

Ćwiczenie 1

Kształtowanie charakterystyk silnika obcowzbudnego prądu stałego w różnych stanach pracy

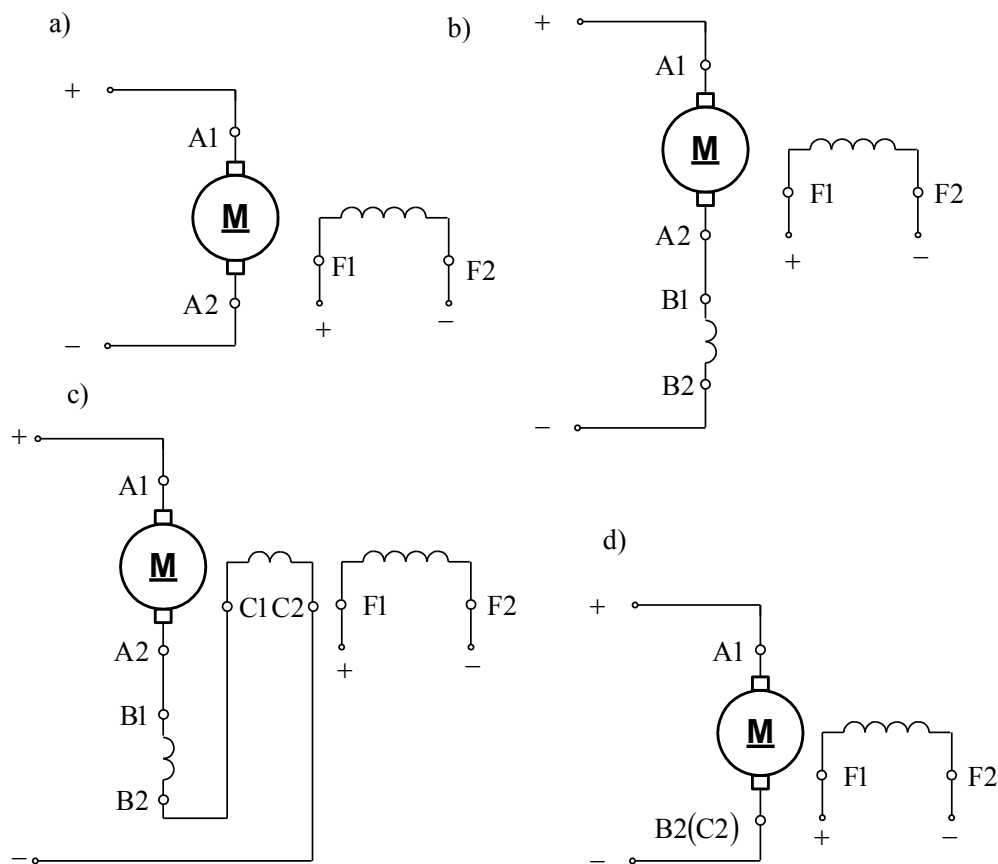
1.1. Program ćwiczenia

1. Wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego w stanach pracy silnikowej.
2. Wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego w stanach hamowania dynamicznego.
3. Wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego w stanach hamowania przeciwwłączeniem.
4. Badanie metod sterowania silnikiem obcowzbudnym w stanach pracy silnikowej i hamowania elektrycznego.

1.2. Wiadomości teoretyczne

1.2.1. Wprowadzenie

Silnik obcowzbudny prądu stałego ma dwa niezależne obwody elektryczne, zasilane z oddzielnych źródeł napięcia stałego: obwód twornika i obwód wzbudzenia (rys. 1.1). Podstawowymi uzwojeniami silnika są: uzwojenie twornika (A1, A2) i uzwojenie wzbudzenia (F1, F2). W celu zapewnienia prawidłowej komutacji może być zastosowane uzwojenie komutacyjne (B1, B2), a w silnikach większej mocy do wyeliminowania wpływu oddziaływania twornika – uzwojenie kompensacyjne (C1, C2). Uzwojenia komutacyjne i kompensacyjne są łączone szeregowo z uzwojeniem twornika.



Rys. 1.1. Schematy obwodów silnika obcowzbudnego prądu stałego:
 a) układ podstawowy, b) silnik z uzwojeniem komutacyjnym,
 c) silnik z uzwojeniem komutacyjnym i kompensacyjnym,
 d) uproszczony schemat obwodów silnika

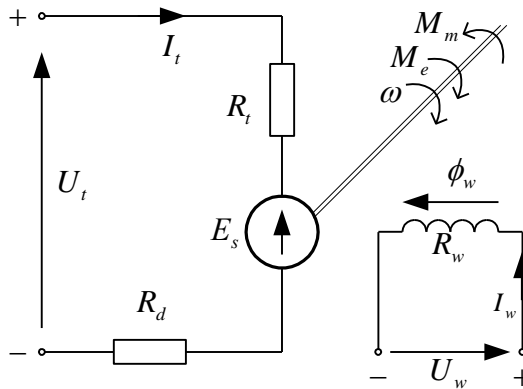
1.2.2. Równania charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego

Do podstawowych charakterystyk silnika obcowzbudnego należą:

- charakterystyka elektromechaniczna $\omega = f(I_t)$, przedstawiająca zależność prędkości kątowej silnika ω od prądu twornika I_t ,
- charakterystyka mechaniczna $\omega = f(M_e)$, przedstawiająca zależność prędkości kątowej silnika ω od momentu elektromagnetycznego silnika M_e .

Charakterystyki te określają zachowanie silnika w stanach pracy ustalonej i nazywane są również charakterystykami statycznymi silnika.

Schemat zastępczy silnika obcowzbudnego do analizy stanów pracy ustalonej przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Schemat zastępczy silnika obcowzbudnego do analizy stanów pracy ustalonej

W stanach statycznych silnik obcowzbudny prądu stałego jest opisany przez następujący układ równań algebraicznych:

➤ równanie napięciowe obwodu twornika

$$U_t = (R_t + R_d)I_t + E_s, \quad (1.1)$$

➤ zależność na siłę elektromotoryczną twornika E_s

$$E_s = k_e \phi_w \omega, \quad (1.2)$$

➤ równanie na moment elektromagnetyczny silnika M_e

$$M_e = k_e \phi_w I_t, \quad (1.3)$$

w których:

U_t – napięcie zasilania obwodu twornika,

I_t – prąd twornika,

R_t – rezystancja twornika,

R_d – rezystancja dodatkowa w obwodzie twornika,

ϕ_w – strumień wzbudzenia silnika,

k_e – stała konstrukcyjna silnika,

ω – prędkość kątowa silnika.

Po podstawieniu zależności (1.2) do (1.1) otrzymuje się następujące ogólne równanie charakterystyki elektromechanicznej silnika obcowzbudnego prądu stałego

$$\omega = \omega(I_t) = \frac{U_t}{k_e \phi_w} - \frac{R_t + R_d}{k_e \phi_w} I_t = \omega_0 - k_I I_t, \quad (1.4)$$

w którym:

$$\omega_0 = \omega|_{I_t=0} = \frac{U_t}{k_e \phi_w}, \quad k_I = \frac{R_t + R_d}{k_e \phi_w}, \quad (1.5)$$

ω_0 – prędkość kątowna idealnego biegu jałowego silnika,

k_I – współczynnik nachylenia charakterystyki elektromechanicznej silnika.

Po podstawieniu do równania (1.4) wyrażenia określającego prąd twornika I_t , wynikającego z zależności (1.3), otrzymuje się następujące ogólne równanie charakterystyki mechanicznej silnika obcowzbudnego prądu stałego

$$\omega = \omega(M_e) = \frac{U_t}{k_e \phi_w} - \frac{R_t + R_d}{(k_e \phi_w)^2} M_e = \omega_0 - k_M M_e, \quad (1.6)$$

w którym:

k_M – współczynnik nachylenia charakterystyki mechanicznej silnika

$$k_M = \frac{R_t + R_d}{(k_e \phi_w)^2}. \quad (1.7)$$

Z zależności (1.4) i (1.6) wynika, że równania charakterystyki elektromechanicznej i charakterystyki mechanicznej silnika obcowzbudnego są pod względem matematycznym równaniami prostych o ujemnych współczynnikach nachylenia. W przypadku pracy silnika przy stałej wartości strumienia wzbudzenia $\phi_w = \text{const}$ występuje proporcjonalność między momentem elektromagnetycznym M_e i prądem twornika I_t . Przebiegi charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika mogą być wtedy przedstawione na wspólnym wykresie przy odpowiednim doborze skali prądu i momentu na osi odciętych.

