

Ćwiczenie 3

Wał mechaniczny z silnikami prądu stałego

3.1. Program ćwiczenia

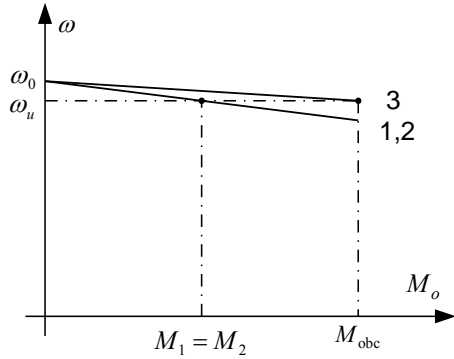
1. Poznanie przyczyn nierównomiernego obciążania się silników pracujących w wale mechanicznym.
2. Zapoznanie się ze strukturą stanowiska badawczego.
3. Wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych przy równoległym i szeregowym połączeniu tworników silników prądu stałego pracujących w wale mechanicznym.

3.2. Wiadomości teoretyczne

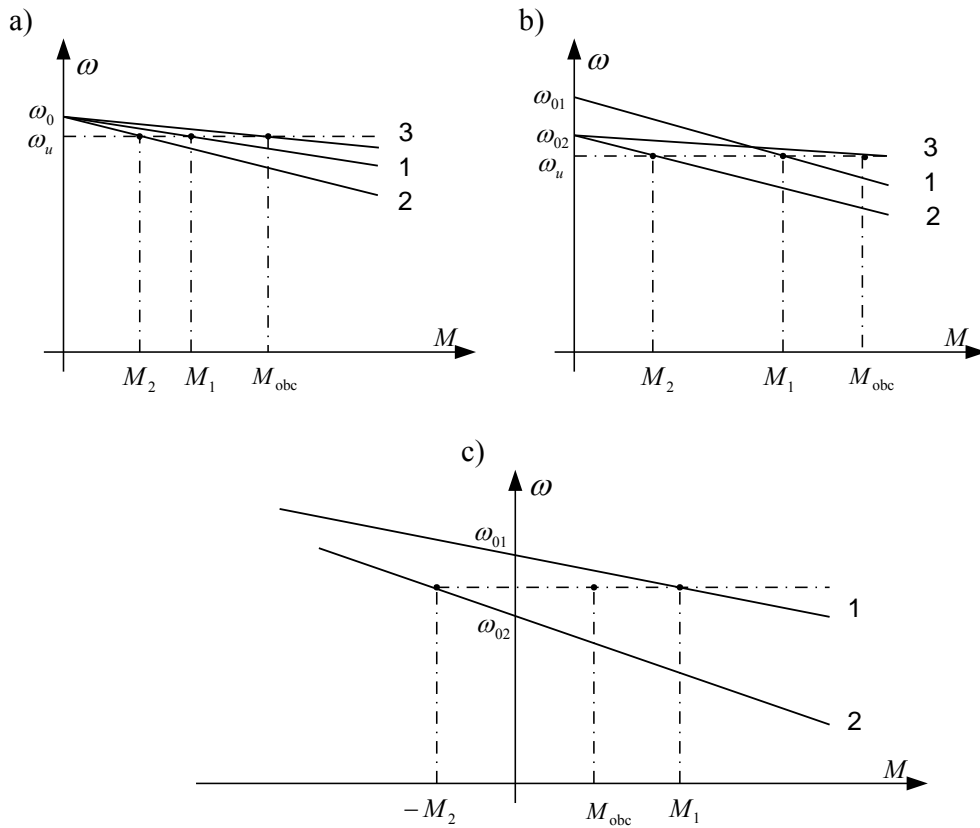
Układy napędowe niektórych maszyn roboczych wymagają zastosowania silników napędowych pracujących w wale mechanicznym. Podstawowy wał mechaniczny tworzą dwa sprzężone mechanicznie ze sobą silniki napędzające maszynę roboczą. Na wstępie rozważań można wziąć pod uwagę identyczne silniki obcowzbudne prądu stałego, o uzwojeniach twornika połączonych równolegle. W takim przypadku charakterystyki mechaniczne (rozkład obciążeń) będą miały przebiegi pokazane na rysunku 3.1.

