

Ćwiczenie 9

Układy elektrycznego hamowania silników indukcyjnych

9.1. Program ćwiczenia

1. Poznanie metod i układów elektrycznego hamowania silników indukcyjnych.
2. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego podczas hamowania odzyskowego.
3. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego podczas hamowania przeciwwłączeniem.
4. Badanie właściwości i wyznaczenie charakterystyk silnika indukcyjnego podczas hamowania dynamicznego prądem stałym.
5. Badanie układów hamowania silnika indukcyjnego prądem stałym z zastosowaniem energoelektronicznych urządzeń do regulowanego hamowania.

9.2. Wiadomości teoretyczne

9.2.1. Wprowadzenie

Hamowanie elektryczne silnika indukcyjnego polega na wymuszeniu takiego stanu pracy, podczas którego moment elektromagnetyczny silnika jest skierowany przeciwnie do kierunku prędkości kątowej wirnika. Rozróżnia się następujące podstawowe metody hamowania elektrycznego silników indukcyjnych:

- hamowanie odzyskowe (generatorowe, prądnicowe, nadsynchroniczne),
- hamowanie przeciwwłączeniem (przeciwprądowe, hamowanie prądem sieci),
- hamowanie dynamiczne prądem stałym,

- hamowanie dynamiczne prądem przemiennym (jednofazowe),
- hamowanie w układzie z przełączaną fazą stojana (hamowanie z odwróconą fazą stojana, hamowanie niesymetryczne).

Program niniejszego ćwiczenia nie obejmuje badania układów hamowania dynamicznego prądem przemiennym oraz hamowania w układzie z przełączaną fazą stojana, ponieważ te badania opisano w ćwiczeniu 10.

Dla wszystkich stanów pracy symetrycznego silnika indukcyjnego zasilanego napięciami trójfazowymi sinusoidalnie zmiennymi zależność momentu elektromagnetycznego silnika M_e od poślizgu s (z pominięciem wpływu rezystancji fazowej uzwojenia stojana) określa uproszczone równanie Klossa

$$M_e = M_e(s) = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (9.1)$$

w którym:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}, \quad (9.2)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p_b}, \quad n_s = \frac{60 f_s}{p_b}, \quad (9.3)$$

- M_k – moment krytyczny silnika,
- s_k – poślizg krytyczny silnika,
- ω_s, n_s – synchroniczna prędkość kątowa i obrotowa,
- ω, n – kątowa i obrotowa prędkość mechaniczna wirnika,
- f_s – częstotliwość napięcia zasilania,
- p_b – liczba par biegunów silnika.

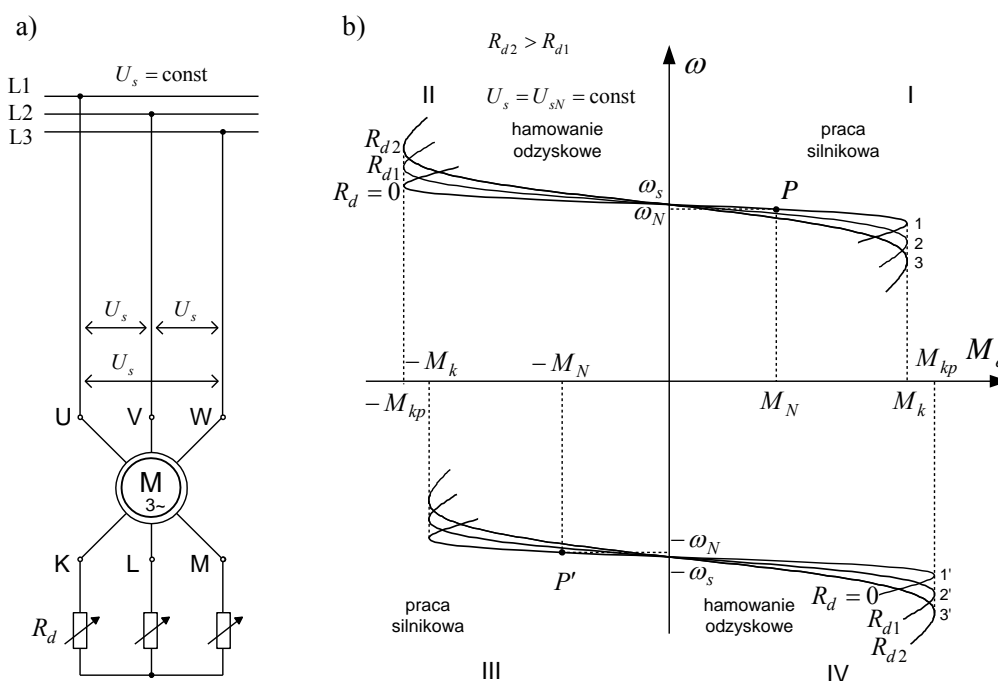
Równaniem Klossa (9.1) nie można się posługiwać w analizie stanów hamowania elektrycznego, w których silnik indukcyjny jest zasilany napięciem stałym lub napięciem przemiennym jednofazowym. Wyznaczenie zależności określającej moment elektromagnetyczny silnika wymaga w tych przypadkach wprowadzenia do analizy tzw. zastępczego stanu pracy silnika lub zastosowania metody składowych symetrycznych.

9.2.2. Hamowanie odzyskowe silnika indukcyjnego

Stan hamowania odzyskowego silnika indukcyjnego występuje wtedy, gdy silnik jest zasilany symetrycznym napięciem trójfazowym, a prędkość mechaniczna wirnika silnika jest większa od prędkości synchronicznej silnika ($\omega > \omega_s$ lub $n > n_s$), czyli poślizg silnika jest ujemny ($s < 0$). Z równania (9.1) wynika, że moment elektromagne-

tyczny silnika wytwarzany przy ujemnych wartościach poślizgu jest momentem hamującym ($M_e < 0$).

Podczas stanu hamowania odzyskowego silnik indukcyjny pracuje jak generator indukcyjny i dokonuje zamiany energii mechanicznej, dostarczanej przez układ mechaniczny, na energię elektryczną zwracaną następnie do sieci zasilającej. Do sieci jest zwracana tylko moc czynna, z sieci natomiast stale jest pobierana moc bierna, wymagana do wytworzenia w szczelinie silnika wirującego pola magnetycznego. Układ połączeń obwodów i charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego pierścieniowego $\omega = f(M_e)$ dla stanu pracy silnikowej i hamowania odzyskowego przedstawiono na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Hamowanie odzyskowe silnikiem indukcyjnym:

- a) układ połączeń silnika podczas pracy silnikowej i hamowania odzyskowego,
- b) charakterystyki mechaniczne silnika dla stanu pracy silnikowej i hamowania odzyskowego

Charakterystyki mechaniczne dla stanu hamowania odzyskowego są położone w II i IV kwadrancie układu współrzędnych (ω, M_e) i są przedłużeniem charakterystyk dla stanu pracy silnikowej. Charakterystyki 1, 1' są charakterystykami naturalnymi, a charakterystyki 2, 3 i 2', 3' są charakterystykami sztucznymi, które uzyskuje się przez włączenie do obwodu wirnika silnika indukcyjnego pierścieniowego dodatkowych rezystorów trójfazowych R_d .

Stan hamowania odzyskowego można uzyskać wtedy, gdy:

- silnik indukcyjny napędza maszynę roboczą o czynnym momencie oporowym, powodującym zwiększenie prędkości mechanicznej wirnika ponad prędkość synchroniczną (np. napęd mechanizmu opuszczania w dźwignicy, napęd przenośnika taśmowego transportującego w dół itp.),
- zostanie wymuszone zmniejszenie prędkości synchronicznej silnika poniżej prędkości mechanicznej wirnika (w silniku indukcyjnym wielobiegowym przez przełączenie uzwojenia stojana z mniejszej na większą liczbę par biegunów, a w silniku sterowanym częstotliwościowo przez odpowiednie zmniejszenie częstotliwości napięcia zasilania).

9.2.3. Hamowanie silnika indukcyjnego przeciwwłączeniem

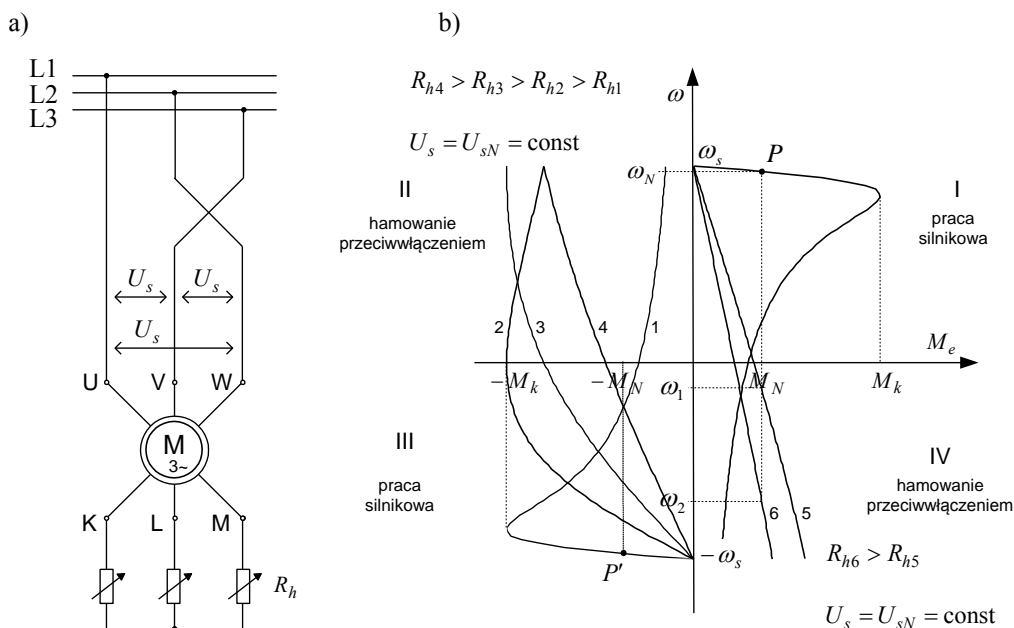
Zasada hamowania przeciwwłączeniem silnika indukcyjnego polega na wymuszeniu pracy silnika, w której kierunek prędkości synchronicznej (wirowania pola magnetycznego w szczelinie) jest przeciwny do kierunku prędkości mechanicznej wirnika. Silnik pracuje wtedy przy poślizgach $s > 1$, a moment elektromagnetyczny silnika jest momentem hamującym.