Charakterystyka elektromechaniczna i mechaniczna silnika – wyznaczona przy znamionowej wartości napięcia twornika U_{tN} , znamionowej wartości strumienia wzbudzenia ϕ_{wN} (znamionowej wartości prądu wzbudzenia I_{wN}) oraz przy normalnym układzie połączeń obwodów silnika (bez dołączenia dodatkowych elementów) – jest nazywana charakterystyką naturalną. Gdy nie jest spełniony którykolwiek z tych warunków, wówczas otrzymywane charakterystyki są charakterystykami sztucznymi silnika.

Kształtowanie charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika polega na celowym oddziaływaniu na wartości napięć zasilających, parametry obwodów silnika lub układy połączeń tych obwodów w celu otrzymania pożądanego przebiegu charakterystyk sztucznych, a przez to pożądanego stanów pracy silnika.

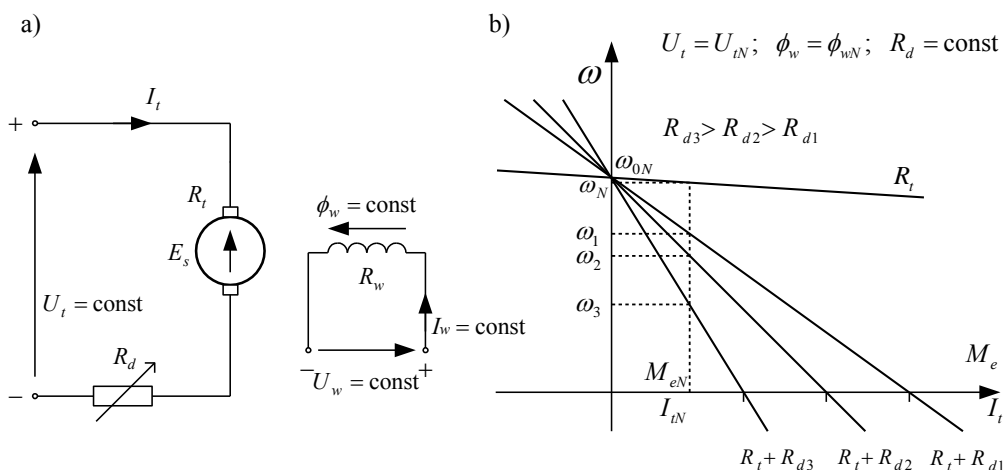
1.2.3. Kształtowanie charakterystyk silnika obcowzbudnego w stanach pracy silnikowej

Z równań (1.4) i (1.6) wynikają następujące metody kształtowania charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika:

- a) przez zmianę wartości rezystancji dodatkowej R_d w obwodzie twornika,
- b) przez zmianę wartości napięcia U_t zasilającego obwód twornika,
- c) przez zmianę wartości strumienia wzbudzenia ϕ_w .

1.2.3.1. Sterowanie przez zmianę wartości rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika

Schemat połączeń obwodów silnika i rodzinę charakterystyk silnika obcowzbudnego sterowanego przez zmianę wartości rezystancji dodatkowej $R_d = \text{var}$ w obwodzie twornika przedstawiono na rysunku 1.3. Podczas tego sterowania utrzymywana jest stała, znamionowa wartość napięcia zasilania obwodu twornika $U_t = U_{tN} = \text{const}$ i stała, znamionowa wartość strumienia wzbudzenia $\phi_w = \phi_{wN} = \text{const}$.



Rys. 1.3. Sterowanie silnikiem obcowzbudnym przez zmianę rezystancji obwodu twornika: a) układ sterowania, b) rodzina charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych

Z równań (1.4) i (1.6) wynika, że zwiększanie wartości rezystancji dodatkowej R_d w obwodzie twornika powoduje wzrost nachylenia charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika. Rodziny tych charakterystyk dla różnych wartości rezystancji R_d tworzą zbiór prostych, przecinających oś prędkości kątowej w tym samym punkcie, wyznaczającym wartość prędkości kątowej idealnego biegu jałowego silnika ω_{0N} przy znamionowej wartości napięcia twornika i strumienia wzbudzenia. Punkty przecięć tych charakterystyk z osią odciętych wyznaczają natomiast odpowiednio wartości statyczne prądów rozruchowych lub elektromagnetycznych momentów rozruchowych przy prędkości kątowej $\omega = 0$, czyli dla stanu bezpośrednio po załączeniu silnika. Ta metoda kształtowania charakterystyk jest stosowana podczas rezystorowej regulacji prędkości kątowej oraz podczas rezystorowego rozruchu silnika.

Z równań (1.1) i (1.2) rozpatrywanych przy wartości prędkości $\omega = 0$ można wyznaczyć całkowitą rezystancję rozrusznika R_r , wymaganą dla założonej wartości maksymalnego prądu rozruchowego twornika $I_{r\max}$

$$R_d = R_r = \frac{U_{tN}}{I_{r\max}} - R_t, \quad (1.8)$$

gdzie $I_{r\max} = (2 \div 4)I_{tN}$ – przyjęta maksymalna wartość prądu rozruchowego silnika.

Podczas regulacji prędkości kątowej silnika przez zmianę rezystancji dodatkowej R_d w obwodzie twornika możliwe jest nastawianie tylko prędkości kątowych mniejszych od prędkości idealnego biegu jałowego. Z tych względów ta metoda regulacji jest nazywana regulacją prędkości kątowej „w dół”. Zakres regulacji prędkości kątowej silnika zależy od wartości prądu twornika, przy którym ta regulacja występuje, czyli od obciążenia silnika momentem mechanicznym. Do najważniejszych wad rezystorowej metody regulacji prędkości należą: mniejsza sztywność charakterystyk mechanicznych silnika oraz powstawanie dużych strat mocy, wydzielanych na rezystorze dodatkowym R_d .

Po pominięciu strat jałowych silnika sprawność układu napędowego jest w przybliżeniu równa stosunkowi mocy elektromagnetycznej P_e do mocy pobranej P_1

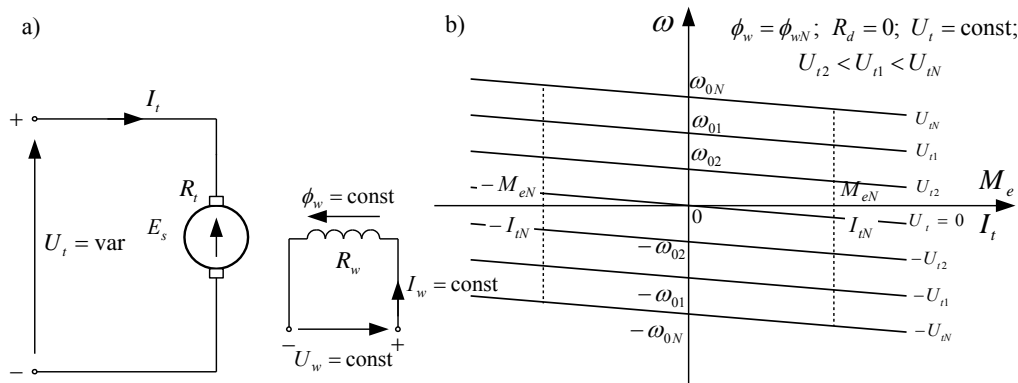
$$\eta \approx \frac{P_e}{P_1} = \frac{E_s I_t}{U_{tN} I_t} = \frac{k_e \phi_{wN} \omega}{k_e \phi_{wN} \omega_{0N}} = \frac{\omega}{\omega_{0N}}. \quad (1.9)$$

Podczas sterowania prędkością kątową silnika przez zmianę rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika sprawność napędu jest w przybliżeniu równa prędkości względnej silnika, czyli maleje wraz ze zmniejszaniem prędkości silnika.

1.2.3.2. Sterowanie przez zmianę napięcia zasilania obwodu twornika

Schemat układu połączeń oraz rodzinę charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego sterowanego przez zmianę napięcia zasilania obwodu twornika $U_t = \text{var}$ przedstawiono na rysunku 1.4. Podczas tego sterowania utrzymywana jest znamionowa wartość strumienia wzbudzenia $\phi_w = \phi_{wN} = \text{const}$, a obwód twornika nie zawiera rezystancji dodatkowej, czyli $R_d = 0$.