Jeśli weźmie się pod uwagę silniki o tej samej mocy i prędkości znamionowej, których parametry elektromagnetyczne różnią się jednak nieco między sobą, to ich charakterystyki mechaniczne mają przebieg jak pokazane na rysunku 3.2.

Z analizy przebiegów podanych na rysunku 3.1 i 3.2 wynika, że warunkiem równomierności obciążeń w stanie ustalonym ($M_1 = M_2$) jest równość rezystancji obwodów tworników i równość strumieni magnetycznych wzbudzenia, czyli jednakowe sztywności charakterystyk mechanicznych i jednakowe prędkości idealnego biegu jałowego.



Rys. 3.1. Przebiegi charakterystyk mechanicznych silników (1, 2) i charakterystyka wypadkowa (3) w układzie wału mechanicznego, w przypadku identycznych parametrów obwodów silników napędowych



Rys. 3.2. Przykładowe przebiegi charakterystyk mechanicznych silników obcowzbudnych pracujących w wale mechanicznym: a) przypadek różnej sztywności charakterystyk mechanicznych, b) przypadek różnych wartości prędkości biegu jałowego, c) przypadek różnych sztywności charakterystyk i różnych prędkości biegu jałowego
1, 2 – charakterystyki mechaniczne silników napędowych, 3 – charakterystyka wypadkowa

Jeśli $\omega_{01} \neq \omega_{02}$ i sztywności charakterystyk mechanicznych są różne, to może wystąpić taki przypadek, że silnik drugi (2) będzie pracował jako prądnica, czyli będzie dodatkowo obciążał układ napędowy (rys. 3.2c). Aby zatem zapewnić równomierność obciążeń silników pracujących w wale mechanicznym, należy je odpowiednio dobrać pod względem jednakowych wartości prędkości idealnego biegu jałowego ω_0 oraz sztywności charakterystyk mechanicznych. Praktycznie dla silników obcowzbudnych rezystancję dodatkową, włączoną w obwód twornika silnika o większej sztywności charakterystyki mechanicznej, można dobrać z zależności [1, 2]

$$R_d = R_{t1} \left(\frac{a_2}{a_1} - 1 \right), \quad (3.1)$$

gdzie:

R_{t1} – rezystancja twornika o większej sztywności charakterystyki mechanicznej,
 a_1, a_2 – współczynniki nachylenia charakterystyk mechanicznych silnika 1 i 2,
 przy czym:

$$a_1 = \frac{R_{t1}}{(c_e \Phi_w)^2}, \quad a_2 = \frac{R_{t2}}{(c_e \Phi_w)^2}.$$

Z dotychczasowych rozważań wynika, że dla dwóch silników pracujących w wale mechanicznym (przy połączeniu równoległym ich tworników) można dopasować obwody twornikowe lub wzbudzenia tak, aby silniki były obciążone równomiernie. Będzie to jednak spełnione tylko dla jednego punktu pracy na charakterystyce mechanicznej ($M_o = \text{const}$).

Jeżeli moment obciążenia jest zmienny ($M_{\text{obc}} = \text{var}$) – wyrównanie obciążeń można uzyskać przez szeregowe połączenie tworników obu silników. Wymaga to zasilania silników napięciem o wartości $2U_N$. W takim przypadku występuje jedna wartość prądu twornika zapewniająca równomierne obciążenie obu silników (przy jednakowych strumieniach wzbudzenia). Podział napięć w obwodach tworników tych silników zależy od wartości rezystancji ich tworników, co można zapisać:

$$\begin{aligned} U_1 &= c_e \Phi_w \omega + I_t R_{t1}, \\ U_2 &= c_e \Phi_w \omega + I_t R_{t2}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Z zależności tych można wyprowadzić równanie wypadkowej charakterystyki mechanicznej

$$\omega = \frac{U_1 + U_2}{2c_e \Phi_w} - \frac{R_{t1} + R_{t2}}{2(c_e \Phi_w)^2} M_e \quad (3.3)$$

oraz równania charakterystyk mechanicznych dla poszczególnych silników:

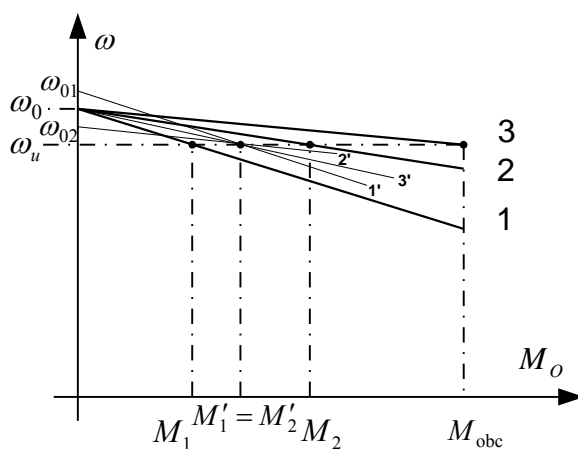
$$\omega_1 = \frac{U_1}{c_e \Phi_w} - \frac{R_{t1}}{(c_e \Phi_w)^2} M_e,$$

$$\omega_2 = \frac{U_2}{c_e \Phi_w} - \frac{R_{t2}}{(c_e \Phi_w)^2} M_e, \quad (3.4)$$

przy czym prędkości idealnego biegu jałowego wynoszą odpowiednio:

$$\omega_{01} = \frac{U_1}{c_e \Phi_w}, \quad \omega_{02} = \frac{U_2}{c_e \Phi_w}. \quad (3.5)$$

Wynika z tego, że wyrównanie obciążeń silników przy szeregowym połączeniu ich tworników jest spowodowane zmianą wartości ich napięć zasilania, co z kolei powoduje równoległe przesunięcie charakterystyk mechanicznych proporcjonalnie do wartości napięć na twornikach. Przykładowy przebieg charakterystyk mechanicznych przy równoległym i szeregowym połączeniu tworników silników pracujących w wale mechanicznym przedstawiono na rysunku 3.3. Charakterystyka mechaniczna wypadkowa (3') obu silników, po wyrównaniu obciążeń przez szeregowe połączenie ich tworników, przebiega pomiędzy ich charakterystykami naturalnymi.



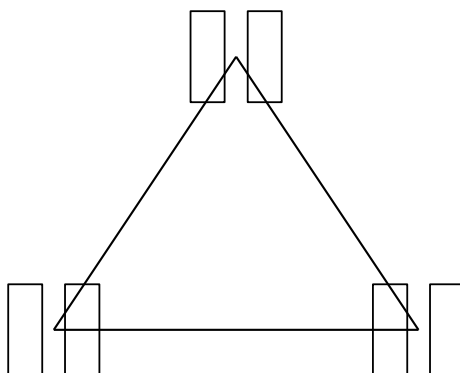
Rys. 3.3. Przebiegi charakterystyk mechanicznych silników (1, 2) i charakterystyki wypadkowej (3) w układzie wału mechanicznego przed wyrównaniem obciążeń oraz po wyrównaniu obciążeń przez szeregowe połączenie ich tworników:
1', 2' – charakterystyki silników,
3' – charakterystyka wypadkowa

W praktyce znane są napędy typu wał mechaniczny (np. w górnictwie odkrywkowym) w wersji wielosilnikowej. Przykładem może tu być napęd jazdy koparki (lub zwałowarki) przedstawiony schematycznie na rysunku 3.4. Mechanizm jezdny koparki stanowi układ sześciu łańcuchów tworzących „trójkąt podporowy”, przy czym każdą z łańcuchów napędza silnik obcowzbudny. Tworniki silników są połączone szeregowo i pracują w wale mechanicznym, przy czym napięcie zasilania wynosi $6U_N$. Od napędu tego typu wymaga się, aby:

➤ rozruch i hamowanie układu odbywały się łagodnie, przekroczenie bowiem dopuszczalnych przyspieszeń (opóźnień) może spowodować trwałe odkształcenia lub zniszczenie konstrukcji,

- obciążenie powinno rozkładać się równomiernie na wszystkie silniki,
- prędkość jazdy powinna być regulowana w szerokim zakresie, z możliwością zmiany kierunku jazdy.

