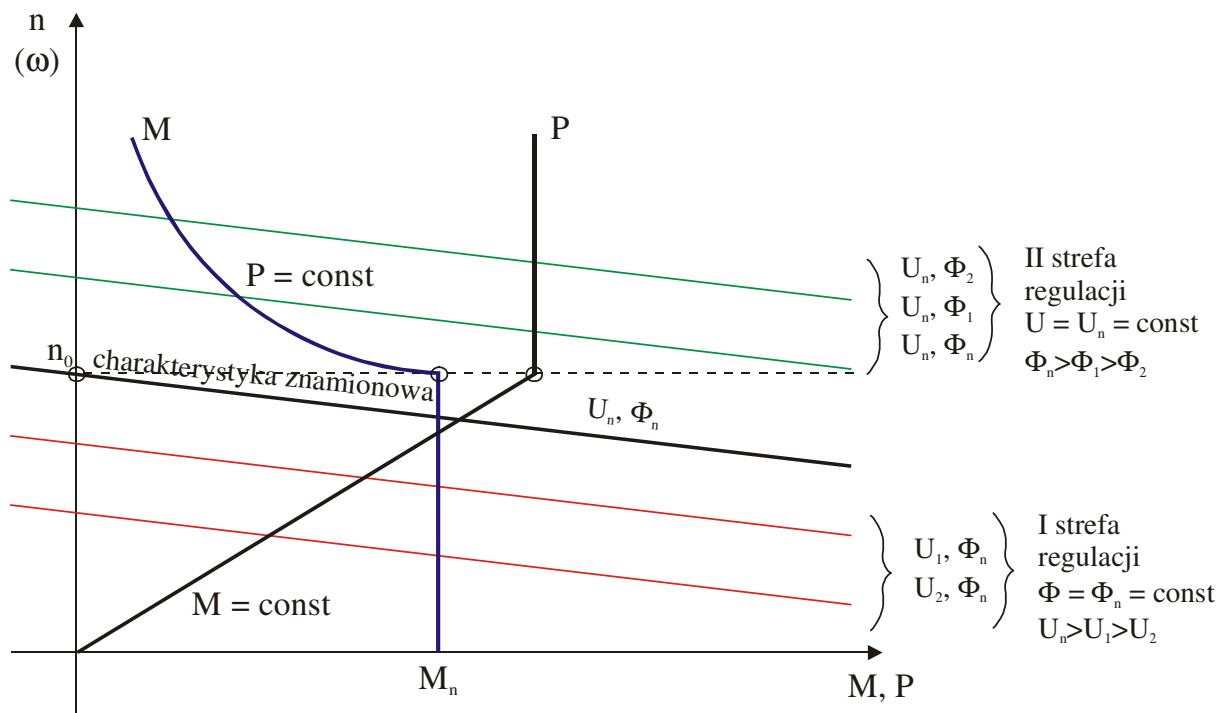
ϕ - strumień magnetyczny obwodu wzbudzenia

k - stała konstrukcyjna silnika

Regulacja prędkości to wymuszone zmiany prędkości obrotowej uzyskane przez oddziaływanie na parametry obwodu wzbudzenia i obwodu twornika lub jego układu zasilania. Prędkość obrotową można nastawić oraz regulować za pomocą napięcia twornika U , zewnętrznej rezystancji R_d w obwodzie twornika oraz strumienia magnetycznego ϕ . Najczęściej stosuje się regulację prędkości za pomocą zmiany napięcia na zaciskach twornika i strumienia magnetycznego w obwodzie wzbudzenia. Charakterystyki mechaniczne silnika przy obu wymienionych sposobach regulacji przedstawiono na rys.1. Przy regulacji wartości napięcia twornika U , można obciążyć silnik długotrwale momentem znamionowym. Jeśli moment i prąd twornika pozostają stałe przy zmianie prędkości ($\phi = \phi_n$), $M = k \cdot \phi \cdot I_t$, to moc rośnie liniowo wraz ze wzrostem prędkości:

$$P = \omega \cdot M.$$

Jest to pierwsza strefa regulacji, określona jako regulacja przy stałym momencie ($\omega < \omega_n$).