Z równań (1.4) i (1.6) wynika, że rodzina charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika dla różnych wartości napięcia twornika U_t stanowi zbiór prostych równoległych, czyli o takim samym nachyleniu. Ponieważ dopuszczalne jest tylko zmniejszanie napięcia zasilania poniżej wartości znamionowej napięcia twornika, przy tej metodzie sterowania możliwe jest więc tylko zmniejszanie prędkości kątowych silnika, czyli jest to regulacja prędkości „w dół”. Z przebiegu charakterystyk silnika wynika również, że zasilanie obwodu twornika napięciem o przeciwnej biegunowości $U_t < 0$ zapewnia zmianę kierunku prędkości kątowej silnika. Wskazuje to na możliwość uzyskania zmiany kierunku obrotów silnika przez zmianę biegunowości napięcia zasilania obwodu twornika przy zachowaniu niezmiennego kierunku i wartości strumienia wzbudzenia.



Rys. 1.4. Sterowanie silnikiem obcowzbudnym przez zmianę napięcia zasilania obwodu twornika: a) układ sterowania, b) rodzina charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych

Każdej wartości napięcia twornika U_t odpowiada inna wartość prędkości idealnego biegu jałowego silnika ω_0 . Po pominięciu strat jałowych silnika sprawność układu napędowego przy sterowaniu prędkością przez zmianę napięcia twornika

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_{0/U=U_t}}. \quad (1.10)$$

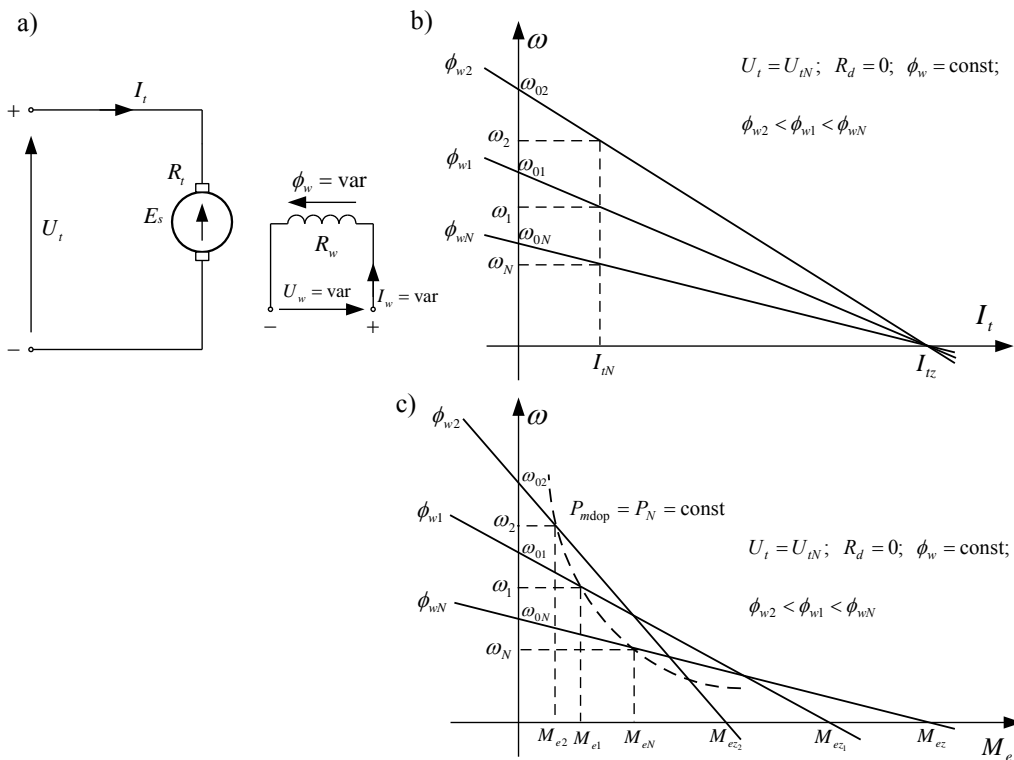
Przy sterowaniu przez zmianę napięcia twornika prędkości kątowne silnika ω dla danego napięcia zasilania są podczas pracy silnikowej w zakresie normalnych obciążeń nieco mniejsze od prędkości idealnego biegu jałowego dla tego napięcia. Sprawność napędu przy tym sposobie sterowania prędkością jest więc duża i zbliżona do sprawności znamionowej silnika. Do zalet tej metody sterowania zalicza się: możliwość uzyskiwania płynnej zmiany prędkości dla obu kierunków wirowania, stałe nachylenie charakterystyk mechanicznych silnika oraz duża sprawność układu regulacji.

1.2.3.3. Sterowanie przez zmianę strumienia wzbudzenia silnika

Schemat układu połączeń obwodów silnika oraz rodzinę charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika do sterowania przez zmianę strumienia wzbudzenia $\phi_w = \text{var}$ przedstawiono na rysunku 1.5. Podczas tego sterowania obwód twornika jest zasilany napięciem znamionowym ($U_t = U_{tN} = \text{const}$) i nie zawiera dodatkowej rezystancji ($R_d = 0$). Zmiana strumienia wzbudzenia silnika $\phi_w = \text{var}$ jest uzyskiwana przez zmianę prądu wzbudzenia silnika $I_w = \text{var}$. Po pominięciu zjawiska histerezy zależność strumienia wzbudzenia od prądu wzbudzenia $\phi_w(I_w)$ jest charakterystyką nieliniową o przebiegu zgodnym z charakterystyką magnesowania obwodu magnetycznego silnika. Dla typowych wykonania silników obcowzbudnych stosowane

jest wyłącznie zmniejszanie prądu wzbudzenia poniżej wartości znamionowej I_{wN} , czyli zmniejszanie („osłabianie”) strumienia wzbudzenia poniżej wartości znamionowej ϕ_{wN} . Zwiększanie strumienia wzbudzenia powyżej wartości znamionowej jest niecelowe z powodu nasycenia obwodu magnetycznego silnika. Wymagałoby to znacznego zwiększenia prądu wzbudzenia ponad wartość znamionową, co prowadzi do niedopuszczalnego wzrostu temperatury uzwojenia wzbudzenia silnika.

Rodzina charakterystyk elektromechanicznych silnika $\omega = f(I_t)$ dla różnych wartości strumienia wzbudzenia $\phi_w \leq \phi_{wN}$ tworzy zbiór prostych o różnych nachyleniach. Wszystkie proste przecinają oś prądu w jednym punkcie wyznaczającym prąd zwarcia twornika $I_{tz} = U_t/R_t$. Rodzina charakterystyk mechanicznych silnika $\omega = f(M_e)$ dla różnych wartości strumienia wzbudzenia $\phi_w \leq \phi_{wN}$ tworzy również zbiór prostych o różnych nachyleniach. Wszystkie te proste przecinają jednak oś momentu w różnych punktach, odpowiadających momentom zwarcia silnika M_{ez} dla poszczególnych wartości strumienia wzbudzenia ϕ_w .



Rys. 1.5. Sterowanie silnikiem obcowzbudnym przez zmianę strumienia wzbudzenia:
 a) układ sterowania, b) rodzina charakterystyk elektromechanicznych,
 c) rodzina charakterystyk mechanicznych

Regulacja prędkości kątowej silnika przez osłabianie strumienia wzbudzenia pozwala na uzyskiwanie prędkości kątowych o wyższych wartościach od otrzymywanych podczas pracy silnika na charakterystyce naturalnej. Ten sposób sterowania jest nazywany dlatego regulacją prędkości „w górę”. Wartość dopuszczalnego osłabienia strumienia wzbudzenia silnika jest ograniczona przez warunki wymagane dla poprawnej komutacji oraz dopuszczalną ze względów mechanicznych wartość maksymalnej prędkości kątowej silnika. Podczas pracy ustalonej przy zmniejszonej wartości strumienia wzbudzenia prąd twornika nie może przekraczać wartości znamionowej. Przy tym sposobie sterowania prędkością graniczne obciążenie silnika mocą mechaniczną P_{mdop} jest więc równe mocy znamionowej silnika $P_{mdop} = P_N = \text{const}$, a zależność dopuszczalnego momentu obciążenia silnika od prędkości kątowej ma charakter hiperboliczny (rys. 1.5c).