Stan hamowania przeciwwłączeniem może być uzyskany w następujących dwóch przypadkach:

- gdy uzwojenie stojana zostanie odłączone od sieci trójfazowej i ponownie załączone po zmianie kolejności faz,
- gdy moment oporowy maszyny ma charakter czynny i jest dostatecznie duży do wywołania ruchu wirnika w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wirującego pola magnetycznego w szczelinie silnika (w tym przypadku nie dokonuje się przełączenia uzwojenia stojana na inną kolejność faz), np. napęd mechanizmu wciągarki dźwignicy podczas opuszczania ciężaru.

Układ połączeń i charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ silnika indukcyjnego dla stanu hamowania przeciwwłączeniem przedstawiono na rysunku 9.2. Charakterystyki mechaniczne dla hamowania przeciwwłączeniem, uzyskiwane przez przełączenie uzwojenia stojana na inną kolejność faz, są częściami charakterystyk 1, 2, 3 i 4, położonych w II kwadrancie układu współrzędnych (ω, M_e) .

Z przebiegu charakterystyki 1. wynika, że hamowanie przeciwwłączeniem z wykorzystaniem pracy silnika na charakterystyce naturalnej ($R_h = 0$) może być mało skuteczne, gdyż wartości wytwarzanych wtedy momentów hamujących nie są duże. Korzystniejsze przebiegi charakterystyk hamowania 2, 3 i 4 można otrzymać dla silnika indukcyjnego pierścieniowego po włączeniu do obwodu wirnika dodatkowych rezystorów hamowania R_h . Przebiegi charakterystyk mechanicznych 5 i 6 są położone w IV kwadrancie układu współrzędnych (ω, M_e) i dotyczą stanu hamowania przeciwwłączeniem, uzyskiwanego bez zmiany kolejności faz zasilania.



Rys. 9.2. Hamowanie przeciwwłłączeniem silnikiem indukcyjnym:

- a) układ połączeń silnika podczas hamowania,
b) charakterystyki mechaniczne silnika dla stanu pracy silnikowej i hamowania przeciwwłłączeniem

Podczas hamowania przeciwwłłączeniem do silnika indukcyjnego jest doprowadzana od strony wału energia mechaniczna, a od strony sieci energia elektryczna. Doprowadzone z obu stron energie są zamieniane na energię strat mocy elektrycznej, wytracaną w uzwojeniach silnika i w dołączonych do wirnika rezystorach hamujących. Do istotnych wad tego sposobu hamowania należy pobór dużych prądów i dużej mocy z sieci zasilającej oraz duże ilości ciepła wydzielanego podczas hamowania.

9.2.4. Hamowanie dynamiczne silnika indukcyjnego prądem stałym

Zasada dynamicznego hamowania silnika indukcyjnego prądem stałym polega na odłączeniu uzwojenia stojana od sieci trójfazowej i przyłączeniu tego uzwojenia do źródła napięcia stałego. Zasilane prądem stałym uzwojenie stojana wytwarza w szczelinie silnika nieruchome pole magnetyczne. W uzwojeniach fazowych wirnika wirującego w tym polu są indukowane siły elektromotoryczne, wywołujące przepływ prądów fazowych wirnika. Wzajemne oddziaływanie pola magnetycznego w szczelinie silnika i prądów fazowych wirnika powoduje wytwarzanie momentu elektromagnetycznego skierowanego zawsze przeciwnie do kierunku prędkości wirnika, czyli

o działaniu hamującym. Podczas hamowania do silnika jest doprowadzana energia mechaniczna, która jest zamieniana na energię strat mocy wytracanej na rezystancjach uzwojeń fazowych wirnika i dołączonych do wirnika rezystorach hamowania R_h . Układy połączeń uzwojeń fazowych stojana silnika stosowane podczas tego hamowania przedstawiono na rysunku 9.3.

Układ połączeń uzwojenia stojana				
$K = \frac{I_{se}}{I_{st}}$	$\sqrt{\frac{3}{2}}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$
U_{st}	$2R_s I_{st}$	$\frac{3}{2}R_s I_{st}$	$\frac{2}{3}R_s I_{st}$	$\frac{1}{2}R_s I_{st}$

Rys. 9.3. Układy połączeń uzwojenia stojana silnika indukcyjnego podczas hamowania dynamicznego prądem stałym oraz wartości współczynnika K i napięcia stałego U_{st} dla tych układów

W analizie teoretycznej silnika stan hamowania prądem stałym jest zastępowany przez stan pracy silnika zasilanego równoważnym, trójfazowym prądem przemiennym. Wartość skuteczna prądu równoważnego I_{se} jest wyznaczana z warunku równości przepływów magnetycznych wytwarzanych przez uzwojenie stojana zasilane równoważnym prądem przemiennym i rzeczywistym prądem stałym. Z warunku tego otrzymuje się

$$I_{se} = KI_{st}, \quad (9.4)$$

gdzie:

K – współczynnik stały, zależny od układu połączeń uzwojeń fazowych stojana podczas hamowania,

I_{st} – wartość ustalona prądu stałego zasilającego uzwojenie stojana silnika.

Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego M_{eh} podczas hamowania prądem stałym w funkcji prędkości względnej v silnika określa równanie [1], [3]

$$M_{eh} = M_{eh}(v) = \frac{3}{\omega_s} \frac{\frac{R'_r + R'_h}{v}}{\left(\frac{R'_r + R'_h}{v}\right)^2 + (X_m + X'_{r\sigma})^2} X_m^2 I_{se}^2 = \frac{2M_{ehk}}{\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v}}, \quad (9.5)$$

w którym:

$$M_{ehk} = -\frac{3}{2\omega_s} \frac{X_m^2}{X_m + X'_{r\sigma}} I_{se}^2, \quad v_k = \frac{R'_r + R'_h}{X_m + X'_{\sigma r}}, \quad (9.6)$$

M_{ehk} – moment krytyczny silnika podczas hamowania prądem stałym,

$v = \omega/\omega_s$ – prędkość względna silnika,

v_k – krytyczna prędkość względna silnika,

R'_r, R'_h – rezystancja fazowa wirnika i rezystancja hamowania w obwodzie wirnika,

$X_m, X'_{r\sigma}$ – reaktancja magnesowania silnika i reaktancja rozproszenia wirnika.

Indeksem górnym ' oznaczono wielkości wirnika przeliczone na stronę stojana.

Z równań tych wynika, że moment hamujący silnika M_{eh} jest proporcjonalny do kwadratu prądu równoważnego stojana I_{se} , czyli do kwadratu prądu stałego I_{st} , wymuszanego w uzwojeniu stojana i zmienia się nieliniowo w funkcji prędkości względnej v .

