

Ćwiczenie 2

Układ napędowy z silnikiem szeregowym prądu stałego w różnych stanach pracy

2.1. Program ćwiczenia

1. Pomiar charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ dla przypadków:
 - a) $U = U_N$, $R_d = 0$ (charakterystyka naturalna),
 - b) $U = \text{par}$, $R_d = 0$,
 - c) $U = U_N$, $R_d = \text{par}$ (par – parametr),
 - d) $U = U_N$, $R_{bt} = \text{par}$ (R_{bt} – rezystancja bocznikująca twornik),
 - e) $U = U_N$, $R_{bw} = \text{par}$ (R_{bw} – rezystancja bocznikująca wzbudzenie).
2. Pomiar charakterystyk hamowania dynamicznego z samowzbudzeniem: $\omega = f(I_{th})$ przy $R_h = \text{par}$.

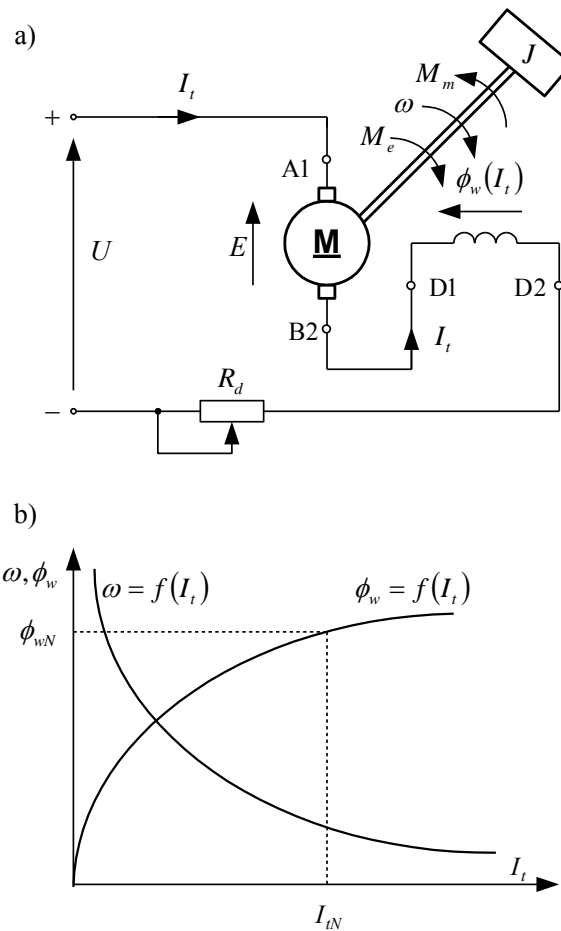
2.2. Wiadomości teoretyczne

Nazwa maszyny szeregowej wynika ze sposobu połączenia uzwojenia wzbudzenia z uzwojeniem twornika (rys. 2.1). W tym przypadku uzwojenia te są zatem połączone szeregowo i jeśli są zasilane prądem stałym, to taką maszynę nazywamy szeregową prądu stałego (w odróżnieniu od silnika szeregowego uniwersalnego). Konsekwencją połączenia szeregowego uzwojeń jest to, że prąd twornika jest jednocześnie prądem wzbudzenia. W silniku szeregowym rezystancja uzwojenia wzbudzenia R_w jest tego samego rzędu co rezystancja uzwojenia twornika R_t . Równanie charakterystyki elektromechanicznej silnika szeregowego przyjmuje postać

$$\omega = \frac{U}{k_e \phi_w(I_t)} - \frac{R_t + R_w + R_d}{k_e \phi_w(I_t)} I_t, \quad (2.1)$$

gdzie $\phi_w(I_t)$ – strumień wzbudzenia przy danym prądzie twornika I_t maszyny.

Charakterystyka magnesowania silnika $\phi_w = f(I_t)$ ma przebieg nieliniowy (rys. 2.1b), co powoduje duże trudności w analitycznym wyznaczeniu charakterystyk mechanicznych silnika szeregowego.