Do istotnych zalet regulacji prędkości kątowej silnika przez osłabianie strumienia wzbudzenia należy możliwość uzyskiwania płynnej regulacji prędkości oraz ekonomiczność układu sterowania, gdyż straty mocy występujące w obwodzie wzbudzenia stanowią małą część mocy znamionowej silnika. Sprawność układu napędowego przy tym sposobie sterowania jest określana w podobny sposób jak przy sterowaniu napięciowym.

1.2.4. Kształtowanie charakterystyk silnika obcowzbudnego w stanach hamowania elektrycznego

Kształtowanie charakterystyk mechanicznych silnika obcowzbudnego podczas stanów hamowania elektrycznego ma na celu uzyskanie możliwości sterowania wartością momentu elektromagnetycznego silnika i przebiegiem procesu hamowania. Wyróżnia się następujące podstawowe metody hamowania elektrycznego silnikiem obcowzbudnym prądu stałego:

- a) hamowanie odzyskowe (prądnicowe),
- b) hamowanie dynamiczne (rezystorowe),
- c) hamowanie przeciwwłączeniem (przeciwprądowe).

1.2.4.1. Hamowanie odzyskowe

Stan hamowania odzyskowego silnikiem obcowzbudnym występuje wtedy, gdy prędkość kątowa silnika ω jest większa od prędkości idealnego biegu jałowego silnika ω_0 dla danej wartości strumienia wzbudzenia i napięcia zasilania obwodu twornika. Podczas tego stanu siła elektromotoryczna twornika jest większa od napięcia zasilania $E_s > U_t$, co powoduje, że silnik pracuje jak prądnicą obcowzbudna. Prąd twornika jest wtedy zwracany do źródła zasilania, a moment elektromagnetyczny silnika jest skierowany przeciwnie do kierunku prędkości silnika, czyli jest momentem hamującym.

Charakterystyki elektromechaniczne i mechaniczne silnika dla stanu hamowania odzyskowego są położone w II lub w IV kwadrancie (odpowiednio do biegunowości napięcia zasilania obwodu twornika) i stanowią przedłużenie charakterystyk dla stanu

pracy silnikowej. Mimo wielu zalet ten sposób hamowania silnika nie zawsze może być stosowany. Warunkiem koniecznym uzyskania stanu hamowania odzyskowego jest zapewnienie możliwości zwrotu energii elektrycznej przez silnik do źródła zasilania, czyli przeciwnego niż podczas pracy silnikowej przepływu prądu twornika. Warunek ten może być spełniony tylko wtedy, gdy obwód twornika jest zasilany z baterii akumulatorów, generatora prądu stałego, prostownika sterowanego nawrotnego oraz prostownika sterowanego nienawrotnego, z przełączaniem obwodu twornika lub wzbudzenia.

1.2.4.2. Hamowanie dynamiczne

Schemat połączeń obwodów silnika obcowzbudnego podczas hamowania dynamicznego przedstawiono na rysunku 1.6a. Przełączenie silnika ze stanu pracy silnikowej do stanu hamowania dynamicznego uzyskuje się przez odłączenie obwodu twornika od źródła zasilania i zwarcie tego obwodu przez rezystor hamowania R_h o stałej lub nastawianej wartości rezystancji. Obwód wzbudzenia silnika podczas tego hamowania jest zasilany tak, jak podczas pracy silnikowej.

W trakcie hamowania do silnika jest dostarczana energia mechaniczna układu napędowego, która jest zamieniana na energię elektryczną, a następnie wytracana w postaci strat mocy na rezystancji hamowania R_h i rezystancji twornika R_t .

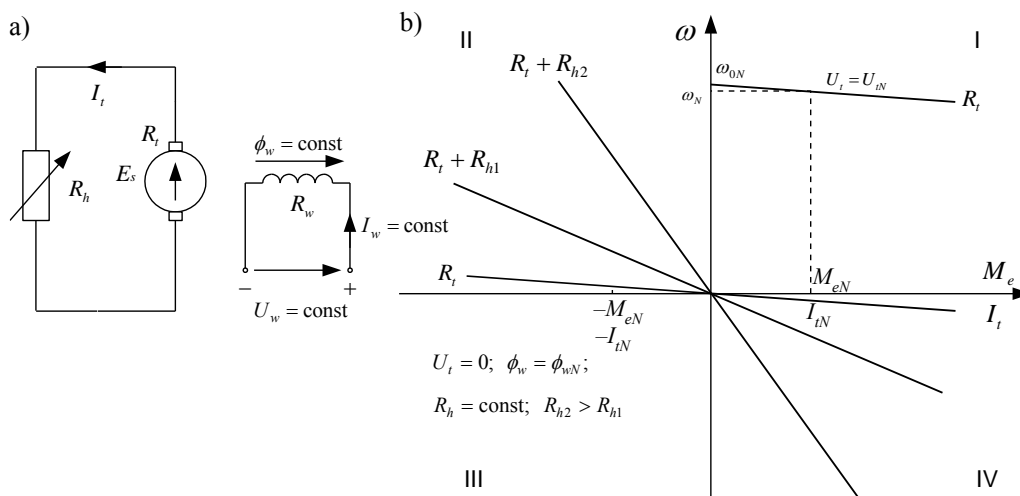
Równania charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego dla stanu hamowania dynamicznego mogą być wyznaczone z ogólnych równań charakterystyk silnika (1.4) i (1.6). W równaniach tych należy uwzględnić, że podczas tego hamowania obwód twornika jest zwarty, czyli $U_t = 0$, a wartość rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika jest równa rezystancji hamowania R_h . Otrzymuje się wtedy następujące równania charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego dla stanu hamowania dynamicznego:

$$\omega = \omega(I_t) = -\frac{R_t + R_h}{k_e \phi_w} I_t = -k_I I_t, \quad (1.11)$$

$$\omega = \omega(M_e) = -\frac{R_t + R_h}{(k_e \phi_w)^2} M_e = -k_M M_e. \quad (1.12)$$

Rodzinę charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika dla stanu hamowania dynamicznego przedstawiono na rysunku 1.6b.

Charakterystyki te tworzą zbiór prostych położonych w II i IV kwadrancie i przechodzących przez początek układu współrzędnych. Charakterystyki hamowania kształtuje się przez zmianę wartości rezystancji hamowania $R_h = \text{var}$, przy stałej znamionowej wartości strumienia wzbudzenia $\phi_w = \phi_{wN} = \text{const}$. Charakterystyka dla bezpośredniego zwarcia obwodu twornika ($R_h = 0$) jest równoległa do charakterystyki naturalnej silnika, przy zwiększaniu wartości rezystancji hamowania R_h otrzymuje się charakterystyki o coraz większym pochyleniu.



Rys. 1.6. Schemat połączeń (a) i charakterystyki silnika obcowzbudnego (b) podczas hamowania dynamicznego

Zaletą tej metody hamowania jest prostota układu i duża pewność pracy. Do istotnych wad należy natomiast zmniejszanie się wartości momentu hamującego silnika podczas zmniejszania prędkości kątowej silnika oraz brak możliwości uzyskania momentu hamującego w stanie zatrzymania silnika (przy prędkości $\omega = 0$).

1.2.4.3. Hamowanie przeciwwłączeniem

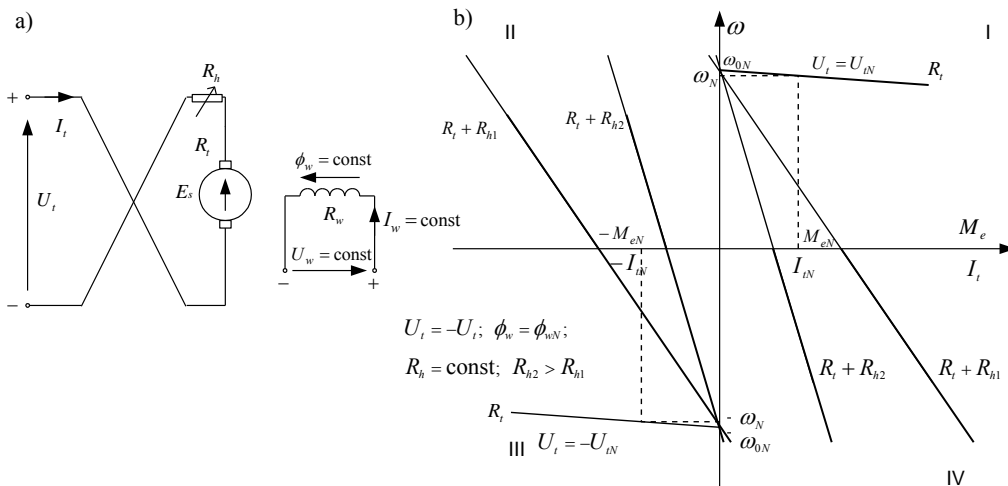
Schemat połączeń silnika obcowzbudnego dla stanu hamowania przeciwwłączeniem przedstawiono na rysunku 1.7a. Przełączenie ze stanu pracy silnikowej do stanu hamowania przeciwwłączeniem uzyskuje się najczęściej przez odłączenie obwodu twornika od źródła napięcia stałego i ponowne załączenie tego obwodu do źródła przy przeciwnej do poprzedniej biegunowości zasilania. W celu ograniczenia wartości prądu twornika, do obwodu twornika należy włączyć rezystor hamowania R_h o stałej lub nastawianej wartości rezystancji. Podczas hamowania obwód wzbudzenia silnika nie jest przełączany i jest zasilany w taki sam sposób jak podczas pracy silnikowej.