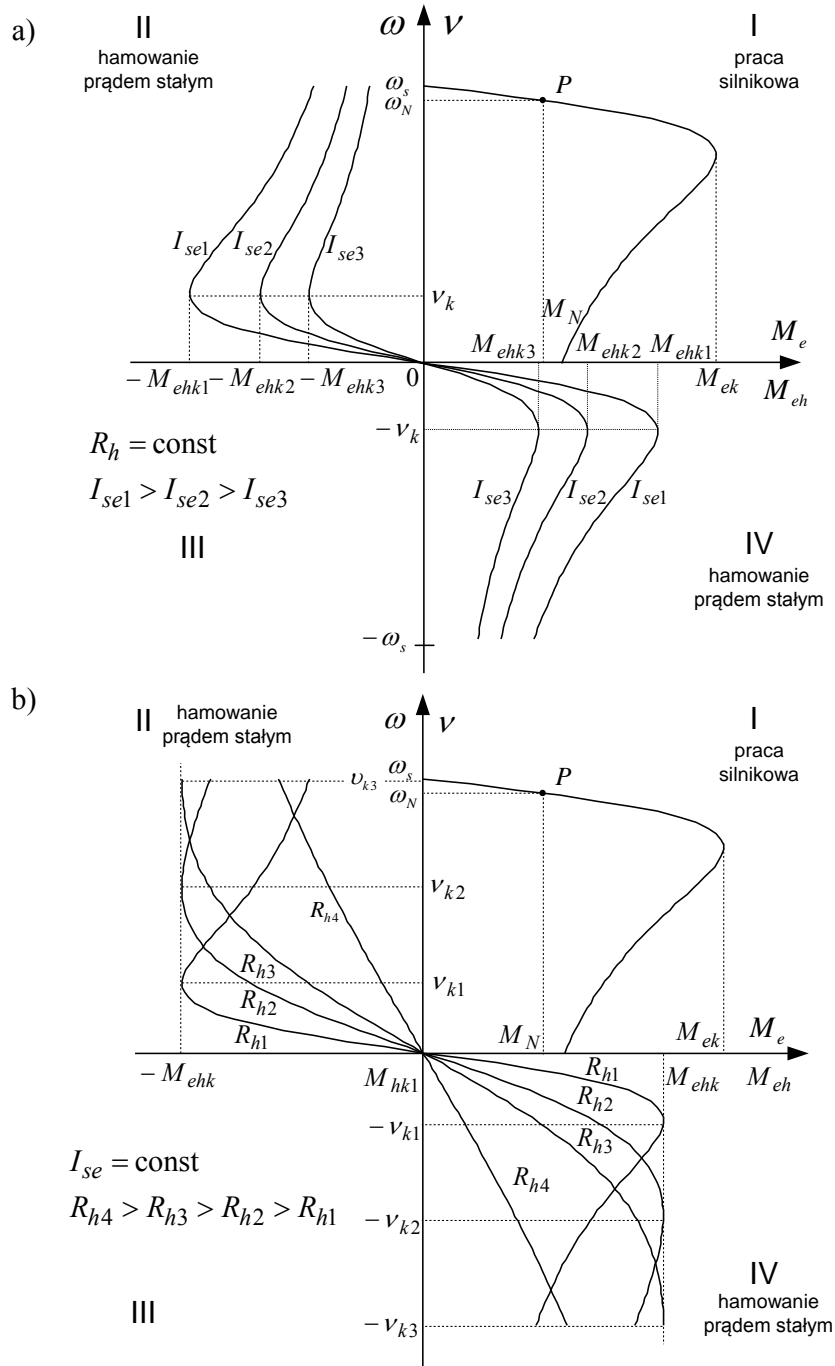
Maksymalna wartość momentu hamującego M_{ehk} (moment krytyczny) występuje przy prędkości względnej wirnika równej prędkości krytycznej v_k . Krytyczna prędkość względna v_k zależy tylko od parametrów elektromagnetycznych, a nie zależy od prądu równoważnego I_{se} .

Istnieją następujące metody sterowania momentem hamującym M_{eh} podczas hamowania prądem stałym:

- przez zmianę prądu I_{se} , czyli prądu stałego I_{st} wymuszanego w uzwojeniu stojana,
- przez zmianę trójfazowej rezystancji hamowania R_h dołączanej do obwodu wirnika (tylko w przypadku silnika indukcyjnego pierścieniowego).

Przebiegi charakterystyk mechanicznych silnika indukcyjnego $\omega = f(M_{eh})$ podczas hamowania prądem stałym przedstawiono na rysunku 9.4. Charakterystyki te są położone w II i IV kwadrancie układu współrzędnych (ω, M_{eh}) . Wszystkie charakterystyki hamowania przechodzą przez początek układu współrzędnych, czyli przy prędkości równej zero nie jest wytwarzany moment hamujący.

Na rysunku 9.4a pokazano rodzinę charakterystyk mechanicznych $\omega = f(M_{eh})$ dla różnych wartości równoważnego prądu stojana $I_{se} = \text{var}$ i stałej wartości rezystancji hamowania w obwodzie wirnika $R_h = \text{const}$, a na rysunku 9.4b dla stałej wartości prądu równoważnego $I_{se} = \text{const}$ i różnych wartości rezystancji hamowania w obwodzie wirnika $R_h = \text{var}$. Przedstawione charakterystyki hamowania zostały wyznaczone na podstawie zależności (9.5), przy założeniu, że parametry silnika są stałe. W rzeczywistych układach hamowania przy wymuszaniu dużych wartości prądu stałego w uzwojeniu stojana może wystąpić zmienność reaktancji silnika, spowodowana zmiennością nasycenia obwodu magnetycznego silnika. Wpływ nasycenia powoduje zmniejszenie wartości bezwzględnych momentów hamowania (nawet o kilkadziesiąt procent), czyli zmniejszenie skuteczności układu hamowania.



Rys. 9.4. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego podczas hamowania prądem stałym:
 a) dla $R_h = \text{const}$, $I_{se} = \text{var}$, b) dla $R_h = \text{var}$, $I_{se} = \text{const}$

9.2.5. Energoelektroniczne układy regulowanego hamowania prądem stałym silników indukcyjnych

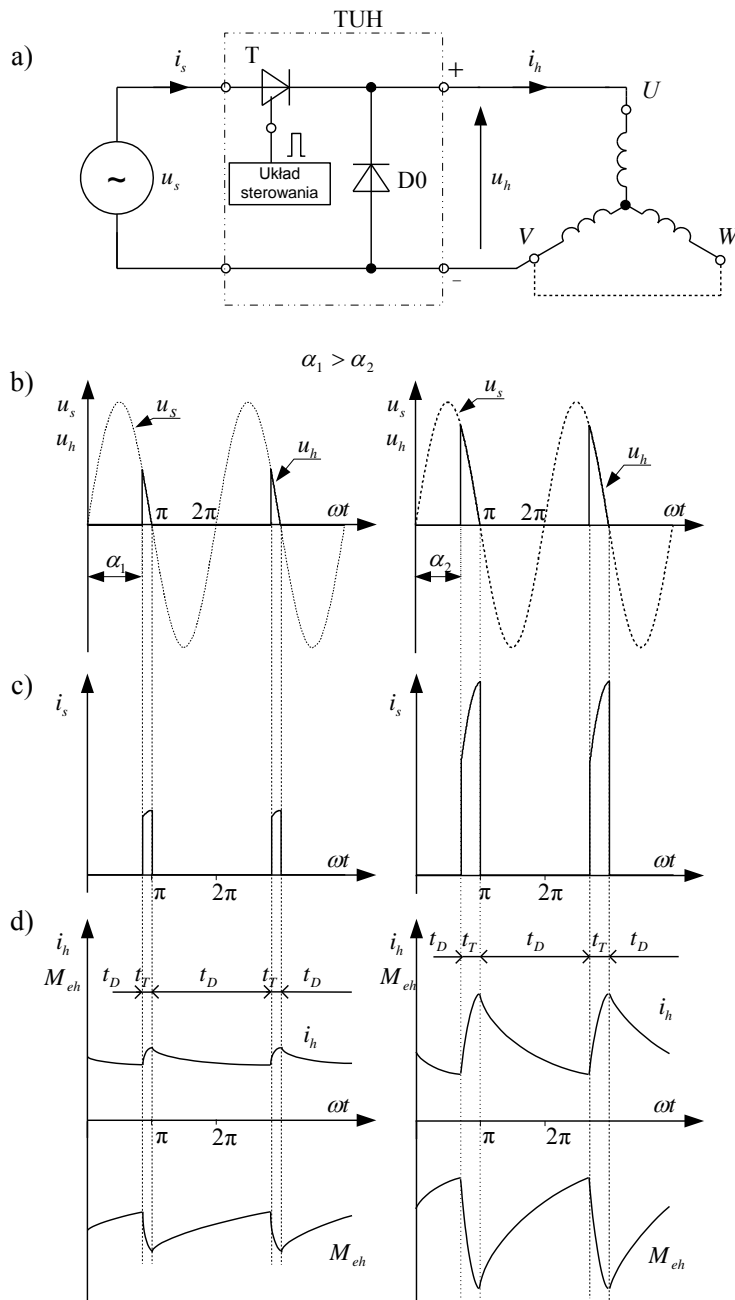
W nowoczesnych układach napędowych często potrzebne jest sterowanie momentem hamującym w celu uzyskania możliwości sterowania wartością czasu lub drogi hamowania, odpowiednio do potrzeb maszyny roboczej lub procesu technologicznego. Wymagania te mogą być spełnione przez zastosowanie energoelektronicznych układów do regulowanego hamowania prądem stałym. Wybrane układy przekształtnikowe stosowane do tego hamowania przedstawiono na rysunkach 9.5 i 9.6.

W układzie regulowanego hamowania na rysunku 9.5a zastosowano przekształtnik TUH, wykonany jako prostownik sterowany jednopulsowy, złożony z tyrystora T i diody zerowej D0. Prostownik ten jest sterowany fazowo przez zmianę kąta załączenia α tyrystora T przy dodatniej półfali napięcia przemiennego sieci $u_s(t)$. Po załączeniu tyrystora T następuje szybkie narastanie prądu i_h w uzwojeniu stojana silnika. Przewodzenie tyrystora T trwa aż do momentu komutacji naturalnej w chwili przejścia napięcia sieci z dodatniej do ujemnej półfali. Wtedy przewodzi dioda zerowa D0, aż do momentu ponownego wystrojenia tyrystora T. Podczas przewodzenia diody zerowej uzwojenie stojana jest zwarte i prąd w tym uzwojeniu stopniowo zanika. Prąd wymuszony w uzwojeniu stojana ma zatem przebieg pulsujący i jest złożony z przedziałów przewodzenia tyrystora i przewodzenia diody zerowej. Przebiegi chwilowe napięcia zasilającego uzwojenie stojana u_h , prądu pobieranego z sieci i_s , prądu wymuszanego w uzwojeniu stojana i_h i momentu elektromagnetycznego silnika M_{eh} dla różnych wartości kąta załączenia tyrystora (przy założeniu komutacji natychmiastowej zaworów) przedstawiono na rysunku 9.5b–d.