Rys. 2.1. Schemat silnika szeregowego prądu stałego (a), charakterystyka magnesowania $\phi_w = f(I_t)$ oraz elektromechaniczna $\omega = f(I_t)$ (b)

Po przyjęciu założeń upraszczających: $\phi_w = cI_t$ (praca na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania) oraz $(R_t + R_w) I_t \ll U_t$ można wykazać, że charakterystyka elektromechaniczna silnika szeregowego ma przebieg hiperboliczny, bowiem

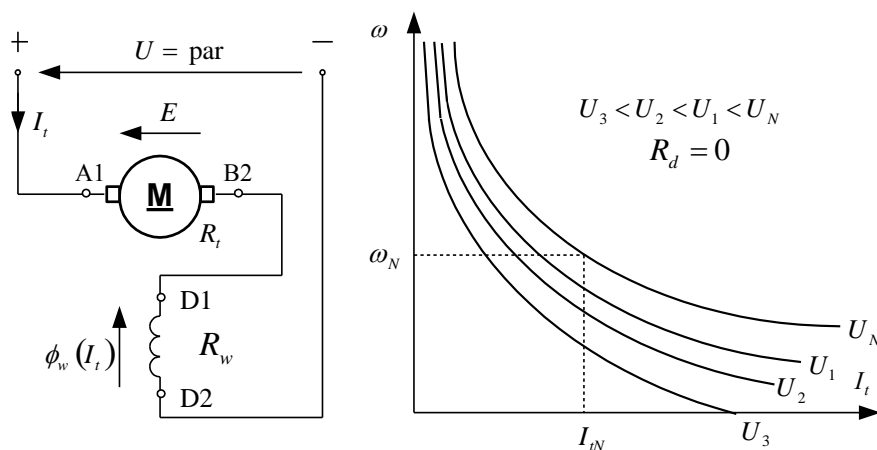
$$\omega = \frac{U - I_t(R_t + R_w)}{k_e c I_t} \approx \frac{k}{I_t}, \quad (2.2)$$

gdzie $k = \frac{U}{k_e c}$ – teoretyczna stała konstrukcyjna.

Charakterystyka $\omega = f(I_t)$ należy do tak zwanych charakterystyk „miękkich”. Ponieważ prąd twornika jest odzwierciedleniem obciążenia silnika, łatwo więc zauważyć, że prędkość kątowna bez obciążenia może teoretycznie (praktycznie około $5 \div 6 \omega_N$) zmierzać do nieskończoności (teoretycznie, bo wcześniej wirnik silnika ulegnie mechanicznemu uszkodzeniu). Wynika z tego, że silnik szeregowy nie może być uruchamiany bez obciążenia. Moment elektromagnetyczny silnika zależy od prądu twornika i dla maszyny szeregowej

$$M_e = k_e \phi_w I_t = k_e c I_t^2, \quad (2.3)$$

czyli jest proporcjonalny do kwadratu prądu twornika. W przypadku znacznych przeciążeń momentem silnik szeregowy jest zatem korzystniejszy od bocznikowego (obcowzbudnego), gdyż wówczas pobiera z sieci prąd o mniejszym natężeniu. Tę ceną zaletę silników szeregowych wykorzystuje się w układach napędowych o ciężkim rozruchu, np. w trakcji, urządzeniach transportowych, a z uwagi na „miękkosć” swojej charakterystyki mechanicznej silnik „automatycznie” zwiększa prędkość obiektu napędzanego (lub skraca czas transportu).