Jeżeli podczas stanu hamowania przeciwwłączeniem twornik silnika jest zasilany napięciem o przeciwnej biegunowości z równania napięciowego silnika (1.1), otrzymuje się wyrażenie określające prąd twornika

$$I_t = -\frac{U_t + E_s}{R_t + R_h}, \quad (1.13)$$

z którego wynika, że zwrot prądu twornika jest przeciwny do występującego podczas pracy silnikowej, a moment elektromagnetyczny silnika jest momentem hamującym. Wartość bezwzględna prądu twornika jest proporcjonalna do sumy napięcia zasilania obwodu twornika U_t i siły elektromotorycznej E_s . Z tych względów w celu ogranicze-

nia maksymalnej wartości prądu twornika i momentu do obwodu twornika należy dołączyć odpowiednią rezystancję hamowania R_h . Podczas hamowania przeciwwłączeniem do silnika jest doprowadzana energia z dwóch stron: energia mechaniczna od układu napędowego i energia elektryczna ze źródła napięcia stałego zasilającego obwód twornika. Suma tych energii jest wytracana w postaci strat mocy na rezystancji hamującej i rezystancji uzwojenia twornika. Straty mocy od tej energii są duże i dlatego hamowanie przeciwwłączeniem nie jest ekonomiczne.



Rys. 1.7. Schemat (a) i charakterystyki silnika obcowzbudnego (b) dla stanu hamowania przeciwwłączeniem

Równania charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego dla stanu hamowania przeciwwłączeniem mogą być wyznaczone z równań ogólnych (1.4) i (1.6), po uwzględnieniu w nich warunku, że napięcie zasilające obwód twornika ma przeciwną biegunowość, a $R_d = R_h$. Otrzymuje się wtedy następujące równania charakterystyk silnika obcowzbudnego dla hamowania przeciwwłączeniem:

$$\omega = \omega(I_t) = -\frac{U_t}{k_e \phi_w} - \frac{R_t + R_h}{k_e \phi_w} I_t = -\omega_0 - k_I I_t, \quad (1.14)$$

$$\omega = \omega(M_e) = -\frac{U_t}{k_e \phi_w} - \frac{R_t + R_h}{(k_e \phi_w)^2} M_e = -\omega_0 - k_M M_e. \quad (1.15)$$

Przebiegi charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika, wyznaczone dla bezwzględnej wartości napięcia twornika równej znamionowej $U_t = U_{tN} = \text{const}$ oraz znamionowej wartości strumienia wzbudzenia $\phi_w = \phi_{wN} = \text{const}$ i różnych wartościach rezystancji hamowania $R_h = \text{var}$ przedstawiono na rysunku 1.7b. Charakterystyki hamowania są położone w II kwadrancie i tworzą zbiór prostych o różnych

nachyleniach, zależnych od wartości rezystancji hamowania R_h . Są one przedłużeniem charakterystyk dla stanu pracy silnikowej, określonych dla zasilania obwodu twornika napięciem o przeciwnej biegunowości. W IV kwadrancie przedstawiono dodatkowo charakterystyki silnika dla stanu hamowania przeciwwłączeniem, które uzyskuje się bez przełączania biegunowości napięcia zasilania twornika wówczas, gdy silnik jest obciążony momentem o działaniu czynnym.

Zaletą tej metody hamowania jest prostota oraz duża skuteczność układu hamowania. Układ ten zapewnia możliwość uzyskania momentu hamującego przy wszystkich wartościach prędkości oraz w stanie zatrzymania układu napędowego. Istotną wadą tej metody hamowania jest konieczność odłączenia obwodu twornika od źródła zasilania przed lub w chwili osiągnięcia przez silnik prędkości zerowej w celu uniknięcia niepożądanego rozruchu silnika w przeciwnym kierunku wirowania.

1.3. Instrukcja

1.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat układu pomiarowego do badań silnika obcowzbudnego prądu stałego w stanach pracy silnikowej przedstawiono na rysunku 1.8, a do badań silnika w stanach hamowania dynamicznego i hamowania przeciwwłączeniem na rysunku 1.9.

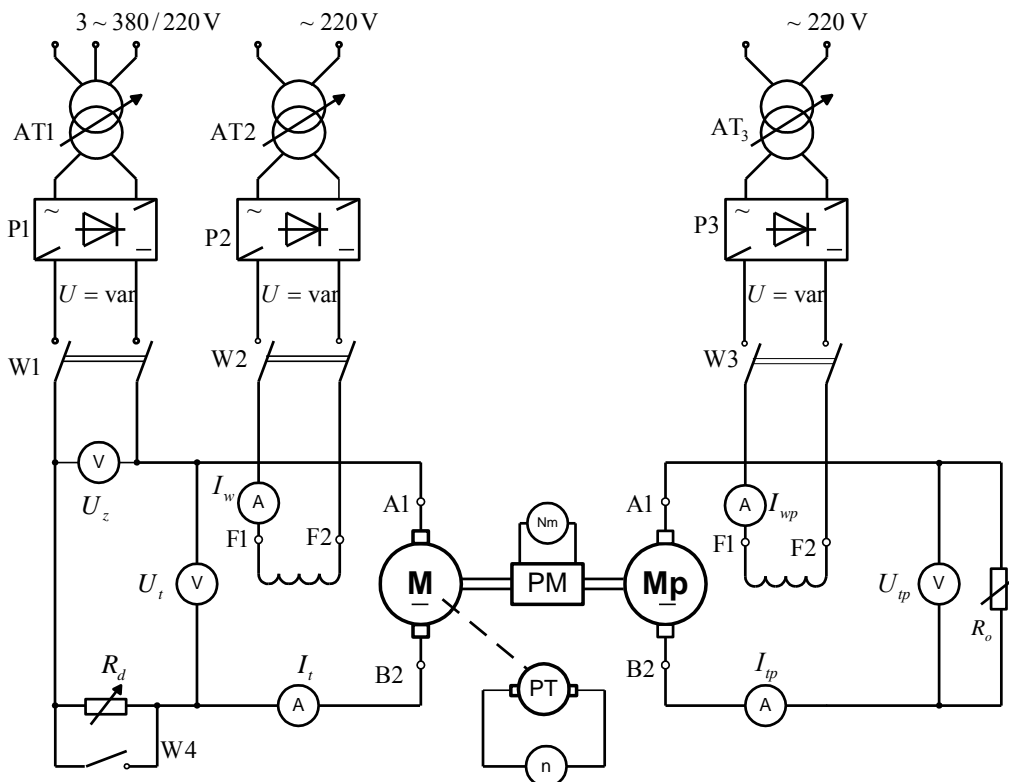
Część mechaniczna układu laboratoryjnego składa się z dwóch połączonych z sobą mechanicznie maszyn obcowzbudnych prądu stałego: silnika badanego M i maszyny pomocniczej M_p . Do pomiaru prędkości obrotowej silnika służy prądnica tachometryczna PT z miernikiem prędkości obrotowej n . W układzie może być zastosowany przetwornik momentu PM i miernik momentu mechanicznego N_m . W razie braku przetwornika momentu wartości momentu silnika należy wyznaczać obliczeniowo na podstawie bilansu mocy.

