

2.2. Badanie maszyn prądu stałego

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z właściwościami i podstawowymi charakterystykami bocznikowych, obcowzbudnych i szeregowych maszyn prądu stałego.

7.1. Wiadomości ogólne

7.1.1 Silnik bocznikowy i obcowzbudny

7.1.1.1 Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I_t)$ i charakterystyka mechaniczna $n=f(M)$

7.1.1.2 Charakterystyka momentu obrotowego $M=f(I_t)$

7.1.1.3 Rozruch silnika

7.1.1.4 Regulacja prędkości obrotowej silnika

7.1.1.5 Tyrystorowe zespoły napędowe

7.1.2 Silnik szeregowy

7.1.2.1 Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I)$

7.1.2.2 Charakterystyka momentu $M=f(I)$

7.1.2.3 Rozruch silnika

7.1.2.4 Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego

7.1.3 Prądnica bocznikowa i obcowzbudna

7.1.3.1 Warunki wzbudzenia prądnicy samowzbudnej

7.1.3.2 Charakterystyka zewnętrzna $U=f(I_t)$

7.2. Przebieg ćwiczenia

7.2.1 Badanie silnika obcowzbudnego

7.2.1.1 Dane znamionowe

7.2.1.2 Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I_t)$ i charakterystyka momentu obrotowego $M_u=f(I_t)$

7.2.1.3 Regulacja prędkości obrotowej poprzez zmianę strumienia magnesującego

7.2.1.4 Regulacja prędkości obrotowej przez włączenie rezystancji dodatkowej do obwodu wirnika

7.2.1.5 Stabilizacja prędkości obrotowej przy zastosowaniu układu sprzężenia prędkościowego tyrystorowego zespołu napędowego

7.2.2 Badanie prądnicy obcowzbudnej

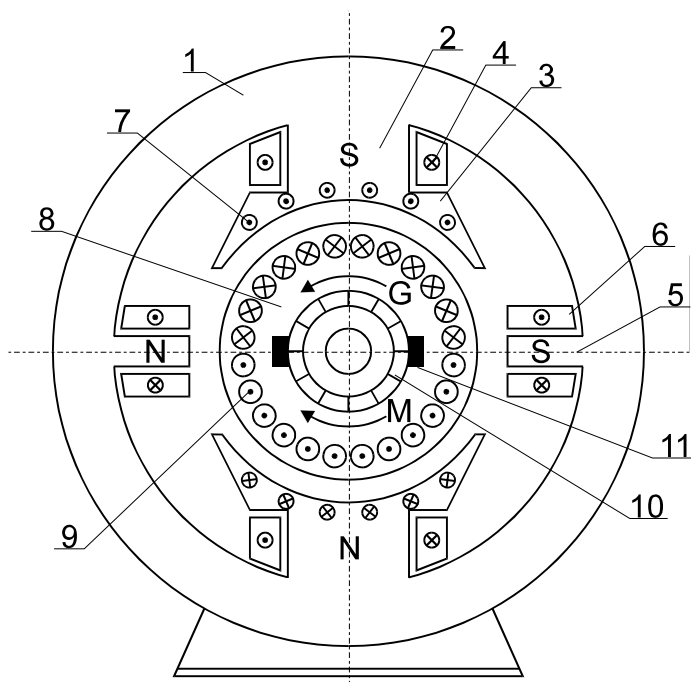
7.7.1 Dane znamionowe

7.7.2 Charakterystyka zewnętrzna $U=f(I_{tp})$

7.3. Uwagi i wnioski

7.1. Wiadomości ogólne

Maszyny prądu stałego mogą pracować w charakterze silników, prądnic i hamulców. Silniki przetwarzają dostarczoną energię elektryczną na energię mechaniczną, prądnice natomiast zamieniają energię mechaniczną maszyny napędzającej na energię elektryczną. Zjawisko przeciwdziałania momentu elektromagnetycznego momentowi maszyny napędzającej, jakie występuje w prądnicach, można wykorzystać do elektrycznego hamowania.

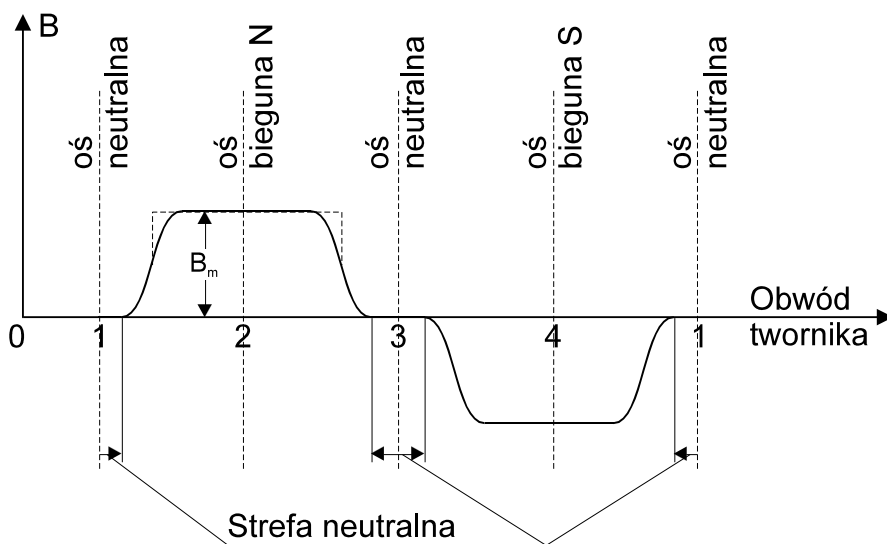


Rys. 7.1. Komutatorowa maszyna prądu stałego [1]