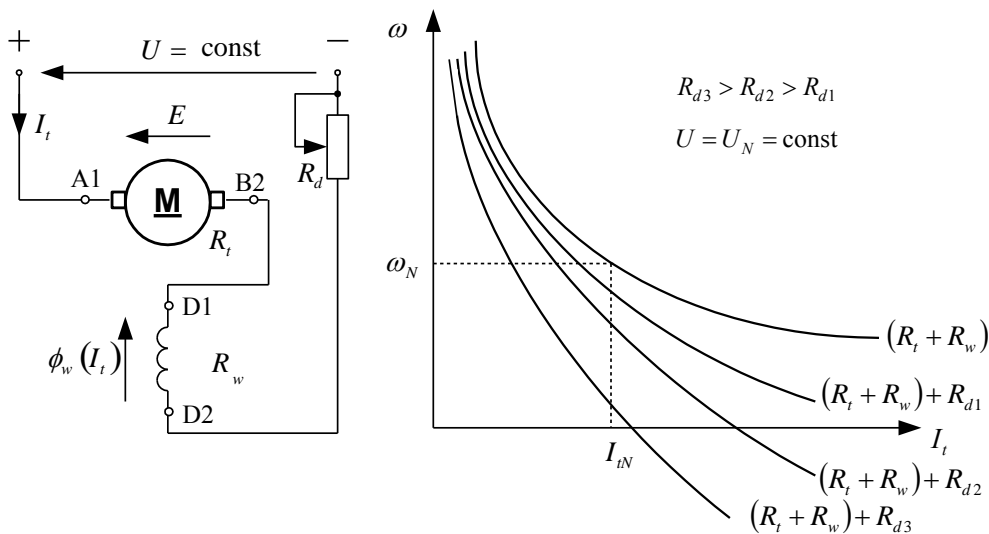
Rys. 2.2. Charakterystyki elektromechaniczne przy $U = \text{par}$

Możliwości regulacji prędkości kątownej silnika wynikają z zależności (2.1) i (2.2):

- regulacja napięciem zasilania,
- regulacja rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika,
- regulacja przez bocznikowanie uzwojenia twornika,
- regulacja przez bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia.

Regulację prędkości kątovej za pomocą zmiany napięcia zasilania (przy $U = \text{par}$) przedstawiono na rysunku 2.2. Jest to regulacja „w dół”.

Aby uzyskać płynną regulację prędkości kątovej, należy stosować regulowane źródła napięcia (np. przekształtnikowe). Prędkość kątovej „w dół” można również regulować przez włączenie rezystancji dodatkowej w obwód twornika. Charakterystyki elektromechaniczne przy $R_d = \text{par}$ przedstawiono na rysunku 2.3.



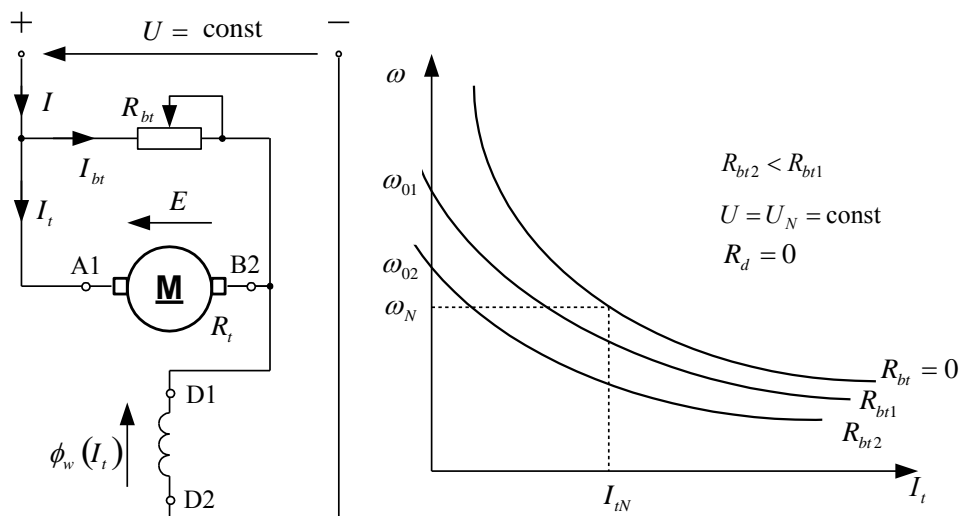
Rys. 2.3. Charakterystyki elektromechaniczne przy $R_d = \text{par}$

Ten sposób regulacji powoduje zmniejszenie strat proporcjonalnie do całkowitej rezystancji obwodu twornika oraz spadek sprawności wraz ze zmniejszaniem się prędkości kątovej (podobnie jak w silniku bocznikowym, chociaż w mniejszym stopniu).