1.3.2. Wyznaczanie charakterystyk silnika obcowzbudnego w stanach pracy silnikowej

1.3.2.1. Uruchomienie układu laboratoryjnego

Badania wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1.8. Silnik badany M jest wtedy obciążony maszyną M_p , pracującą jako obcowzbudna prądnica prądu stałego, która oddaje energię do rezystancji obciążenia R_o . Uruchomienie układu pomiarowego rozpoczyna się od załączenia obwodu wzbudzenia i nastawienia znamionowej wartości I_{wN} prądu wzbudzenia silnika M . Następnie należy załączyć obwód twornika silnika M i za pomocą autotransformatora $AT1$ dokonać

rozruchu napięciowego silnika aż do uzyskania wartości znamionowej napięcia twornika U_{tN} . Po zakończeniu rozruchu załączyć obwód wzbudzenia maszyny Mp i nastawić taką wartość prądu wzbudzenia, aby napięcie twornika nie przekraczało wartości znamionowej tej maszyny. Wartość rezystancji obciążenia prądnicy R_o powinna być wstępnie nastawiona na wartość maksymalną.



Rys. 1.8. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk silnika obcowzbudnego w stanach pracy silnikowej

1.3.2.2. Wyznaczenie charakterystyk naturalnych oraz znamionowych wielkości elektromagnetycznych i mechanicznych silnika

Celem badań jest wyznaczenie naturalnej charakterystyki elektromechanicznej $\omega = f(I_t)$ i mechanicznej $\omega = f(M_e)$ silnika obcowzbudnego. Podczas wyznaczania tych charakterystyk należy utrzymywać znamionową wartość napięcia zasilania twornika $U_t = U_{tN}$, znamionową wartość prądu wzbudzenia $I_w = I_{wN}$, a wartość rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika powinna być równa zero – $R_d = 0$. Pomiary wykonywać przez stopniowe zwiększanie obciążenia silnika M maszyną Mp aż do wartości granicznej prądu twornika $I_t \leq 1,2I_{tN}$.

Przebieg naturalnej charakterystyki elektromechanicznej silnika $\omega = f(I_t)$ wyznacza się bezpośrednio na podstawie wyników pomiarów. W przypadku możliwości pomiaru momentu mechanicznego M na wale silnika należy wyznaczyć również przebieg charakterystyki $\omega = f(M)$. Przebieg naturalnej charakterystyki mechanicznej $\omega = f(M_e)$ wyznacza się obliczeniowo na podstawie przeliczenia w podany poniżej sposób zmierzonych wartości prądu twornika I_t na wartości momentu elektromagnetycznego M_e .

Moment elektromagnetyczny M_e silnika dla danej wartości prądu twornika I_t i znamionowej wartości strumienia wzbudzenia ϕ_{wN} oblicza się następująco

$$M_e = k_e \phi_{wN} I_t = c_M I_t. \quad (1.16)$$

Znamionowa wartość stałej momentu c_M może być wyznaczona pomiarowo lub obliczona z zależności

$$c_M = k_e \phi_{wN} = \frac{E_{sN}}{\omega_N} = \frac{U_{tN} - R_t I_{tN}}{\omega_N}, \quad (1.17)$$

w której ω_N – znamionowa prędkość kątowna silnika.

Gdy rzeczywista wartość rezystancji twornika R_t nie jest znana, wówczas przybliżoną wartość tej rezystancji można obliczyć z wzoru

$$R_t = 0,5(1 - \eta_N) \frac{U_{tN}}{I_{tN}}, \quad (1.18)$$

w którym:

$$\eta_N = \frac{P_N}{U_{tN} I_{tN}}, \quad (1.19)$$

η_N – znamionowa sprawność silnika,

P_N – moc znamionowa na wale silnika, W.

Znamionowy moment elektromagnetyczny silnika M_{eN} jest momentem wytwarzanym przy znamionowej wartości prądu twornika i strumienia wzbudzenia

$$M_{eN} = k_e \phi_{wN} I_{tN} = c_M I_{tN}. \quad (1.20)$$

Znamionowy moment mechaniczny M_N na wale silnika oblicza się z zależności

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N}. \quad (1.21)$$

Na podstawie wyznaczonej pomiarowo naturalnej charakterystyki elektromechanicznej $\omega = f(I_t)$ należy wyznaczyć ustepliwość względną u tej charakterystyki

$$u = \frac{\omega(I_t = 0) - \omega(I_t = I_{tN})}{\omega_N} 100\%. \quad (1.22)$$

Wartość ustępliwości względnej u należy porównać z wartością znamionowej ustępliwości względnej u_N charakterystyki naturalnej, określonej zależnością

$$u_N = \frac{\omega_{0N} - \omega_N}{\omega_N} 100\%. \quad (1.23)$$

Znamionową prędkość kątową idealnego biegu jałowego ω_{0N} oblicza się na podstawie danych znamionowych silnika ze wzoru

$$\omega_{0N} = \frac{U_{tN}}{k_e \phi_{wN}} = \frac{U_{tN}}{c_M} = \omega_N \frac{U_{tN}}{U_{tN} - R_t I_{tN}}. \quad (1.24)$$

1.3.2.3. Wyznaczenie charakterystyk silnika do sterowania przez zmianę rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika

Celem badań jest wyznaczenie rodziny sztucznych charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ i mechanicznych $\omega = f(M_e)$ dla różnych wartości rezystancji dodatkowej $R_d = \text{var}$ dołączonej do obwodu twornika silnika. Wartość tej rezystancji jest nastawiana za pomocą rezystora R_d przy otwartym łączniku W4. Podczas pomiarów należy utrzymywać znamionową wartość napięcia zasilania obwodu twornika $U_z = U_{tN}$ i znamionową wartość prądu wzbudzenia $I_w = I_{wN}$ silnika.

Pomiary do wyznaczenia przebiegu charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ dla różnych wartości rezystancji $R_d = \text{const}$ należy wykonywać przez stopniowe zwiększanie obciążenia silnika M maszyną Mp aż do wartości granicznej prądu twornika $I_t \leq 1,2I_{tN}$. Wartość rezystancji R_d włączonej do obwodu twornika można określić na podstawie pomiaru napięcia U_R na tej rezystancji i prądu twornika I_t

$$R_d = \frac{U_R}{I_t} = \frac{U_z - U_t}{I_t}. \quad (1.25)$$

Na podstawie pomiarów należy na wspólnym wykresie przedstawić przebiegi naturalnej i sztucznych charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ dla różnych wartości rezystancji R_d . Po przeliczeniu prądu twornika na moment elektromagnetyczny według równań (1.16) i (1.17) wyznaczyć również przebiegi charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_e)$. Dla każdej charakterystyki elektromechanicznej wyznaczyć ustępliwość względną charakterystyki u i porównać z wartością ustępliwości znamionowej u_N . Z wykresów charakterystyk elektromechanicznych dla różnych wartości $R_d = \text{const}$ należy graficznie określić wartości uzyskiwanych prędkości kątowych silnika dla wybranych wartości prądu twornika oraz odpowiadające im sprawności układu napędowego. Sprawność układu otrzymuje się z wzoru (1.9), który można zapisać w postaci

$$\eta = \eta(\omega) = \frac{\omega(I_t = kI_{tN})}{\omega_{0N}(I_t = 0)}. \quad (1.26)$$

W sprawozdaniu należy wyznaczyć wartości prędkości kątowych i sprawności układu odpowiadające pracy silnika na charakterystyce naturalnej i charakterystykach sztucznych dla obciążeń względnych równych odpowiednio: $k = I_t/I_{tN} = M_e/M_{eN} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$.

1.3.2.4. Wyznaczenie charakterystyk silnika do sterowania przez zmianę napięcia twornika

Celem badań jest wyznaczenie rodziny sztucznych charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ i charakterystyk mechanicznych silnika $\omega = f(M_e)$ dla różnych wartości napięcia obwodu twornika U_t oraz charakterystyki sterowania $\omega = f(U_t)$. Podczas pomiarów należy utrzymywać znamionową wartość prądu wzbudzenia $I_w = I_{wN}$, a wartość rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika powinna być równa zero – $R_d = 0$.