Rys.1. Charakterystyki mechaniczne silnika obcowzbudnego w I i II strefie regulacji

Uzyskuje się to zmniejszając napięcie U zasilające twornik. Prędkość $\omega > \omega_n$ można uzyskać osłabiając strumień magnetyczny przy utrzymaniu stałej wartości napięcia zasilania $U = U_n$. Jeśli utrzymana zostanie dopuszczalna wartość natężenia prądu obciążenia $I_l = \text{const.}$, to uzyskuje się stałą moc $P = \text{const}$, natomiast moment graniczny zmniejsza się hiperbolicznie.

$$M = \frac{P}{\omega}$$

Jest to II strefa regulacji, tzw. regulacja przy stałej mocy.

Przy wyborze sposobu regulacji prędkości silnika powinny być brane pod uwagę następujące kryteria:

- zakres regulacji,
- płynność regulacji,
- stabilność pracy przy danej prędkości,
- dopuszczalne obciążenie silnika przy danym zakresie regulacji,
- ekonomiczność regulacji.

Zakres regulacji określa współczynnik, przy obciążeniu znamionowym silnika.

$$k_r = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}$$

Płynność regulacji określa stosunek prędkości na sąsiednich stopniach regulacji $\frac{\omega_n}{\omega_{n-1}}$.

Stabilność pracy zależy przede wszystkim od sztywności charakterystyki mechanicznej silnika.

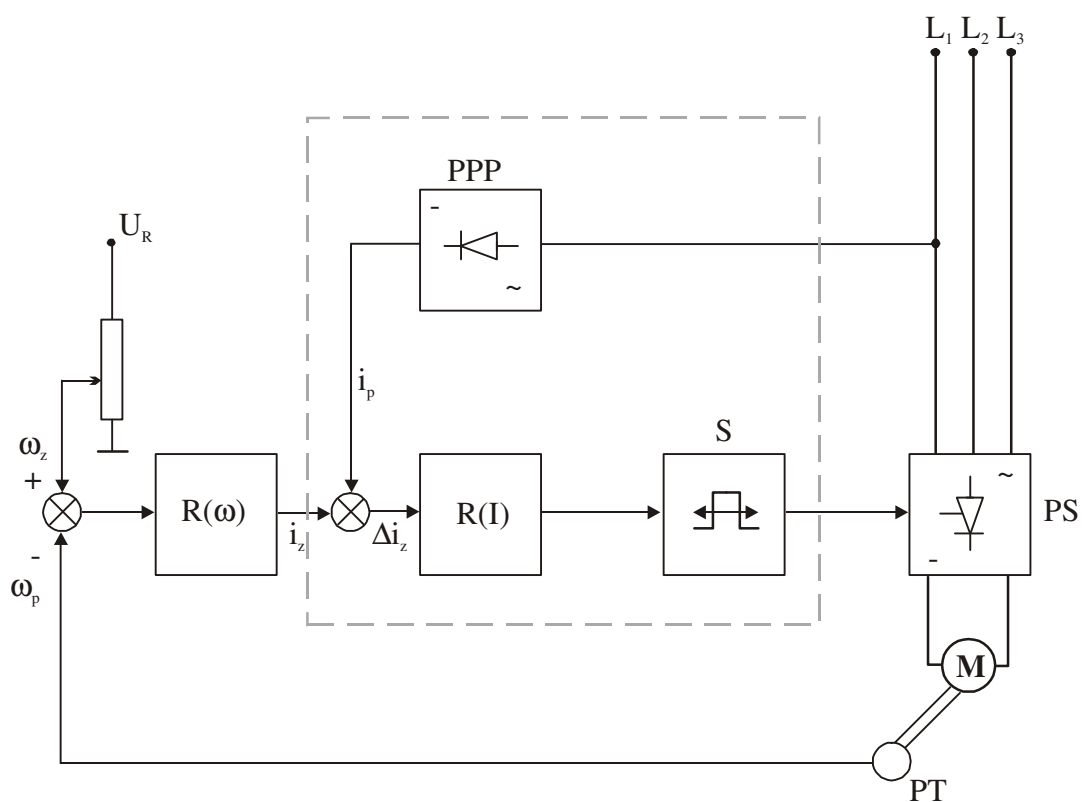
Dopuszczalne obciążenie silnika zależy od rodzaju i zakresu regulacji oraz sposobu chłodzenia silnika, gdyż nagrzewanie się maszyny jest głównym czynnikiem ograniczającym obciążenie silnika.