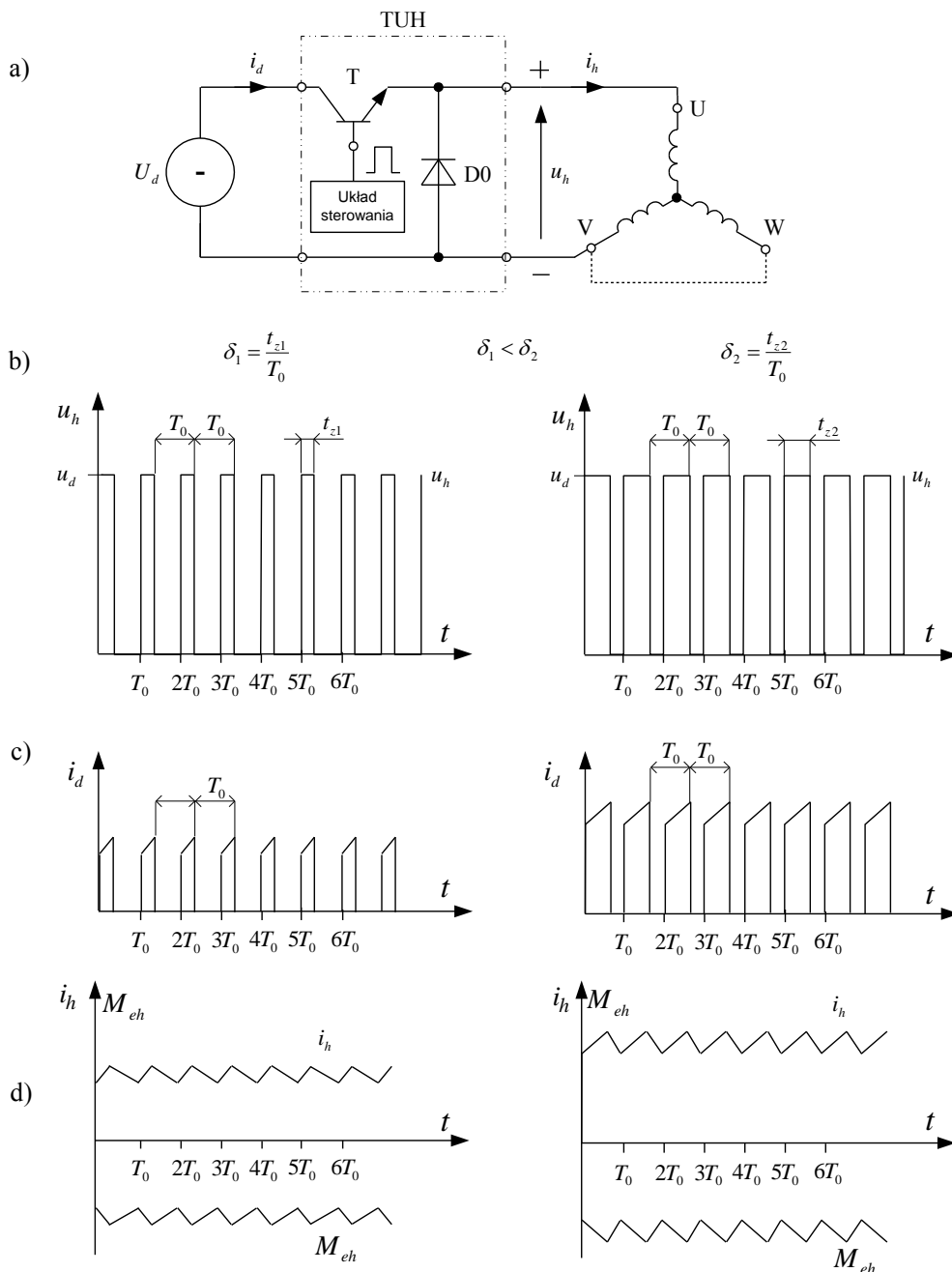
Wadą tego układu hamowania są znaczne oscylacje prądu w uzwojeniu stojana i_h oraz momentu elektromagnetycznego silnika M_{eh} podczas hamowania, zaletą natomiast jest prostota i niski koszt układu oraz możliwość bezpośredniego zasilania z sieci niskiego napięcia, bez konieczności stosowania transformatora obniżającego napięcie.

W układzie regulowanego hamowania przedstawionym na rysunku 9.6a zastosowano przekształtnik TUH wykonany jako sterownik napięcia stałego („przerywacz okresowy”). Sterownik ten jest złożony z tranzystora mocy T (klucza tranzystorowego lub tyrystorowego) oraz diody zerowej D0 i jest zasilany napięciem stałym o wartości U_d . Zasada sterowania prądem stałym zasilającym uzwojenie stojana jest oparta na modulacji szerokości impulsów napięcia na wyjściu sterownika. W każdym okresie pracy sterownika T_0 występują dwa przedziały: t_{z1} i t_{z2} .

W przedziale t_{z1} przewodzi tranzystor T i prąd w uzwojeniu stojana jest wymuszany przez napięcie U_d zasilające sterownik. W następnym przedziale czasu t_{z2} tranzystor T jest zablokowany i przewodzi dioda zerowa D0. Stosowane zwykle częstotliwości łączeń sterownika są duże (powyżej kilkuset herców), co zapewnia, że prąd i_h wymuszany w uzwojeniu stojana i moment elektromagnetyczny M_{eh} zmieniają się w sposób ciągły i mają nieznaczną amplitudę oscylacji.



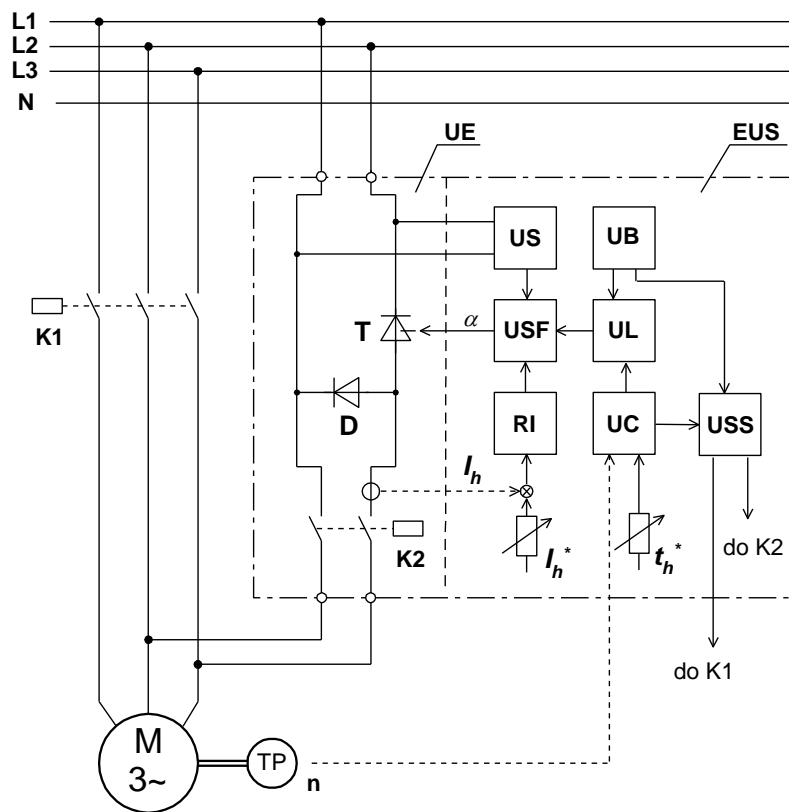
Rys. 9.5. Zasada pracy i przebiegi chwilowe wielkości elektromagnetycznych dla układu regulowanego hamowania o sterowaniu fazowym: a) schemat obwodów głównych układu, b) przebiegi chwilowe napięcia sieci zasilającej $u_s = f(\omega t)$ i napięcia zasilającego uzwojenie stojana $u_h = f(\omega t)$, c) przebiegi chwilowe prądu sieci $i_s = f(\omega t)$, d) przebiegi chwilowe prądu hamowania $i_h(\omega t)$ i momentu elektromagnetycznego silnika $M_{eh} = f(\omega t)$



Rys. 9.6. Zasada pracy i przebiegi chwilowe wielkości elektromagnetycznych dla układu regulowanego hamowania o sterowaniu impulsowym: a) schemat obwodów głównych układu, b) przebiegi chwilowe napięcia u_h zasilającego uzwojenie stojana, c) przebiegi chwilowe prądu i_d pobieranego ze źródła zasilania sterownika, d) przebiegi chwilowe prądu hamowania i_h i momentu elektromagnetycznego silnika M_{eh}

Na rysunku 9.6b–d przedstawiono przebiegi chwilowe napięcia zasilającego uzwojenie stojana u_h , prądu pobieranego ze źródła i_d , prądu zasilającego uzwojenie stojana i_h i momentu elektromagnetycznego silnika M_{eh} dla różnych wartości współczynnika względnego czasu przewodzenia sterownika $\delta = t_z/T_0$.