Obecnie maksymalne prędkości jazdy koparek są rzędu $0,1 \div 0,2$ m/s. Napęd jazdy jest tu złożony z sześciu silników obcowzbudnych (o jednakowych danych znamionowych), których tworniki połączone szeregowo pracują w wale mechanicznym, tworząc elektryczny mechanizm różnicowy. Połączone szeregowo tworniki silników są zasilane z prostownika tyrystorowego, uzwojenia wzbudzenia zaś z oddzielnego układu prostowniczego (rys. 3.5).



Rys. 3.4. Przykładowy układ gąsienic napędu jazdy koparki

Napięcie zasilania obwodów tworników silników napędowych ma postać (3.6):

$$U_z = 6U_N = I_t(R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} + R_{t5} + R_{t6}) + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6, \quad (3.6)$$

którą do dalszych rozważań (przy jednakowych parametrach silników) można zapisać jako

$$U_z = 6(I_t R_t + c_e \Phi_w \omega). \quad (3.7)$$

Moment obrotowy pojedynczego silnika wynosi wtedy

$$M_e = \frac{1}{6} M_o, \quad (3.8)$$

a charakterystyka mechaniczna jest określona zależnością

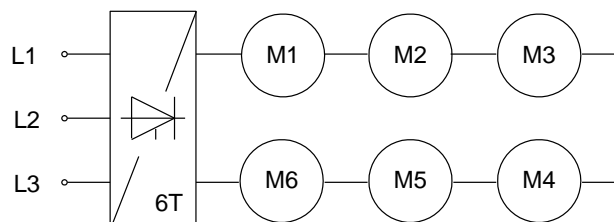
$$\omega = \frac{U_N}{c_e \Phi_w} - \frac{R_t}{(R_t \Phi_w)^2} M_o. \quad (3.9)$$

W stanach awaryjnych (np. uszkodzenie sprzęgła połączeniowego) połączenie szeregowo tworników prowadzi do „rozbiegania” się silnika, przy którym nastąpiła taka awaria. W rozpatrywanym przypadku prędkość kątowna silnika byłaby zawarta w przedziale

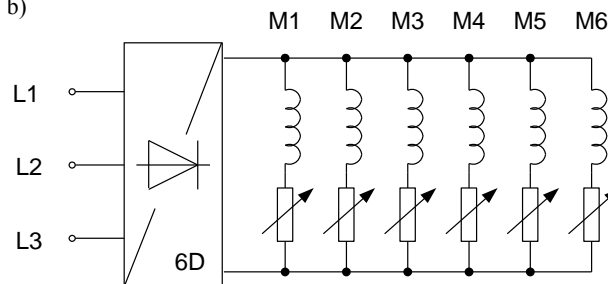
$$6\omega_N < \omega < 6\omega_0, \quad (3.10)$$

całe bowiem napięcie zasilania odłożyłoby się na tworniku tego silnika, doprowadzając do jego mechanicznego uszkodzenia.

a)



b)