Kryterium ekonomiczności powinno uwzględniać nie tylko straty energii spowodowane regulacją, ale także koszt układu regulacyjnego.

2. Układ regulacji prędkości

Układy półprzewodnikowe umożliwiają bezstopniową regulację i stabilizację prędkości silników. Stosuje się układy umożliwiające jeden lub dwa kierunki wirowania z obwodem prędkościowego sprzężenia zwrotnego i obwodem pętli sprzężenia prądowego.

Na rys.2 przedstawiono jednokierunkowy układ regulacji prędkości obcowzbudnego silnika prądu stałego.



Rys. 2. Jednokierunkowy układ regulacji prędkości

- PPP - prostownik pomiaru prądu
- $R(\omega)$ - regulator prędkości
- $R(I)$ - regulator prądu
- PT - prądniczka tachometryczna
- PS - prostownik sterowany
- S - sterownik tyrystorów (układ wyzwalania tyrystorów)

Pętla prądowa (zakreślona linią przerywaną) decyduje o przebiegu prądu twornika silnika w stanach pracy dynamicznej (np. rozruch, hamowanie).

Z regulatora prędkości $R(\omega)$ przychodzi na wejście regulatora prądu $R(I)$ sygnał prądu zadanego i_z , który powoduje zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika sterowanego PS.

Po zakończeniu rozruchu sterowanie pracą prostownika sterowanego przyjmuje regulator prędkości kątowej $R(\omega)$, odpowiedzialny za stabilizację prędkości. W stanie pracy ustalonej sygnał prędkości zadanej ω_z jest porównywany z sygnałem prędkości mierzonej ω_p (napięcie prądu stałego z prądniczki tachometrycznej – PT).

Sygnał uchybu prędkości $\Delta\omega$ powoduje wysterowanie wzmacniacza prędkości w taki sposób, aby prędkość kątowa silnika była równa prędkości zadanej. Charakterystyki mechaniczne układu na poszczególnych poziomach prędkości są sztywne i praktycznie pozbawione uchybu statycznego ($\omega_z - \omega_p = 0$). Sztywność charakterystyki określa względny spadek prędkości kątowej $\Delta\omega[\%]$ przy zmianie momentu od wartości $M = 0$ do $M = M_n$:

$$\Delta \omega = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} \cdot 100 \%$$

gdzie: ω_0 - prędkość idealnego biegu jałowego [rad/s]

ω_n - prędkość znamionowa [rad/s]

Charakterystyka jest sztywna, gdy $\Delta\omega \leq 10\%$.

3. Stałe czasowe układu regulacji

W stanie ustalonym wielkości charakteryzujące pracę silnika, takie jak I_b , ω , M , mają wartości stałe.

W stanach dynamicznych (rozruch, hamowanie) jest potrzebny określony czas na osiągnięcie wartości ustalonych, dotyczy to również reakcji silnika na zakłócenia parametrów układu zasilania czy zmiany obciążenia silnika.