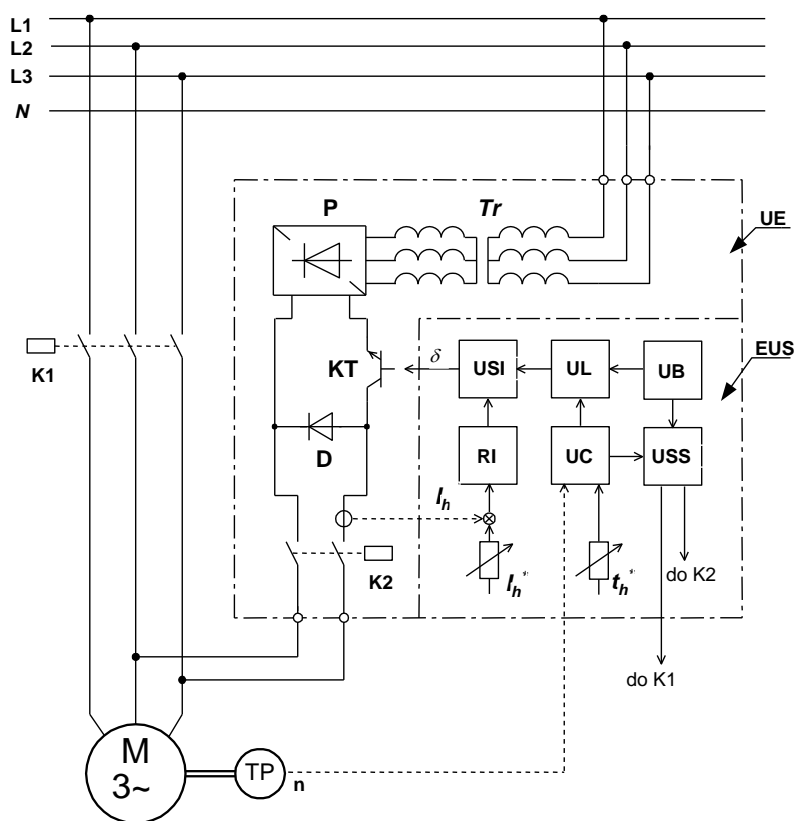
Wadą tego układu hamowania jest konieczność zasilania obwodu wejściowego sterownika ze źródła napięcia stałego, najczęściej za pomocą układu złożonego z transformatora i prostownika niesterowanego, zasilanego z sieci prądu przemiennego. Takie wykonanie układu regulowanego hamowania ze względu na większy koszt jest zalecane w przypadku potrzeby jednoczesnego hamowania napędów wielosilnikowych (np. grupy silników pracujących w linii technologicznej, wielosilnikowych napędów obrabiarek). Do hamowania poszczególnych silników są przeznaczone wtedy oddzielne sterowniki, zasilane napięciem wyprostowanym ze wspólnego układu prostowniczego.



Rys. 9.7. Schemat tyristorowego urządzenia o sterowaniu fazowym do hamowania dynamicznego silnika indukcyjnego prądem stałym

W zastosowaniach przemysłowych przedstawione układy energoelektroniczne są wykonywane jako specjalne urządzenia energoelektroniczne do regulowanego hamo-

wania prądem stałym. Urządzenia te są wyposażone w układ sterowania wartością prądu hamowania w uzwojeniu stojana oraz w inne układy sterujące, zapewniające automatyzację wszystkich czynności łączeniowych silnika oraz realizację prawidłowego przebiegu procesu hamowania. Schemat tyrystorowego urządzenia o sterowaniu fazowym przedstawiono na rysunku 9.7, a schemat tranzystorowego urządzenia o sterowaniu impulsowym na rysunku 9.8.

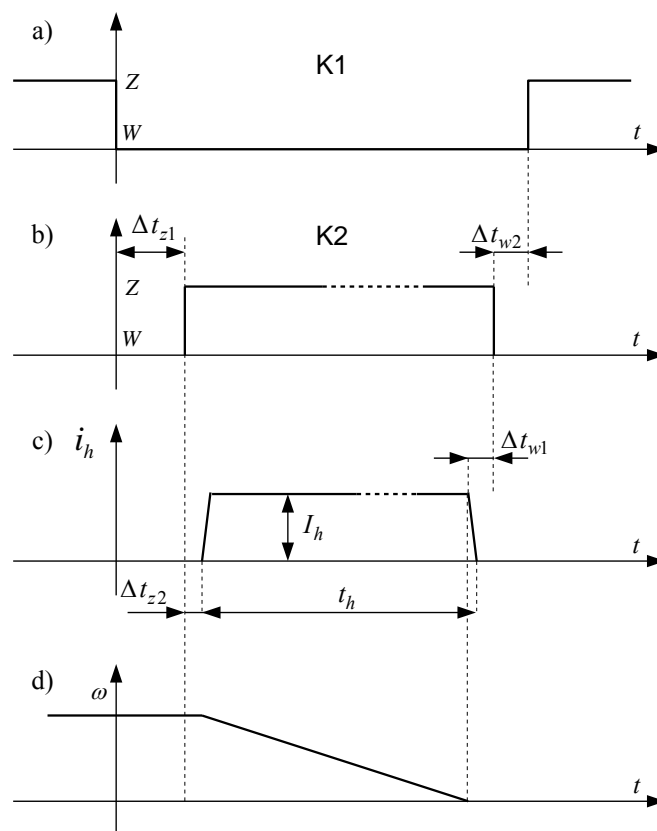


Rys. 9.8. Schemat tranzystorowego urządzenia o sterowaniu impulsowym do hamowania dynamicznego silnika indukcyjnego prądem stałym

Każde z tych urządzeń ma budowę modułową i składa się z modułu układu energoelektronicznego UE i modułu elektronicznego układu sterowania EUS. W układzie sterowania EUS zastosowano potencjometry regulacyjne pozwalające użytkownikowi na dopasowanie urządzenia do potrzeb układu napędowego. Potencjometr I_h^* służy do nastawiania żądanej wartości średniej prądu stałego, wymuszanego w uzwojeniu stojana podczas hamowania, a przez to wartości wytwarzanego momentu hamowania. Potencjometr t_h^* służy do nastawiania przedziału czasu, przez który w uzwojeniu sto-

jana będzie wymuszany przepływ prądu stałego. Wartość tego czasu powinna być tak dobrana, aby był on nieco dłuższy od czasu potrzebnego do zatrzymania układu napędowego. Po upływie tego czasu układ sterowania blokuje układ energoelektroniczny i przerywa wymuszanie przepływu prądu stałego w uzwojeniu stojana. Ma to na celu wyeliminowanie zbytecznego nagrzewania silnika przez prąd w uzwojeniu stojana po zatrzymaniu układu napędowego.

Na rysunku 9.9 przedstawiono diagram ilustrujący sekwencje czynności łączeniowych oraz przedziały czasowe pracy poszczególnych obwodów i łączników zastosowanych w tych urządzeniach energoelektronicznych.



Rys. 9.9. Diagram sekwencji pracy urządzeń do regulowanego hamowania:
 a) stycznik sieciowy K1, b) stycznik hamowania K2, c) przebieg chwilowy prądu hamowania i_h ,
 d) przebieg chwilowy prędkości kątowej silnika ω

Rozpoczęcie procesu hamowania następuje od chwili odłączenia przez stycznik K1 uzwojenia stojana silnika od sieci trójfazowej. Następnie ze zwłoką czasową Δt_{z1} (wymaganą do zaniku wpływu pola resztkowego wirnika) jest załączany stycznik K2,

przyłączający urządzenie energoelektroniczne do uzwojenia stojana silnika. Stycznik K2 jest załączany i wyłączany w stanie bezprądowym w celu wyeliminowania możliwości awarii spowodowanych przerywaniem dużych wartości prądu stałego. Obwód sterowania przepływem prądu hamowania zostaje odblokowany ze zwłoką czasową Δt_{z2} dopiero po zamknięciu styków K2. W uzwojeniu stojana jest wymuszany wtedy przepływ prądu stałego I_h o wartości nastawionej uprzednio potencjometrem I_h^* . Po upływie nastawionego potencjometrem t_h^* czasu trwania hamowania następuje zablokowanie układu sterowania i przerwanie wymuszania prądu w uzwojeniu stojana. Otwarcie stycznika K2 i odłączenie urządzenia do hamowania od silnika następuje ze zwłoką czasową Δt_{w1} . Silnik może być ponownie załączony do sieci trójfazowej po upływie krótkiej zwłoki czasowej Δt_{w2} .