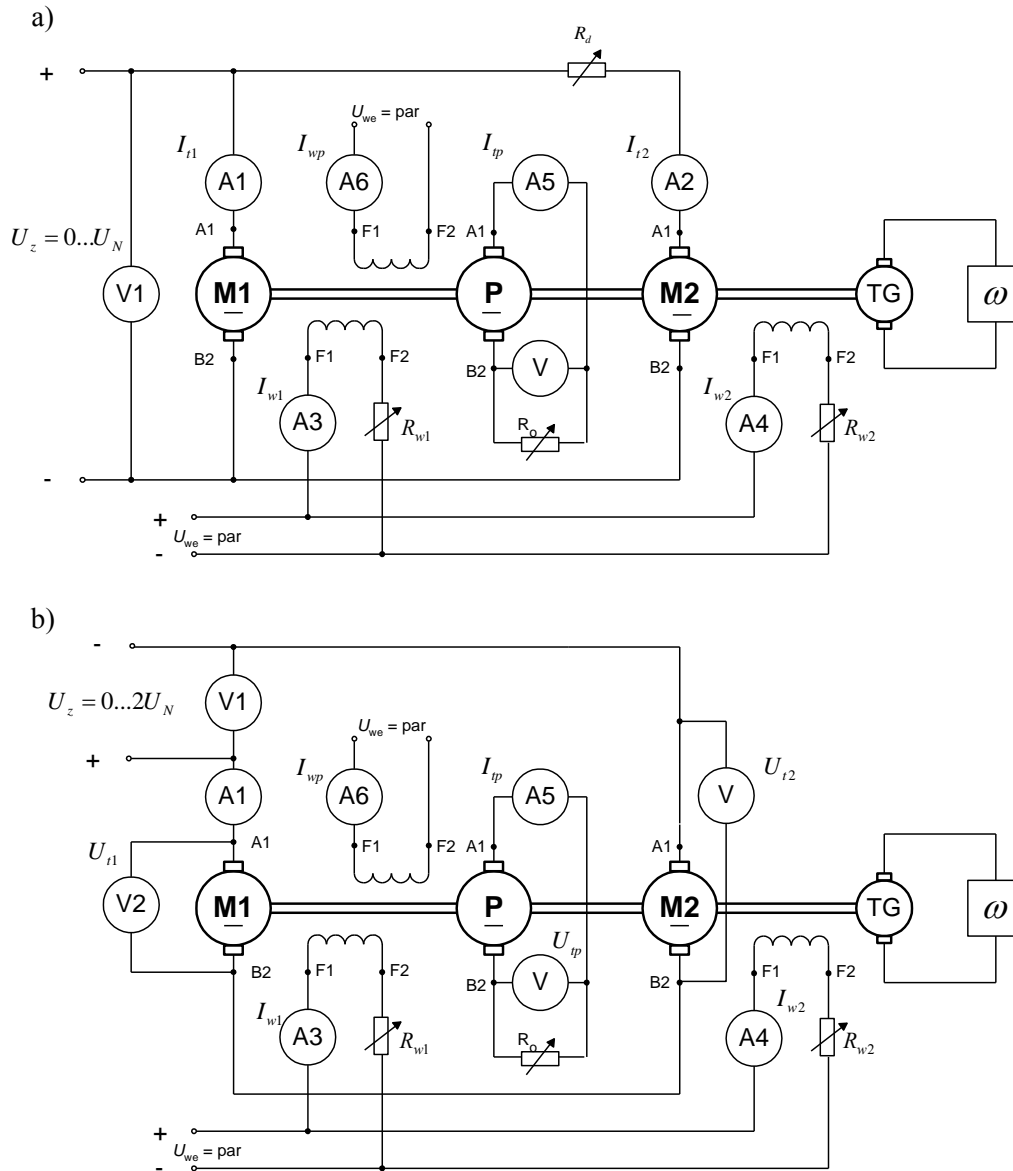


Rys. 3.5. Schemat zasilania napędu jazdy koparki:
a) obwód twornikowy, b) obwody wzbudzenia

3.3. Instrukcja

3.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

1. Badania wału mechanicznego należy wykonać na zestawie złożonym z trzech połączonych mechanicznie obcowzbudnych maszyn prądu stałego. Dwie maszyny są silnikami napędowymi (M1, M2), trzecia natomiast (prądnicą – P) stanowi maszynę roboczą o zmiennym obciążeniu. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Schemat układu pomiarowego do badania wału mechanicznego:
 a) z równoległym połączeniem tworników silników napędowych,
 b) z szeregowym połączeniem tworników silników napędowych

Podczas uruchamiania układu laboratoryjnego korzysta się z regulowanego napięcia zasilania obwodów twornikowych (badanych silników), przy czym prądy wzbudzenia powinny być na poziomach znamionowych.

Badania obciążeń silników polegają na pomiarach ich prądów twornika przy różnym momencie oporowym, nastawianym rezystorem R_o w obwodzie prądnicy. Prąd wzbudzenia prądnicy powinien być na poziomie znamionowym, możemy bowiem wówczas przyjąć, że moment obciążenia jest proporcjonalny do jej prądu twornika I_p . Zakładając, że pomiary powinny odbywać się w jednakowych warunkach cieplnych (badanych maszyn), należy po rozruchu układu zacząć od poziomu $1,3 I_{tN}$ obciążenia. Najpierw należy przeprowadzić identyfikację parametrów silników, określając ich naturalne charakterystyki elektromechaniczne. Następnie wykonać badania równomierności obciążeń silników dla połączenia równoległego i szeregowego ich tworników.