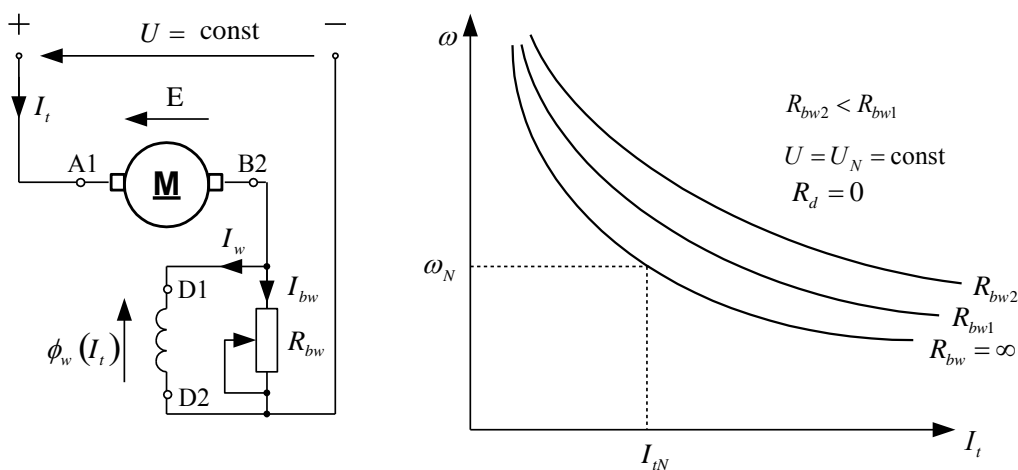
Bocznikowanie obwodu twornika zwiększa sztywność charakterystyki elektromechanicznej oraz może zapobiec rozbieganiu się silnika szeregowego przy jego znacznym ociążeniu. Na rysunku 2.4 przedstawiono przykładowe przebiegi charakterystyk elektromechanicznych dla $R_{br} = \text{par}$. Jest to również regulacja „w dół”.

Regulacja prędkości kątovej przez osłabienie strumienia wzbudzenia jest regulacją „w górę”. Uzyskuje się to najczęściej przez bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia, które powoduje osłabienie prądu (strumienia) wzbudzenia. Przebiegi charakterystyk $\omega = f(I_t)$ dla tego sposobu regulacji prędkości przedstawiono na rysunku 2.5. Ten sposób regulacji często jest stosowany w trakcji w celu zwiększenia prędkości jazdy pociągu.

Hamowanie elektryczne silnika szeregowego można teoretycznie zrealizować trzema metodami: odzyskową, dynamiczną i przeciwwłączeniową.



Rys. 2.4. Charakterystyki elektromechaniczne przy bocznikowaniu twornika $R_{bt} = \text{par}$

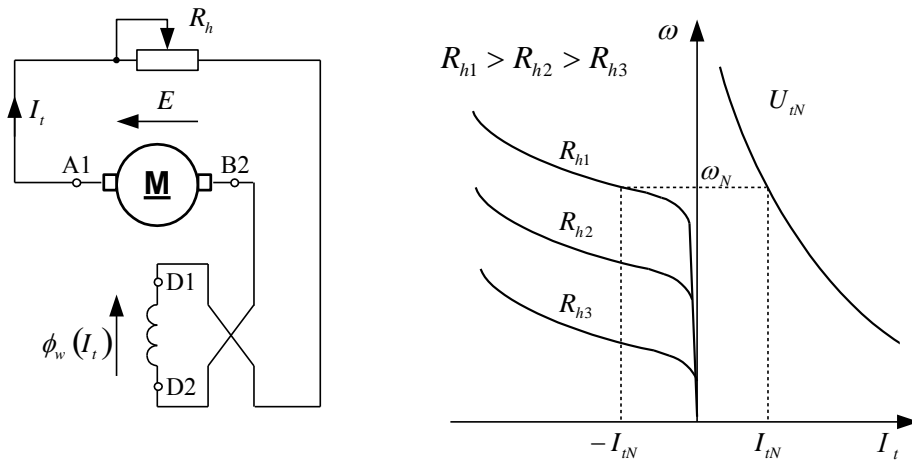


Rys. 2.5. Charakterystyki elektromechaniczne przy bocznikowaniu uzwojenia wzbudzenia, $R_{bw} = \text{par}$