1 - jarzmo stojana, 2 - biegun główny, 3 - nabiegunniki, 4 - uzwojenie wzbudzenia, 5 - biegun komutacyjny, 6 - uzwojenie biegunów komutacyjnych, 7 - uzwojenie kompensacyjne, 8 - wirnik, 9 - uzwojenie wirnika, 10 - komutator, 11 - szczotki

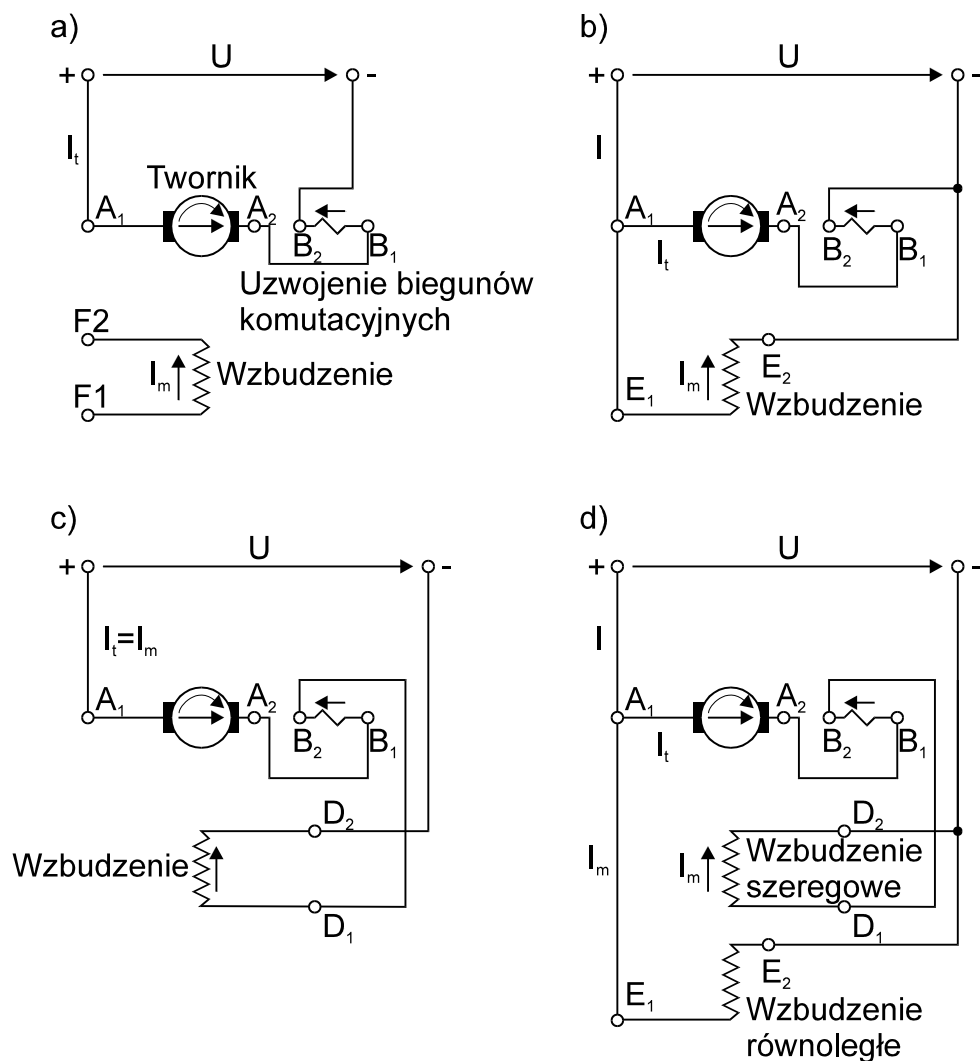
Maszyny prądu stałego mogą być budowane jako komutatorowe i unipolarnie. Drugi rodzaj maszyn nadaje się wyłącznie do celów specjalnych, natomiast maszyny komutatorowe są stosowane powszechnie. Dlatego w tym ćwiczeniu poznamy maszyny komutatorowe.

Na rys. 7.1. został pokazany szkic maszyny prądu stałego. Uzwojenie wzbudzenia mieści się w stojanie, a uzwojenie wirnika jest ułożone w żłobkach wirnika. Prąd stały płynący w uzwojeniu wzbudzenia wytwarza stałe pole magnetyczne. W wyniku oddziaływania tego pola na prąd wirnika powstaje moment elektromagnetyczny. Rys. 7.2. przedstawia rozkład pola magnetycznego wzdłuż rozwiniętego obwodu wirnika.