Pracę silnika w stanie dynamicznym określają równania:

$$U = e + R_{ic} \cdot i + L_r \frac{di}{dt}$$

$$M = M_0 + J \frac{d\omega}{dt}$$

gdzie:

M_0 - moment początkowy

e - wartość chwilowa siły elektromotorycznej [V]

i - wartość chwilowa prądu twornika [A]

L_r - indukcyjność obwodu twornika [H]

J - moment bezwładności [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

Przyjmuje się niezmienność parametrów: U , R_{ic} , ϕ , M_0 .

Własności dynamiczne silnika charakteryzują wyznaczone z pomiarów następujące stałe czasowe:

- mechaniczna T_M
- elektromechaniczna T_{EM}
- elektromagnetyczna T_E

- cieplna T_a
- obwodu wzbudzenia T_f

Własności dynamiczne charakteryzuje również współczynnik wzmocnienia obwodu wirnika

$$k_E = \frac{I_n \cdot R_r}{U_n}$$

Współczynnik ten można przedstawić jako wartość względną rezystancji twornika R_r odniesioną do rezystancji znamionowej R_n .

$$k_E = \frac{R_r}{R_n}$$

Znając wartość tego współczynnika wyznacza się elektromechaniczną stałą czasową.

$$T_{EM} = T_M \cdot k_E$$

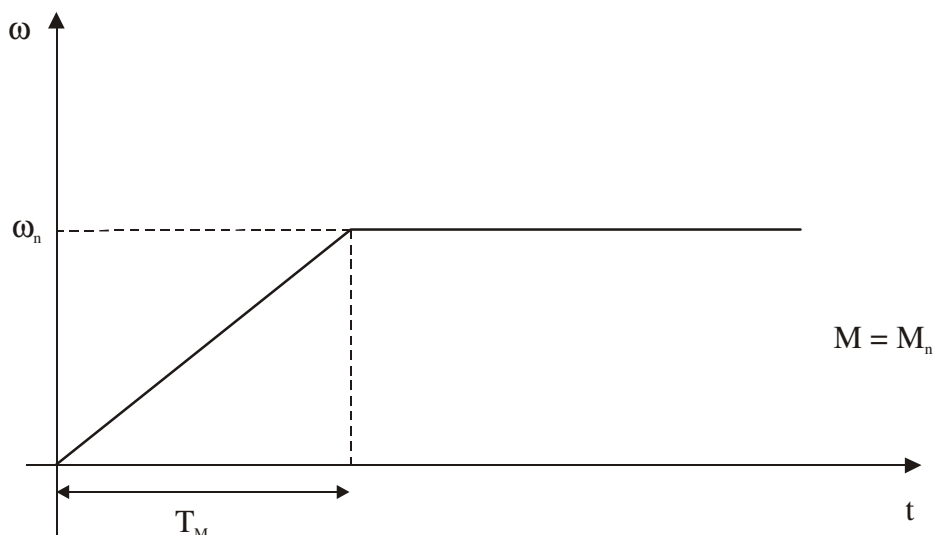
Stałą mechaniczną określa się ze wzoru:

$$T_M = \frac{J_s \cdot \omega_n}{M_n}$$

gdzie:

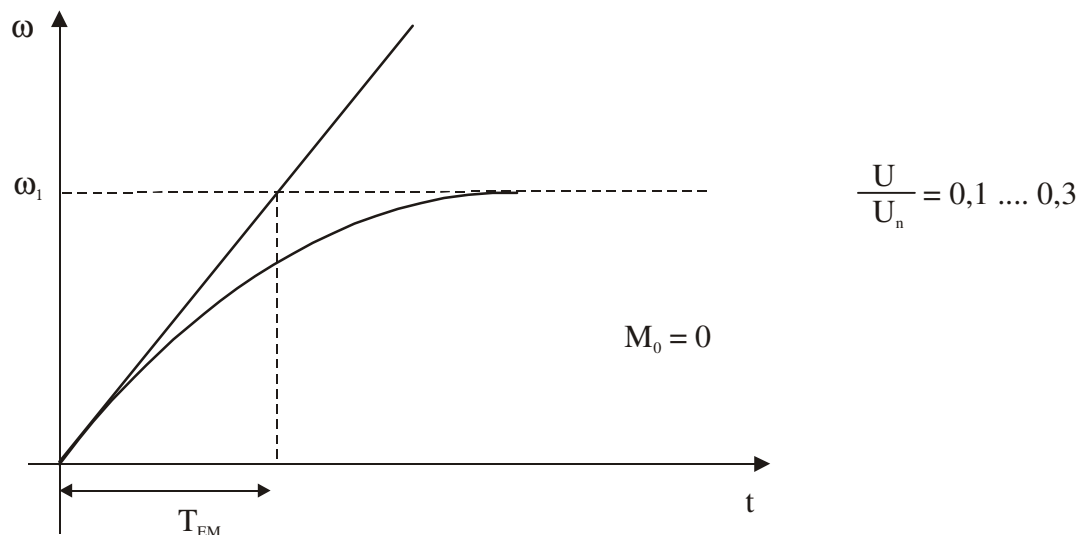
- J_s - moment bezładności silnika [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
- ω_n - znamionowa prędkość kątowna [rad/s]
- M_n - moment znamionowy [$\text{N} \cdot \text{m}$]

Mechaniczna stała czasowa odpowiada czasowi rozruchu działania silnika przy biegu jałowym, gdy podczas rozruchu działa moment przyspieszający równy momentowi znamionowemu (rys.3).



Rys. 3. Sposób określania mechanicznej stałe czasowej T_M .

Elektromechaniczną stałą czasową T_{EM} wyznacza się z przebiegu prędkości kątownej silnika po skokowo przyłożonym napięciu na zaciski twornika.



Rys. 4. Sposób wyznaczania stałej elektromechanicznej silnika

Elektromagnetyczna stała czasowa T_E wyrażona jest równaniem:

$$T_E = \frac{L_r}{R_r}$$

gdzie :

L_r - indukcyjność obwodu twornika [H]

R_r - rezystancja twornika [Ω]

Stałą czasową obwodu wzbudzenia można wyznaczyć z zależności:

$$T_f = \frac{L_f}{R_f}$$

gdzie :

L_f - indukcyjność obwodu wzbudzenia [H]

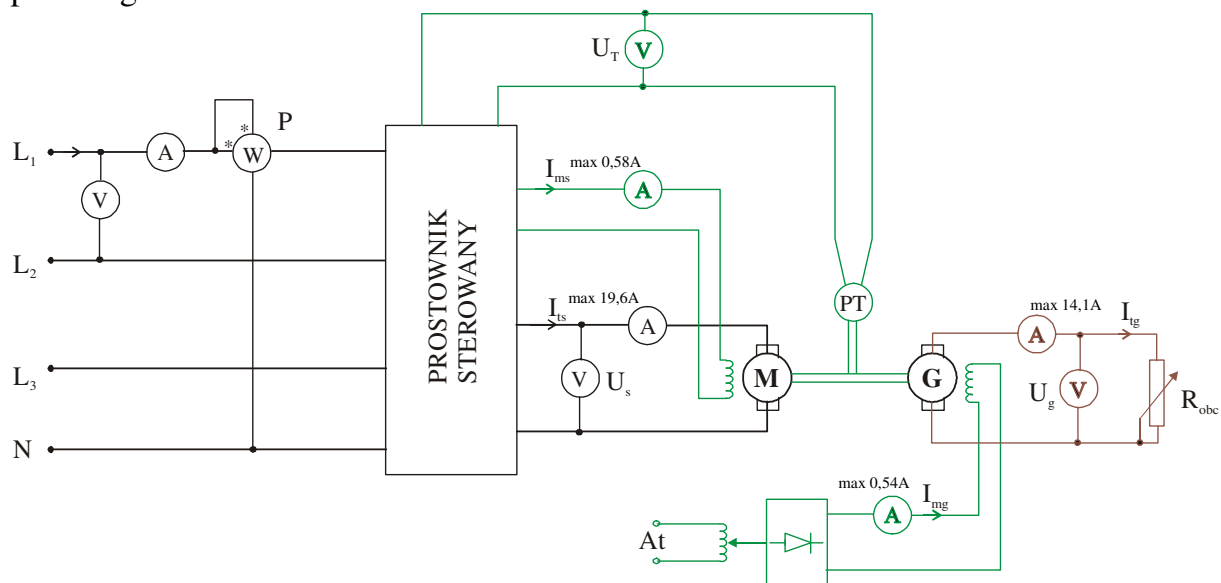
R_f - rezystancja obwodu wzbudzenia [Ω]