9.3. Instrukcja

9.3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat układu pomiarowego do badań charakterystyk statycznych silnika indukcyjnego w stanach hamowania odzyskowego, hamowania przeciwwłączeniem i hamowania dynamicznego prądem stałym przedstawiono na rysunku 9.10. Układ pomiarowy składa się z trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego M sprzężonego mechanicznie z maszyną pomocniczą prądu stałego M_p . Podczas pomiarów charakterystyk hamowania maszyna M_p pracuje jako obcowzbudny silnik prądu stałego, którego twornik jest zasilany regulowanym napięciem stałym. W przypadku wyznaczania charakterystyk silnika M dla stanów pracy silnikowej, maszyna M_p pracuje jako obcowzbudna prądnica prądu stałego obciążona rezystorem R_o o nastawianej rezystancji. Z wałem mechanicznym silnika M jest sprzężona tachoprądnica TP z miernikiem prędkości obrotowej. Do pomiaru momentu mechanicznego na wale silnika może być zastosowany przetwornik momentu mechanicznego PM z miernikiem momentu mechanicznego. W razie braku tego przetwornika moment mechaniczny na wale silnika wyznacza się na podstawie pomiarów mocy z podanych poniżej zależności:

1. Podczas badania stanów hamowania odzyskowego, hamowania przeciwwłączeniem i stanów pracy silnikowej moment elektromagnetyczny silnika M_e przy danej prędkości kątownej silnika ω oblicza się z wzorów:

$$M_e = M_e(\omega) = \frac{P_e(\omega)}{\omega_s}, \quad (9.7)$$

$$P_e(\omega) = P_s \pm \Delta P = P_s \pm (3R_s I_s^2 + \Delta P_{Fe}), \quad P_s = P_1 + P_2, \quad (9.8)$$

w których:

P_s – suma algebraiczna wskazań mocy watomierzy P_1 i P_2 ,

I_s – prąd fazowy stojana (wartość średnia wskazań amperomierzy I_1, I_2, I_3),

R_s – rezystancja fazowa stojana,

ΔP_{Fe} – straty w żelazie silnika indukcyjnego.

Znak „+” w równaniu (9.8) obowiązuje dla hamowania odzyskowego, a znak „-” dla hamowania przeciwwłączeniem i stanów pracy silnikowej silnika M.

2. Podczas badania stanów hamowania prądem stałym moment mechaniczny M na wale silnika indukcyjnego przy danej prędkości kątowej silnika ω oblicza się według wzorów:

$$M = M(\omega) = \frac{P(\omega)}{\omega}, \quad (9.9)$$

$$P(\omega) = U_{tp} I_{tp} + \Delta P = U_{tp} I_{tp} + (R_{tp} I_{tp}^2 + \Delta P_{Fe p} + \Delta P_m), \quad (9.10)$$

w których:

U_{tp}, I_{tp} – napięcie i prąd twornika maszyny pomocniczej,

R_{tp} – rezystancja twornika maszyny pomocniczej,

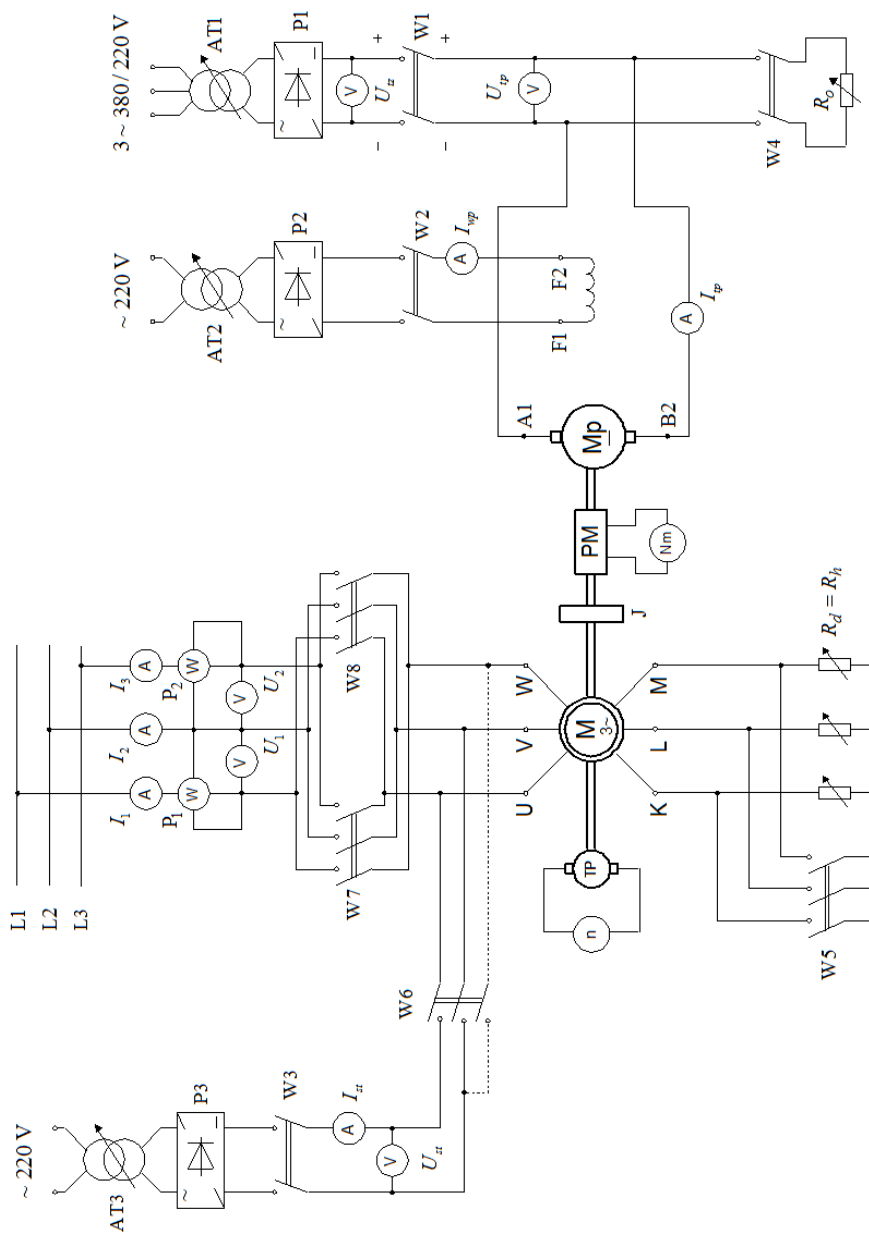
$\Delta P_{Fe p}$ – straty w żelazie maszyny pomocniczej przy napięciu U_{tp} ,

ΔP_m – straty mechaniczne układu napędowego.

9.3.2. Badanie silnika indukcyjnego podczas hamowania odzyskowego

Badania wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 9.10. Stan hamowania odzyskowego uzyskuje się wymuszając za pośrednictwem maszyny pomocniczej M_p pracę silnika M przy prędkościach nadsynchronicznych ($n > n_s$).

Uruchomienie układu pomiarowego rozpoczyna się od załączenia silnika indukcyjnego M z dołączonym do obwodu wirnika rezystorem trójfazowym R_d , pełniącym rolę rozrusznika. Po zakończeniu rozruchu należy przejść do pracy silnika na charakterystyce naturalnej (rezystor R_d zwarty łącznikiem W5). Przy otwartym łączniku W1 nastawić autotransformatorem AT1 napięcie U_{tz} równe wartości znamionowej napięcia twornika U_{tpN} maszyny M_p . Następnie załączyć obwód wzbudzenia maszyny M_p i przez zmianę prądu wzbudzenia I_{wp} doprowadzić do stanu, w którym po obu stronach łącznika W1 zostanie spełniony warunek równości napięć $U_{tp} = U_{tz}$ oraz warunek zgodnej biegunowości tych napięć. Po sprawdzeniu, że te dwa warunki są spełnione, zamknąć łącznik W1. Następnie przez stopniowe zmniejszanie prądu wzbudzenia I_{wp} zwiększać prędkość mechaniczną dla wymuszenia pracy silnika M w zakresie hamowania odzyskowego.



Rys. 9.10. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk silnika indukcyjnego w stanach hamowania odzyskowego, hamowania przeciwłączeniem i hamowania dynamicznego prądem stałym

Kolejne punkty charakterystyk hamowania odzyskowego wyznacza się przez nastawianie prądem wzbudzenia I_{wp} różnych wartości prędkości nadsynchronicznych silnika M. Podczas pomiarów prądy silnika M i maszyny Mp nie powinny przekraczać 120% wartości znamionowej, a prędkość kątowna układu napędowego powinna być mniejsza od dopuszczalnej. W przedstawiony sposób wykonać też pomiary charakterystyk sztucznych silnika M z rezystancjami R_d w obwodzie wirnika (łącznik W5 otwarty). W razie potrzeby pomiarowego wyznaczenia charakterystyk silnika M dla stanów pracy silnikowej należy silnik obciążać maszyną Mp, pracującą jak prądnica obcowzbudna, obciążona rezystorem nastawnym R_o (łącznik W4 zamknięty, a W1 otwarty).

Na podstawie wyników pomiarów należy wykreślić przebiegi charakterystyk hamowania silnikiem indukcyjnym $\omega = f(M)$, $I_s = f(\omega)$, $P = f(\omega)$ dla stanu hamowania odzyskowego i pracy silnikowej.

9.3.3. Badanie silnika indukcyjnego podczas hamowania przeciwwłączeniem

Badanie stanów hamowania przeciwwłączeniem silnika indukcyjnego wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 9.10. Silnik indukcyjny M podczas tych stanów hamowania jest napędzany przez maszynę pomocniczą Mp.

Przed rozpoczęciem badań należy dokonać załączeń do sieci silnika M na biegu jałowym kolejno za pomocą łączników W7 i W8, a następnie na podstawie obserwacji kierunku wirowania wirnika określić kierunki prędkości synchronicznych silnika (pola wirującego), odpowiadające załączeniom tych łączników.

Uruchomienie układu napędowego rozpoczyna się od załączenia i rozruchu napięciowego maszyny Mp aż do wartości napięcia twornika równej lub zbliżonej do wartości znamionowej U_{tpN} . Należy zaobserwować kierunek prędkości wału napędowego, a następnie zamknąć ten z łączników (W7 lub W8), przy którym kierunek prędkości pola wirującego będzie przeciwny do kierunku prędkości mechanicznej wirnika. W obwodzie wirnika silnika M powinien być wtedy włączony trójfazowy rezystor o rezystancji $R_d = R_h$, dla której będą wyznaczane charakterystyki hamowania.