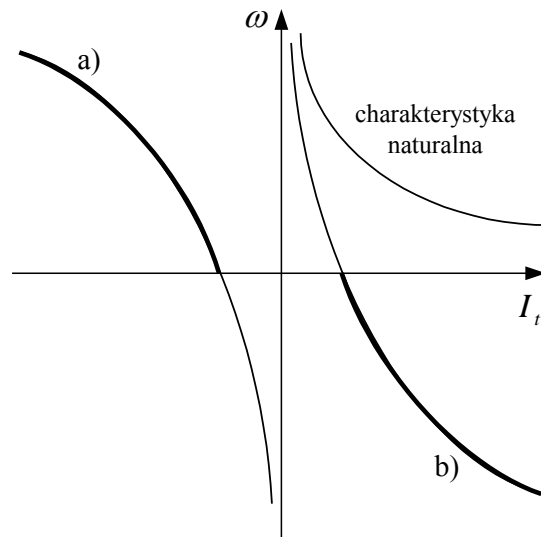
Hamowanie odzyskowe (dla prędkości $\omega > \omega_0$) jest dla silnika szeregowego w zasadzie niemożliwe, ponieważ $\omega_0 = \infty$. Hamowanie odzyskowe można jednak zrealizować w tzw. warunkach sztucznych, przy specjalnych (rzadko stosowanych) połączeniach uzwojeń maszyny.

Powszechnie stosowaną metodą hamowania silnika szeregowego jest hamowanie dynamiczne (prądnicowe, na rezystor hamujący), które może odbywać się w układzie samowzbudnym lub obcowzbudnym. W układzie samowzbudnym należy zachować ten sam kierunek prądu w obwodzie wzbudzenia, jaki występował przy pracy silnik-

wej. W innym przypadku maszyna może się nie wzbudzić. W układzie obcowzbudnym należy pamiętać, że prąd wzbudzenia jest równy prądowi twornika, trzeba zatem zastosować wydajne źródło prądowe. Hamowanie dynamiczne odbywa się w kilku stopniach (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Charakterystyki elektromechaniczne przy hamowaniu z samowzbudzeniem, $R_h = \text{par}$



Rys. 2.7. Hamowanie przeciwwłączeniem silnika szeregowego: a) moment hamujący reaktywny, b) moment hamujący aktywny

Hamowanie silnika szeregowego przeciwwłączeniem (czyli prądem sieci) polega na przełączeniu obwodu twornika na napięcie o przeciwnej biegunowości, przy czym, w celu ograniczenia prądu hamowania, w obwód twornika silnika należy włączyć rezystor hamowania o znacznej wartości

$$R_h = \frac{U + E}{I_h} - (R_t + R_w). \quad (2.4)$$

Podczas hamowania przeciwwłączeniem – przy zmniejszaniu się prędkości kątowej silnika do zera – należy silnik odłączyć od napięcia zasilającego, aby nie nastąpił rozruch w przeciwnym kierunku wirowania. Jeżeli moment obciążenia ma charakter reaktywny, hamowanie odbywa się w II ćwiartce, jeżeli aktywny (opuszczanie ciężaru) – w IV ćwiartce. Przykładowe przebiegi dla tego przypadku hamowania przedstawiono na rysunku 2.7.