3.3.2. Badania wału mechanicznego przy równoległym połączeniu tworników silników napędowych

Pomiary wykonuje się w układzie połączeń przedstawionym na rysunku 3.6a. Wskazania odpowiednich przyrządów pomiarowych należy zapisać w tabeli pomiarowej 3.1.

1. Pomiar charakterystyk elektromechanicznych naturalnych obu silników.
2. Pomiar charakterystyki elektromechanicznej wału $\omega = f(I_{t1}, I_{t2}, I_p)$ przy pracy silników na charakterystykach naturalnych.
3. Pomiar charakterystyki elektromechanicznej wału $\omega = f(I_{t1}, I_{t2}, I_p)$ po ustaleniu R_d tak, aby prądy tworników były na poziomie znamionowym (metoda wyrównania obciążeń za pomocą rezystora dodatkowego w obwodzie twornika).
4. Pomiar charakterystyki elektromechanicznej wału $\omega = f(I_{t1}, I_{t2}, I_p)$ po ustaleniu R_{ws} tak, aby prądy tworników były na poziomie znamionowym (metoda wyrównania obciążeń za pomocą strumienia magnetycznego).
5. Wyznaczenie charakterystyki regulacyjnej $I_{ws} = f(I_p)$ tak, aby $I_{t1} = I_{t2}$ ($R_d = 0$). Charakterystyka ta wskazuje, jak zmieniać prąd wzbudzenia jednego z silników, aby przy zmieniającym się momencie oporowym zapewnić jednakowe obciążenie obu silników.

Tabela 3.1

Lp.	I_{t1}	I_{t2}	I_p	I_{w1}	I_{w2}	I_{wp}	ω	Uwagi
	A	A	A	A	A	A	rad/s	
								$R_d =$
								$U_t =$
								$U_w =$
								$R_{ws} =$

3.3.3. Badanie wału mechanicznego przy szeregowym połączeniu tworników silników napędowych

Pomiary wykonuje się w układzie połączeń pokazanym na rysunku 3.6b, przy czym napięcie zasilania po rozruchu należy ustalić na poziomie $U_z = 2U_N$. Zmieniając obciążenie (regulacja R_o) – odczytuje się odpowiednie wartości i zapisuje do tabeli pomiarowej 3.2. Należy wykonać następujące pomiary:

1. Pomiary charakterystyk $\omega = f(I_t, I_{\varphi})$ oraz $U_{t1}, U_{t2} = f(I_{\varphi})$ przy znamionowych prądach wzbudzenia.

2. Pomiary charakterystyk $\omega = f(I_t, I_{\varphi})$ oraz $U_{t1}, U_{t2} = f(I_{\varphi})$ dla $\frac{I_w}{I_{wN}} = 0,5$ jednego z silników napędowych

Tabela 3.2

Lp.	U_{t1}	U_{t2}	I_t	I_{φ}	ω	Uwagi
	A	A	A	A	rad/s	
						$U_z =$
						$U_w =$
						$I_{w1} =$
						$I_{w2} =$
						$I_{wp} =$

3.4. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić:

1. Parametry badanego układu napędowego.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schematy pomiarowe.
4. Tabele pomiarowe oraz wyznaczone charakterystyki.
5. Omówienie uzyskanych wyników pomiarowych.
6. Własne spostrzeżenia i wnioski.

3.5. Zagadnienia i pytania kontrolne

1. Opisać wał mechaniczny silników elektrycznych oraz podać przykłady jego zastosowania.

2. Omówić stany awaryjne wału mechanicznego (np. uszkodzenie sprzęgła połączeniowego, przerwa w obwodzie wzbudzenia).
3. Omówić nierównomierność obciążania się silników obcowzbudnych pracujących w wale mechanicznym i podać sposoby wyrównywania obciążeń.
4. Jak należy wykonać badania laboratoryjne wału mechanicznego?
5. Jak dokonuje się rozruchu i zatrzymania przemysłowych wałów mechanicznych?

Literatura

- [1] Andriejew W.P., Sabinin J.A., *Podstawy napędu elektrycznego*, WNT, Warszawa 1966.
- [2] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.