Ze względu na większą indukcyjność obwodu wzbudzenia stała T_f osiąga na ogół znacznie większe wartości niż stała T_E .

Znajomość stałych czasowych i współczynnika k_E umożliwia określenie odpowiedzi silnika na skok obciążenia lub regulację natężenia prądu wzbudzenia oraz określenie przebiegu prądu twornika I i prędkości kątowej ω w miarę dochodzenia do prędkości ustalonej.

II. PRZEBIEG ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO

1. Przeanalizować układ połączeń przedstawiony na rys.1 i określić wielkości mierzone przez poszczególne mierniki.



Rys.1. Schemat układu regulacji prędkości silnika prądu stałego

2. Parametry poszczególnych charakterystyk mechanicznych silnika określa prowadzący
 - a) charakterystyka naturalna, $U_s = U_{sn}$, $I_{ms} = I_{msn}$
 $U_s = 220V$ $I_{ms} = 0,58A$
 - b) charakterystyki przy obniżonym napięciu, $I_{ms} = \text{const.}$
 $U_s = 160V$ $I_{ms} = 0,58A$
 $U_s = 100V$ $I_{ms} = 0,58A$
 - c) charakterystyki przy obniżonym strumieniu, $U_s = \text{const.}$
 $U_s = 220$ $I_{ms} = 0,40A$
 $U_s = 220$ $I_{ms} = 0,30A$
3. Za pomocą autotransformatora ustawić wartość prądu wzbudzenia prądnicy $I_{mg} = 0,3A$. Regulatorem prądu wzbudzenia silnika w prostowniku sterowanym ustawić wymaganą wartość I_{ms} . Regulatorem napięcia twornika silnika w prostowniku sterowanym ustawić wymaganą wartość U_s .
4. Zmierzyć i zanotować w tabeli 1 wartości wskazywane przez mierniki układu. Pomiary wykonać dla różnych wartości rezystancji obciążenia R_{obc} (5 – 6 wartości R_{obc})
5. Obliczyć moment obrotowy na wale silnika M oraz prędkość obrotową silnika n wykorzystując zależności:

$$M = c \cdot I_{tg} \cdot \frac{I_{mg}}{I_{mg n}} \quad [N \cdot m] , \quad \text{gdzie } c = 1,31 \left[\frac{N \cdot m}{A} \right] , \quad I_{mg n} = 0,54 A$$

$$n = c_T \cdot U_T \left[\frac{\text{obr}}{\text{min}} \right], \text{ gdzie } c_T = 25 \left[\frac{\text{o b r}}{\text{V}} \right]$$

6. Obliczyć sprawność silnika z zależności:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

gdzie:

$P_1 = 3 \cdot P$ [W] – moc pobierana z sieci

$P_2 = M \cdot \omega$ [W] – moc na wale silnika

$$\omega = \frac{\Pi n}{30} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

7. Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystyki mechaniczne $n = f(M)$ określone w punkcie 2.

8. Przedstawić wnioski końcowe

Tabela pomiarowa

Lp	P	U _S	I _{ts}	I _{ms}	U _g	I _{tg}	I _{mg}	U _t	n	M	ω	P ₂	η
	[W]	[V]	[A]	[A]	[V]	[A]	[A]	[V]	[obr/min]	N·m	rad/s	W	-
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													