Pomiary charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ wykonać dla kilku nastawień napięcia zasilania obwodu twornika $U_t = \text{const}$ zawartych w przedziale $0 \leq U_t \leq U_{tN}$. Podczas wyznaczania przebiegu danej charakterystyki należy stopniowo zwiększać obciążenie silnika M przez maszynę pomocniczą M_p aż do wartości granicznej prądu twornika $I_t \leq 1,2I_{tN}$. Po przeliczeniu prądu twornika na moment elektromagnetyczny należy wyznaczyć przebiegi charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_e)$. Dla wyznaczonej pomiarowo rodziny charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ obliczyć na podstawie wzoru (1.22) ustępliwość względną u każdej charakterystyki i porównać ze znamionową ustępliwością względną u_N . Z wykresów charakterystyk należy według wzoru (1.10) wyznaczyć graficznie sprawności układu napędowego dla pracy na charakterystyce naturalnej i charakterystykach sztucznych, przy obciążeniach względnych silnika równych odpowiednio: $k = I_t/I_{tN} = M_e/M_{eN} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$.

Pomiary charakterystyki sterowania prędkością silnika przez zmianę napięcia twornika $\omega = f(U_t)$, $\phi_w = \phi_{wN} = \text{const}$ wykonuje się dla stanu pracy jałowej silnika M (maszyna M_p niewzbudzona, a rezystor R_o nastawiony na maksymalną wartość). Podczas pomiarów należy zmniejszać stopniowo napięcie zasilania U_t od wartości znamionowej aż do wartości równej zero.

1.3.2.5. Wyznaczenie charakterystyk do sterowania silnika przez zmianę wartości strumienia wzbudzenia

Celem badań jest wyznaczenie rodziny charakterystyk elektromechanicznych silnika $\omega = f(I_t)$ dla różnych wartości strumienia wzbudzenia $\phi_w = \text{var}$ oraz charakterystyki sterowania prędkością $\omega = f(I_w)$. Podczas wyznaczania tych charakterystyk należy utrzymywać stałe napięcie twornika, równe wartości znamionowej $U_t = U_{tN}$, a rezystancja dodatkowa R_d w obwodzie twornika powinna być równa zero.

Pomiary charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ należy wykonać dla kilku nastawień wartości prądu wzbudzenia silnika zawartych w przedziale $I_{w\text{min}} \leq I_w \leq I_{wN}$. Podczas wyznaczania przebiegu danej charakterystyki należy stopniowo zwiększać obciążenie silnika M za pomocą maszyny pomocniczej M_p , aż do wartości granicznej

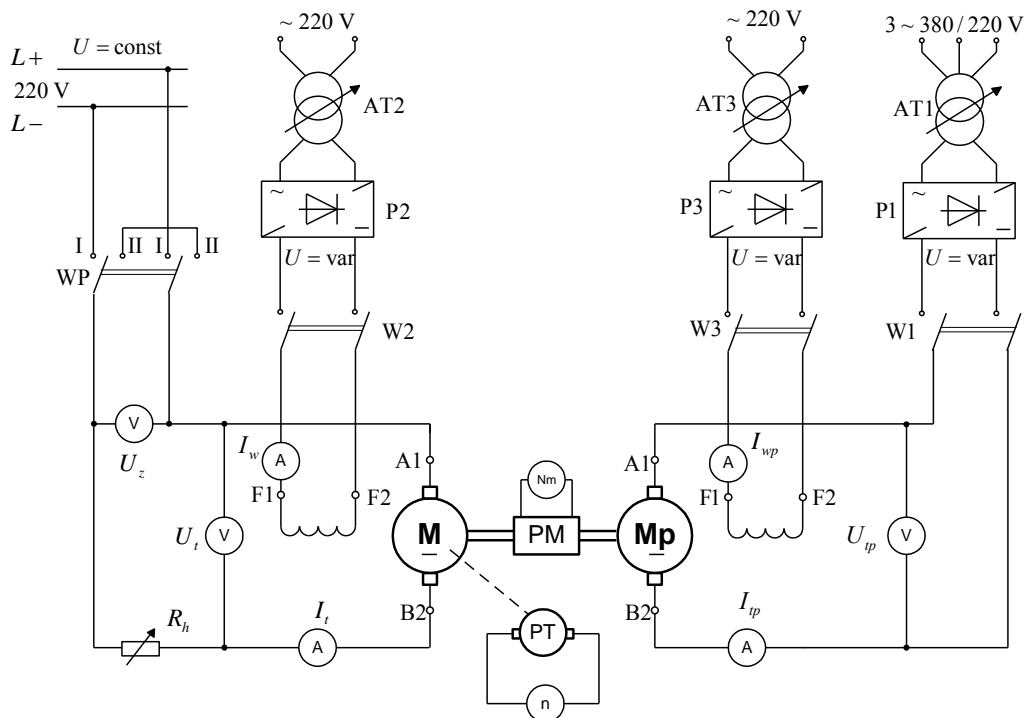
prądu twornika $I_t \leq 1,2I_{tN}$. Dla wyznaczonej rodziny charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ obliczyć według wzoru (1.22) uścipliwność względną u każdej charakterystyki i porównać z wartością znamionowej uścipliwności względnej u_N .

Pomiary charakterystyki sterowania $\omega = f(I_w)$ wykonuje się dla stanu biegu jałowego silnika M przy zasilaniu obwodu twornika napięciem znamionowym. Pomiary należy wykonywać, zmniejszając stopniowo prąd wzbudzenia silnika od wartości znamionowej $I_w = I_{wN}$ aż do wartości minimalnej I_{wmin} , której odpowiada maksymalna, dopuszczalna dla danego typu silnika wartość prędkości kątowej ω_{max} . Wartość prędkości ω_{max} jest podawana przez producenta silnika, a jeśli nie jest znana, można przyjąć orientacyjnie, że $\omega_{max} \approx 1,5\omega_N$.

1.3.3. Wyznaczenie charakterystyk silnika obcowzbudnego prądu stałego dla stanów hamowania dynamicznego

1.3.3.1. Uruchomienie układu laboratoryjnego

Pomiary charakterystyk silnika M w stanach hamowania dynamicznego wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1.9.



Rys. 1.9. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk silnika obcowzbudnego prądu stałego w stanach hamowania dynamicznego i hamowania przeciwwłazaniem

Podczas badań przełącznik WP powinien być ustawiony w położenie II, odpowiadające zwarciu obwodu twornika silnika M przez rezystor hamowania R_h o nastawianej wartości. Silnik M jest napędzany przez maszynę Mp, która pracuje jako obcowzbudny silnik prądu stałego.

W celu uruchomienia układu należy załączyć obwód wzbudzenia maszyny Mp i nastawić znamionową wartość prądu wzbudzenia I_{wpN} . Następnie, za pomocą autotransformatora AT1, dokonać rozruchu napięciowego maszyny Mp aż do wartości $U_{tp} \leq U_{tpN}$, przy której prędkość układu napędowego będzie zbliżona do prędkości znamionowej ω_N badanego silnika M lub jej równa.

1.3.3.2. Wyznaczenie charakterystyk hamowania dynamicznego do sterowania przez zmianę rezystancji hamowania

Celem badań jest wyznaczenie rodziny charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ i charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_e)$ dla stanów hamowania dynamicznego silnika M przy różnych wartościach rezystancji hamowania $R_h = \text{var}$ w obwodzie twornika. Podczas pomiarów tych charakterystyk należy utrzymywać stałą, równą znamionowej wartość strumienia wzbudzenia ϕ_{wN} , czyli znamionową wartość prądu wzbudzenia silnika $I_w = I_{wN}$.

Przebieg charakterystyki elektromechanicznej $\omega = f(I_t)$ dla stałej, nastawionej wartości R_h , wyznacza się przez stopniowe zmniejszanie prędkości kątowej silnika M aż do zera. Prędkość zmniejsza się przez obniżanie autotransformatorem AT1 napięcia zasilającego obwód twornika maszyny Mp. Wartość nastawionej rezystancji hamowania R_h można wyznaczyć z wzoru $R_h = U_t/I_t$ na podstawie pomiaru napięcia twornika U_t i prądu twornika I_t silnika M.

Pomiary należy powtórzyć dla innych nastawień wartości rezystancji hamowania R_h oraz dla hamowania na charakterystyce naturalnej silnika (przy $R_h = 0$). Pomiary tych charakterystyk należy rozpoczynać od nastawienia takiej prędkości początkowej silnika M, przy której $I_t \leq 1,2I_{tN}$.

Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ dla hamowania dynamicznego wyznacza się na podstawie przeliczenia prądu twornika na moment elektromagnetyczny za pomocą zależności (1.16)–(1.17).