Pomiary charakterystyk silnika M podczas hamowania przeciwwłączeniem wyznacza się dla prędkości kątowych silnika zawartych w przedziale $0 \leq \omega \leq \omega_s$. Wartości tych prędkości są nastawiane przez zmniejszanie napięcia twornika U_{tp} maszyny Mp. Przedstawiona procedura pomiarów może zostać powtórzona dla kilku nastawień wartości rezystancji hamowania R_h w obwodzie wirnika silnika M. Na podstawie wyników pomiarów należy wyznaczyć przebiegi charakterystyk silnika indukcyjnego dla stanu hamowania przeciwwłączeniem: $\omega = f(M)$, $I_s = f(\omega)$, $P = f(\omega)$, dla różnych wartości rezystancji hamowania R_h w obwodzie wirnika.

9.3.4. Badanie silnika indukcyjnego podczas hamowania dynamicznego prądem stałym

Badania stanów hamowania prądem stałym silnika indukcyjnego M wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 9.10. Silnik M jest napędzany przez maszynę pomocniczą M_p pracującą jako silnik obcowzbudny prądu stałego. Podczas pomiarów trójfazowe uzwojenie stojana silnika M jest odłączone od sieci trójfazowej i zasilane prądem stałym (łączniki W7, W8 – otwarte, łączniki W3, W6 – zamknięte).

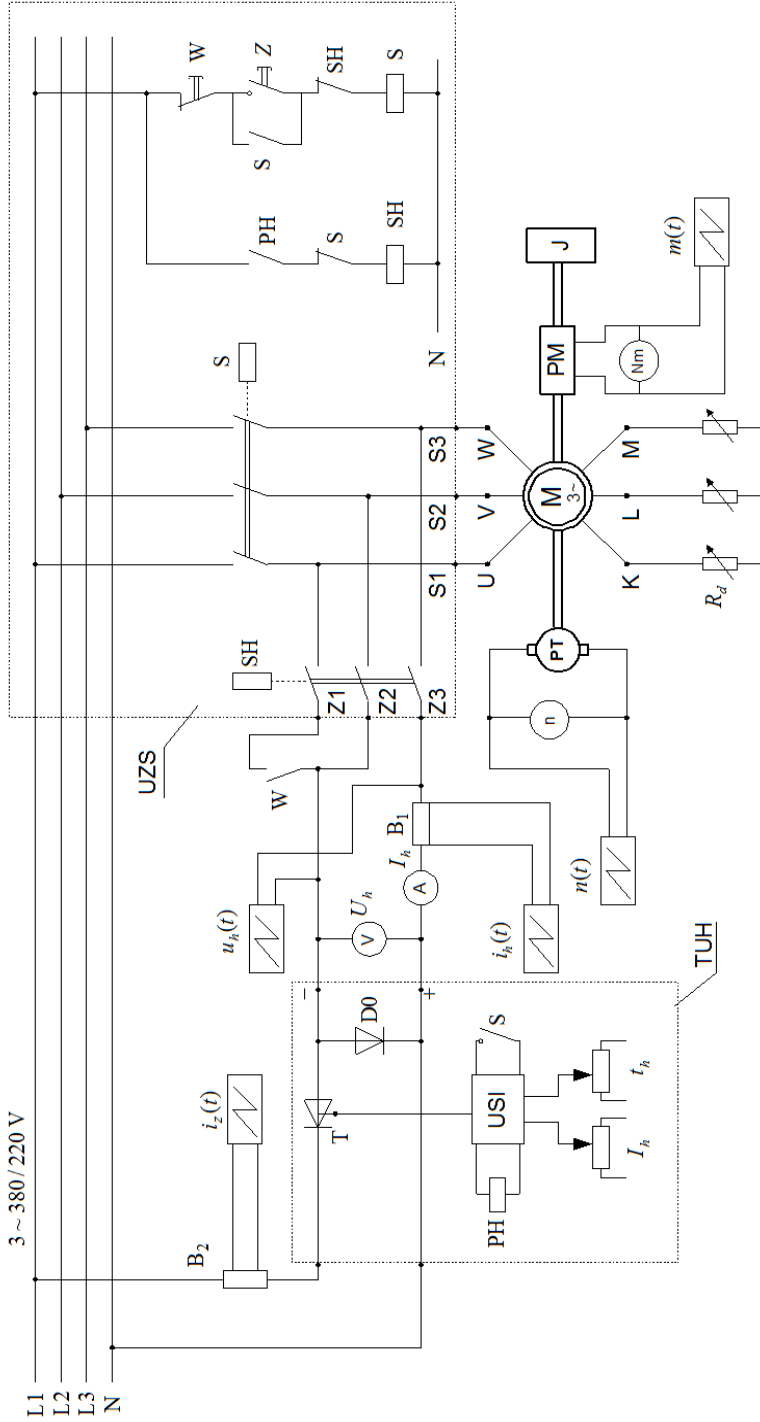
Uruchomienie układu napędowego rozpoczyna się od rozruchu napięciowego wzbudzonej znamionowo maszyny M_p , aż do znamionowej wartości napięcia twornika U_{ipN} . Do obwodu wirnika silnika M powinien być włączony trójfazowy rezystor hamowania o rezystancji $R_d = R_h$, dla której będą wykonywane pomiary charakterystyk hamowania. Po załączeniu uzwojenia stojana do źródła napięcia stałego należy nastawić i utrzymywać żadaną wartość prądu stałego I_{st} w uzwojeniu stojana.

Charakterystyki hamowania prądem stałym wyznacza się dla prędkości kątowych silnika M zawartych w przedziale $0 \leq \omega \leq \omega_s$. Nastawienia wartości prędkości kątowych silnika uzyskuje się przez zmianę wartości napięcia twornika U_{ip} maszyny M_p (za pomocą autotransformatora AT1).

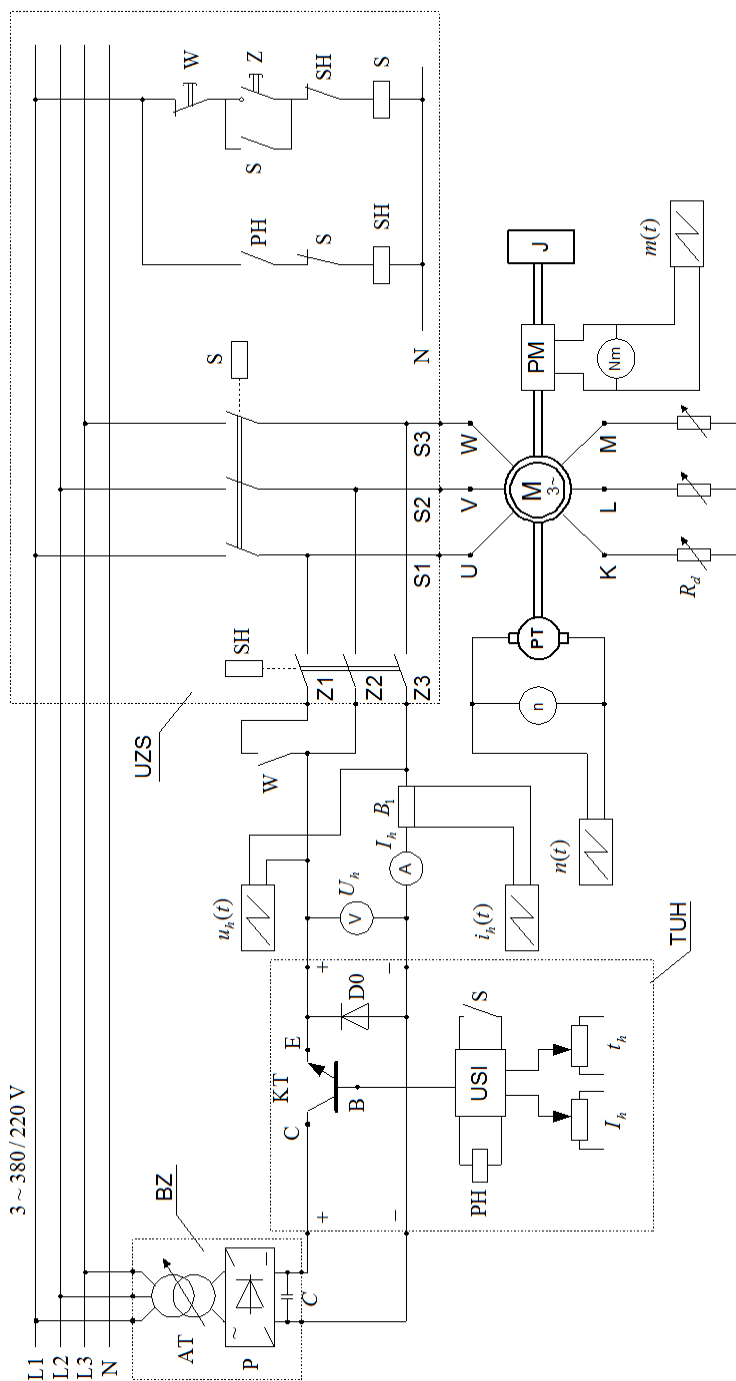
Przedstawiona procedura pomiarów obowiązuje podczas wyznaczania charakterystyk hamowania dla kilku nastawień prądu stałego I_{st} w uzwojeniu stojana oraz rezystancji hamowania R_h . Celowe jest wykonanie tych pomiarów również dla innego układu połączeń uzwojeń fazowych stojana silnika indukcyjnego. Na podstawie wyników pomiarów należy wyznaczyć przebiegi charakterystyk hamowania prądem stałym $\omega = f(M)$ dla $R_d = R_h = \text{var}$, $I_{st} = \text{const}$ oraz dla $I_{st} = \text{var}$, $R_d = R_h = \text{const}$.