2.3. Instrukcja

2.3.1. Opis układu pomiarowego

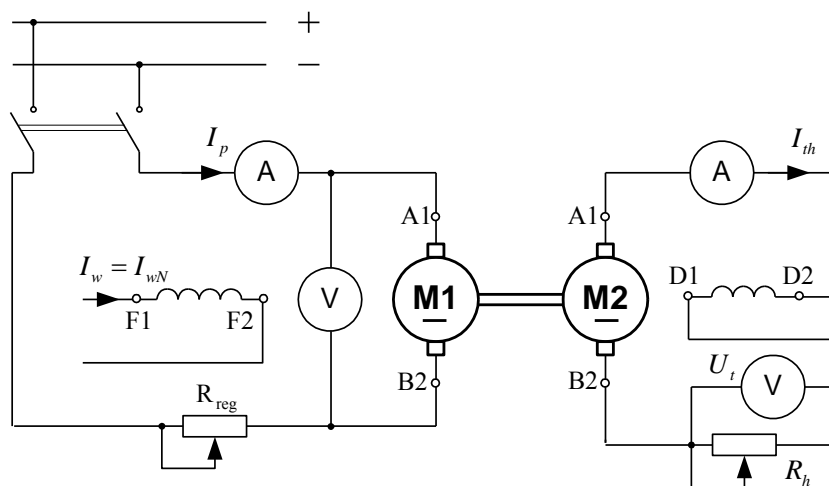
Układ napędowy składa się z badanego silnika szeregowego i maszyny roboczej, będącej obcowzbudną maszyną prądu stałego. Schemat układu pomiarowego (dla pracy silnikowej) przedstawiono na rysunku 2.8, przy czym R_r – rezystancja rozruchowa, R_{bt} – rezystancja bocznikująca twornik, R_{bw} – rezystancja bocznikująca wzbudzenie. Prądnica stanowi dla silnika obciążenie, które reguluje się za pomocą rezystora R_{obc} . Dla kontroli obciążeń należy mierzyć prądy i napięcia w obwodach tworników maszyn. Do pomiarów charakterystyk hamowania dynamicznego z samowzbudzeniem należy układ połączyć według rysunku 2.9.

2.3.2. Wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ dla pracy silnikowej

Badania należy wykonać zgodnie z programem ćwiczenia, w układzie połączeń przedstawionym na rysunku 2.8. Przed dokonaniem rozruchu silnika należy sprawdzić, czy rezystor obciążenia R_{obc} w obwodzie twornika prądnicy jest nastawiony na odpowiednią wartość, zapewniającą rozruch silnika szeregowego z obciążeniem.

2.3.3. Wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_{th})$ dla stanu hamowania

Badania prowadzi się w układzie połączeń pokazanych na rysunku 2.9, przy czym napędzającą maszyną pomocniczą jest silnik obcowzbudny (pracujący dotychczas jako prądnica), badany zaś silnik szeregowy pracuje jako hamulec w układzie połączeń z samowzbudzeniem.



Rys. 2.9. Schemat połączeń do badania charakterystyk elektromechanicznych silnika szeregowego podczas hamowania z samowzbudzeniem

Pomiary należy wykonać dla dwóch wartości rezystancji hamujących R_{h1} , R_{h2} . Wyniki pomiarów zestawzić w tabeli 2.2 i na ich podstawie wykreślić charakterystyki $\omega = f(I_{th})$ dla różnych wartości R_h .

Tabela 2.2

Lp.	Silnik szeregowy					Silnik napędowy	
	I_{th}	U_t	n	ω	R_h	U_p	I_p
	A	V	obr/min	rad/s	Ω	V	A

2.4. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić:

1. Parametry badanego układu pomiarowego.

2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schematy pomiarowe.
4. Tabele pomiarowe oraz charakterystyki elektromechaniczne silnika szeregowego dla pracy silnikowej i hamowania dynamicznego.
5. Omówienie uzyskanych wyników pomiarów i charakterystyk.
6. Własne spostrzeżenia i wnioski.

2.5. Zagadnienia kontrolne

1. Opisać budowę silnika szeregowego prądu stałego i podać przykłady jego zastosowania.
2. Omówić metody regulacji prędkości kątowej silnika szeregowego.
3. Podać przykładowe przebiegi charakterystyk $\omega = f(I_t)$ dla pracy silnikowej.
4. Omówić metody hamowania elektrycznego silnika szeregowego.

Literatura

- [1] Bisztyga K., *Sterowanie i regulacja silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1989.
- [2] Kałuża E., *Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994.
- [3] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.