Na podstawie pomiarów wyznaczyć przebiegi charakterystyk mocy elektrycznej wytracanej w układzie hamowania w funkcji prędkości kątowej silnika $P_h(\omega)$ przy stałej wartości rezystancji hamowania $R_h = \text{const}$

$$P_h = P_h(\omega) = U_t I_t + I_t^2 R_t = I_t^2 (R_t + R_h), \quad (1.27)$$

gdzie U_t , I_t – napięcie i prąd twornika silnika M zmierzone przy prędkości kątowej ω podczas hamowania dynamicznego.

1.3.4. Wyznaczenie charakterystyk silnika obcowzbudnego prądu stałego dla stanów hamowania przeciwwłączeniem

1.3.4.1. Uruchomienie układu laboratoryjnego

Pomiary charakterystyk silnika M dla stanów hamowania przeciwwłączeniem wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1.9. Podczas badań silnik M jest napędzany przez maszynę Mp, która pracuje jako obcowzbudny silnik prądu stałego. Przełącznik WP powinien być ustawiony w położenie I, odpowiadające zasilaniu obwodu twornika silnika M podczas stanu hamowania przeciwwłączeniem napięciem o przeciwnej biegunowości. Dla ograniczenia prądu w obwodzie twornika silnika M powinna być włączona dostatecznie duża wartość rezystancji hamowania R_h . Wartość tej rezystancji może być wstępnie dobrana z warunku $R_h \geq 2U_{tN}/(1,2I_{tN})$.

W celu uruchomienia układu pomiarowego należy załączyć obwód wzbudzenia maszyny Mp i nastawić znamionową wartość prądu wzbudzenia I_{wpN} . Następnie dokonać rozruchu napięciowego maszyny Mp aż do wartości $U_{tp} \leq U_{tpN}$, przy której prędkość układu napędowego będzie zbliżona do prędkości znamionowej ω_N badanego silnika M lub jej równa.

1.3.4.2. Wyznaczenie charakterystyk hamowania przeciwwłączeniem do sterowania przez zmianę rezystancji hamowania

Celem badań jest wyznaczenie rodziny charakterystyk elektromechanicznych $\omega = f(I_t)$ i charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_e)$ dla stanów hamowania przeciwwłączeniem silnika M przy różnych wartościach rezystancji hamowania $R_h = \text{var}$ w obwodzie twornika. Pomiary tych charakterystyk powinny być wyznaczone przy stałej, równej znamionowej wartości strumienia wzbudzenia ϕ_{wN} (czyli stałej znamionowej wartości prądu wzbudzenia I_{wN}) i stałej wartości napięcia sieci $U_z = \text{const}$.

Po uruchomieniu układu pomiarowego należy załączyć obwód wzbudzenia silnika M i nastawić znamionową wartość prądu wzbudzenia silnika I_{wN} . Po przełączeniu przełącznika WP w położenie I nastawić taką wartość rezystancji hamowania R_h , aby początkowa wartość prądu twornika $I_t \leq 1,2I_{tN}$. Pomiary charakterystyki elektromechanicznej $\omega = f(I_t)$ dla danej wartości rezystancji hamowania R_h wykonuje się przez stopniowe zmniejszanie prędkości kątowej układu napędowego aż do zera. Wartość nastawionej rezystancji hamowania R_h w obwodzie twornika silnika M można wyznaczyć z wzoru $R_h = (U_z + U_t)/I_t$ na podstawie pomiaru napięć U_z , U_t oraz prądu I_t . Pomiary powtórzyć dla innych nastawień wartości rezystancji R_h . Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ dla hamowania przeciwwłączeniem należy wyznaczyć przez przeliczenie wartości prądów twornika I_t na wartości momentu elektromagnetycznego M_e .

Na podstawie pomiarów wyznaczyć przebiegi charakterystyk mocy elektrycznej wytracanej w układzie hamowania w funkcji prędkości kątowej silnika $P_h(\omega)$ przy stałej wartości rezystancji hamowania $R_h = \text{const}$

$$P_h = P_h(\omega) = (U + U_t)I_t + I_t^2 R_t = I_t^2 (R_t + R_h), \quad (1.28)$$

gdzie:

U – napięcie sieci prądu stałego,

U_t, I_t – napięcie i prąd twornika silnika M zmierzone przy prędkości ω podczas hamowania przeciwwłóceniem.

1.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

1. Parametry badanego układu pomiarowego.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schematy układów pomiarowych.
4. Tabele z wynikami pomiarów i wynikami obliczeń.
5. Zestawienie wyznaczonych lub obliczonych znamionowych wielkości elektromagnetycznych i stałych silnika (moment znamionowy M_N , znamionowy moment elektromagnetyczny M_{eN} , prędkość znamionowa ω_N , prędkość idealnego biegu jałowego ω_{0N} , sprawność znamionowa η_N , znamionowa stała momentu c_M , znamionowa względna ustępliwość naturalnej charakterystyki elektromechanicznej u_N).

6. Wykresy charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych oraz charakterystyk sterowania silnikiem podczas stanów pracy silnikowej:

- a) $\omega = f(I_t)$ i $\omega = f(M_e)$ dla $U_t = U_{tN}$, $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_d = \text{var}$;
- b) $\omega = f(I_t)$ i $\omega = f(M_e)$ dla $U_t = \text{var}$, $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_d = 0$ oraz $\omega = f(U_t)$ dla $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_d = 0$, $M \approx 0$;
- c) $\omega = f(I_t)$ i $\omega = f(M_e)$, dla $U_t = U_{tN}$, $\phi_w = \text{var}$, $R_d = 0$ oraz $\omega = f(I_w)$ dla $U_t = U_{tN}$, $R_d = 0$, $M \approx 0$;
- d) obliczenia ustępliwości względnej u charakterystyk i sprawności układu napędowego η dla poszczególnych metod sterowania prędkością silnika.

7. Wykresy charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych oraz charakterystyk strat mocy silnika podczas stanów hamowania dynamicznego:

- a) $\omega = f(I_t)$ i $\omega = f(M_e)$ dla $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_h = \text{var}$;
- b) $P_h = f(\omega)$ dla $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_h = \text{var}$.

8. Wykresy charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika oraz charakterystyk strat mocy podczas stanów hamowania przeciwwłóceniem:

- a) $\omega = f(I_t)$ i $\omega = f(M_e)$ dla $U_z = U_{tN}$, $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_h = \text{var}$;
- b) $P_h = f(\omega)$ dla $U_z = U_{tN}$, $\phi_w = \phi_{wN}$, $R_h = \text{var}$.

9. Porównanie metod sterowania silnikiem obcowzbudnym prądu stałego w stanach pracy silnikowej (porównać usterpliwości charakterystyk i sprawności układu napędowego dla poszczególnych metod sterowania).

10. Porównanie metody hamowania dynamicznego i przeciwwłóceniem silnikiem obcowzbudnym (porównanie przebiegów charakterystyk hamowania, wartości wymaganych rezystancji hamowania i strat mocy hamowania).

11. Własne spostrzeżenia i wnioski.

1.5. Zagadnienia kontrolne

1. Podać definicję charakterystyki elektromechanicznej i mechanicznej silnika obcowzbudnego oraz równania określające przebiegi tych charakterystyk.

2. Omówić metody kształtowania charakterystyk silnika obcowzbudnego i ich zastosowanie w stanach pracy silnikowej.

3. Narysować przebiegi charakterystyk elektromechanicznych i mechanicznych silnika obcowzbudnego dla różnych metod sterowania prędkością.

4. Przedstawić metody hamowania elektrycznego silnikiem obcowzbudnym.

5. Przedstawić układ hamowania dynamicznego silnikiem obcowzbudnym i omówić sposoby kształtowania przebiegów charakterystyk dla tej metody hamowania.

6. Przedstawić układ hamowania przeciwwłóceniem silnikiem obcowzbudnym i omówić sposoby kształtowania przebiegów charakterystyk dla tej metody hamowania.

Literatura

[1] Bielawski S., *Teoria napędu elektrycznego*, WNT, Warszawa 1978.

[2] Gogolewski Z., Kuczewski Z., *Napęd elektryczny*, WNT, Warszawa 1971.

[3] Kędzior W., *Podstawy napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.

[4] *Napęd elektryczny*, praca zbiorowa pod redakcją Z. Grunwalda, WNT, Warszawa 1987.