9.3.5. Badanie układów regulowanego hamowania prądem stałym silnika indukcyjnego z zastosowaniem energoelektronicznych układów hamowania

Schemat układu pomiarowego do badań silnika indukcyjnego z zastosowaniem tyrystorowego urządzenia do regulowanego hamowania o sterowaniu fazowym przedstawiono na rysunku 9.11, a z zastosowaniem tranzystorowego urządzenia do regulowanego hamowania o sterowaniu impulsowym na rysunku 9.12. Na rysunkach tych linią przerywaną zaznaczono bloki układów mocy i układów sterowania, które w układzie laboratoryjnym stanowią oddzielne panele. Zasada sterowania tych urządzeń energoelektronicznych do hamowania jest podobna i zostanie omówiona wspólnie.



Rys. 9.1.1. Schemat układu pomiarowego do badań silnika indukcyjnego podczas stanów regulowanego hamowania z zastosowaniem tyrystorowego urządzenia o sterowaniu fazowym



Rys. 9.12. Schemat układu pomiarowego do badań silnika indukcyjnego podczas stanów regulowanego hamowania z zastosowaniem tranzystorowego urządzenia o sterowaniu impulsowym

Sterowanie załączeniem i wyłączeniem silnika indukcyjnego oraz urządzenia do regulowanego hamowania prądem stałym następuje za pośrednictwem stycznikowo-przełącznikowego układu sterowania. Układ uruchamia się przez naciśnięcie przycisku załączenia Z. Następuje wtedy zamknięcie obwodu cewki stycznika S i zamknięcie styków głównych stycznika S. Załączenie cewki stycznika S jest podtrzymywane przez normalnie otwarty styk pomocniczy S tego stycznika. Silnik M zostaje załączony do sieci trójfazowej i po zakończeniu rozruchu pracuje na biegu jałowym. Rozpoczęcie procesu regulowanego hamowania układu napędowego jest inicjowane przez naciśnięcie przycisku W.

Następuje wtedy przerwanie obwodu cewki stycznika S i otwarcie jego styków głównych. Silnik M zostaje odłączony od sieci trójfazowej. Jednocześnie zostaje rozłączony wtedy normalnie otwarty zestyk pomocniczy stycznika S, w układzie sterowania urządzenia energoelektronicznego TUH. Powoduje on odblokowanie układów sterowania zastosowanych w urządzeniu energoelektronicznym. Z krótką zwłoką czasową, nastawioną w urządzeniu, zostaje załączony przełącznik hamowania PH, którego zestyk umieszczony w obwodzie cewki stycznika hamowania SH powoduje zamknięcie obwodu zasilania tej cewki. Następuje wtedy załączenie bezprądowe styków głównych stycznika SH i przyłączenie urządzenia do hamowania do uzwojenia stojana silnika. Po krótkiej zwłoce czasowej układ sterowania wymusza przepływ w uzwojeniu stojana prądu hamowania o wartości I_{sr} (nastawianej potencjometrem I_h) przez przedział czasu Δt (nastawiany potencjometrem t_h). Następuje wtedy hamowanie układu napędowego, aż do zatrzymania wirnika silnika M. Po upływie czasu Δt wymuszanie przepływu prądu stałego w uzwojeniu stojana zostaje zablokowane i prąd ten jest równy zero. Po krótkiej zwłoce czasowej elektroniczny układ sterowania powoduje wyłączenie zasilania przełącznika PH. Styk pomocniczy przełącznika PH przerywa obwód cewki stycznika hamowania SH i powoduje otwarcie styków głównych stycznika SH. Urządzenie jest wtedy odłączone od uzwojenia stojana i proces hamowania zostaje zakończony. Silnik indukcyjny po naciśnięciu przycisku sterowniczego Z może być ponownie załączony do pracy przy zasilaniu z sieci trójfazowej.

Podczas pomiarów należy rejestrować przebiegi chwilowe prądów $i_z(t)$, $i_h(t)$ prędkości obrotowej $n(t)$ i momentu $m(t)$. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów należy wyznaczyć diagram pracy urządzenia energoelektronicznego i elementów układu sterowania. Drogą kilku prób należy za pomocą potencjometrów I_h i t_h w układzie sterowania dobrać takie nastawienie wartości prądu hamowania, aby zatrzymanie układu napędowego następowało w żądanym czasie oraz takie nastawienie czasu hamowania, aby prąd hamowania był wyłączany bezpośrednio po zatrzymaniu układu napędowego. W przypadku zbyt długiego czasu zatrzymywania układu napędowego należy zwiększać nastawienie wartości prądu I_h , a przy zbyt długim czasie wymuszania prądu hamowania zmniejszać nastawienie czasu t_h . Podczas badań unikać wykonywania liczących, występujących bezpośrednio po sobie załączeń silnika do pracy silnikowej i hamowania ze względu na możliwość nad-

miernego nagrzania uzwojeń silnika i przeciążenia obwodów mocy urządzenia do hamowania.

W sprawozdaniu należy przedstawić i omówić zarejestrowane przebiegi wielkości elektromagnetycznych dla hamowania z zastosowaniem tyrystorowego urządzenia o sterowaniu fazowym i tranzystorowego urządzenia o sterowaniu impulsowym.

9.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie z wykonanych badań powinno zawierać:

1. Dane znamionowe maszyn elektrycznych w badanym układzie napędowym.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schematy ideowe zastosowanych układów pomiarowych.
4. Tabele z wynikami pomiarów oraz obliczeń wykonanych na podstawie pomiarów.

5. Charakterystyki silnika indukcyjnego dla stanów hamowania elektrycznego:

a) dla stanu hamowania odzyskowego i pracy silnikowej:

$$\omega = f(M); I_s = f(\omega); P_s = f(\omega); \text{ przy } U_s = U_{sN}, R_d = 0, R_{d1}, R_{d2} \dots$$

b) dla stanu hamowania przeciwwłączeniem:

$$\omega = f(M); I_s = f(\omega); P_s = f(\omega); \text{ przy } U_s = U_{sN}, R_h = 0, R_{h1}, R_{h2} \dots$$

c) dla stanu hamowania dynamicznego prądem stałym:

$$\omega = f(M); \text{ przy } I_{st} = \text{const}, R_h = 0, R_{h1}, R_{h2} \dots$$

$$\omega = f(M); \text{ przy } R_h = \text{const}, I_{st} = I_{st1}, I_{st2} \dots$$

Wszystkie charakterystyki należy przedstawić w jednostkach względnych, przyjmując następujące wielkości bazowe: synchroniczna prędkość kątowna ω_s , moment znamionowy silnika M_N , znamionowy prąd stojana I_{sN} , znamionowa moc silnika P_N .

6. Oscylogramy z rejestracji wielkości elektromagnetycznych wykonanych dla:

a) badania układu regulowanego hamowania prądem stałym z zastosowaniem tyrystorowego urządzenia o sterowaniu fazowym,

b) badania układu regulowanego hamowania prądem stałym z zastosowaniem tranzystorowego urządzenia o sterowaniu impulsowym.

7. Wyznaczenie nastawień w urządzeniach energoelektronicznych do regulowanego hamowania prądem stałym:

a) wartości prądu hamowania i przedziału czasu wymuszania przepływu tego prądu w uzwojeniu stojana;

b) długości zwłok czasowych nastawionych w urządzeniach do regulowanego hamowania.

8. Wnioski z wykonanych badań i własne spostrzeżenia (porównanie i określenie właściwości poszczególnych metod i układów hamowania elektrycznego).

9.5. Zagadnienia kontrolne

1. Wymienić i omówić metody hamowania elektrycznego silników indukcyjnych.
2. Przedstawić zasadę hamowania odzyskowego silnika indukcyjnego i przebiegi charakterystyk mechanicznych silnika dla tego hamowania.
3. Przedstawić zasadę hamowania przeciwwłóceniem silnika indukcyjnego i przebiegi charakterystyk mechanicznych silnika dla tego hamowania.
4. Przedstawić zasadę hamowania dynamicznego silnika indukcyjnego prądem stałym i przebiegi charakterystyk mechanicznych silnika dla tego hamowania.
5. Omówić budowę i sterowanie urządzeń energoelektronicznych do regulowanego hamowania prądem stałym silnikami indukcyjnymi.

Literatura

- [1] Bielawski S., *Teoria napędu elektrycznego*, WNT, Warszawa 1978.
- [2] *Napęd elektryczny*, praca zbiorowa pod redakcją Z. Grunwalda, WNT, Warszawa 1987.
- [3] Pieńkowski K., Stankiewicz A., *Urządzenie tyrystorowe do hamowania prądem stałym silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9, 1990.
- [4] Sidorowicz J., Ruda A., Szulc Z., *Laboratorium napędu elektrycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.