Rys. 7.2. Obraz pola magnetycznego biegunów głównych na rozwiniętym obwodzie maszyny [2]

Wirnik obraca się z prędkością obrotową n , a przewody umieszczone w żłobkach wirnika poruszają się z prędkością liniową $v=2\pi nr$ w kierunku obracającego się wirnika (r - promień wirnika). Obraz pola magnetycznego z rys. 7.2. dotyczy stanu jałowego maszyny. Podczas normalnej pracy maszyny pole magnetyczne jest polem wypadkowym pola magnetycznego od biegunów głównych (Rys. 7.2.) i pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie twornika. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż obwodu wirnika ulega zniekształceniu, a położenie osi neutralnej przesunięciu. Zjawiska te nasilają się wprost proporcjonalnie do wartości prądu wirnika. Powodują one występowanie napięć pomiędzy wycinkami komutatora, zmniejszenie indukowanej siły elektromotorycznej w obwodzie wirnika oraz wpływają niekorzystnie na przebieg komutacji, a tym samym na pracę szczotek. Częściowe zmniejszenie skutków oddziaływania wirnika osiąga się poprzez zwiększenie szczeliny powietrznej (bardziej równomierny rozkład indukcji) oraz przesuwanie szczotek w kierunku osi neutralnej. Natomiast uzwojenie biegunów komutacyjnych ma za zadanie poprawę komutacji i co za tym idzie uniknięcie iskrzenia szczotek.



Rys. 7.3. Typy maszyn prądu stałego [2]:

- a) maszyna obcowzbudna; b) maszyna bocznikowa;
 c) maszyna szeregowo; d) maszyna szeregowo - bocznikowa

Na rys. 7.3. podane zostały schematy tych maszyn.

Przyjęte w eksploatacji sposoby oznaczania zacisków uzwojeń:

A1 A2 - uzwojenie wirnika

B1 B2 - uzwojenie biegunów komutacyjnych

E1 E2 - uzwojenie wzbudzające bocznikowe

D1 D2 - uzwojenie wzbudzające szeregowe

F1 F2 - uzwojenie wzbudzające obce.

Bieguny komutacyjne umieszczone są w strefie gdzie następuje przejście zwojów wirnika ze strefy oddziaływania jednego bieguna głównego do drugiego. Indukowana przez uzwojenie biegunów komutacyjnych siła elektromotoryczna znosi siłę elektromotoryczną indukowaną w zwojach w tym rejonie i zapobiega iskrzeniu szczotek. Aby zlikwidować szkodliwy wpływ oddziaływania wirnika w dużych maszynach stosuje się uzwojenia kompensacyjne. Uzwojenie to jest rozłożone równomiernie w strefie biegunów głównych i umieszczone w żłobkach nabiegunków. Jest ono połączone szeregowo z uzwojeniem wirnika, a zmianie kierunku prądu w obwodzie wirnika odpowiada zmiana kierunku prądu w uzwojeniu kompensacyjnym. Stosowanie uzwojenia kompensacyjnego znacznie podraża koszty maszyny, ale pozwala na powiększenie mocy znamionowej maszyny przy tych samych wymiarach i prędkości obrotowej.

Ze względu na sposób zasilania obwodu wzbudzenia rozróżniamy następujące typy maszyn prądu stałego

- maszyny obcowzbudne (rys. 7.3a)
- maszyny samowzbudne: bocznikowe (rys. 7.3b); szeregowo (rys. 7.3c); szeregowo-bocznikowe (rys. 7.3d)

Wszystkie niezbędne dane techniczne dotyczące maszyn prądu stałego podane są na tabliczce znamionowej.

Tabliczka znamionowa maszyny prądu stałego powinna zawierać: napięcie znamionowe U_n ; prąd znamionowy I_m ; napięcie znamionowe wzbudzenia U_{mn} ; prąd znamionowy wzbudzenia I_{mn} (dotyczy maszyn obcowzbudnych); moc znamionową P_n ; obrotową prędkość znamionową n_n ; sprawność η .

Właściwości ruchowe poszczególnych typów maszyn są różne, co pozwala zaspokoić rozmaite wymagania wynikające z praktyki. Właściwości te można określić na podstawie znajomości typu maszyny oraz zależności określających siłę elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniu wirnika i moment elektromagnetyczny. Pole magnetyczne wytworzone przez prąd w uzwojeniu wzbudzenia, przecinając uzwojenie wirnika indukuje w nim siłę elektromotoryczną zgodnie z prawem Faradaya

$$E = Blv = c_e \Phi n \quad (7.1)$$

gdzie: c_e jest stałą zależną od parametrów konstrukcyjnych maszyny.

Z prawa Laplace'a wiadomo, że w wyniku współdziałania prądu wirnika i pola magnetycznego wytworzonego przez prąd wzbudzenia powstaje moment elektromagnetyczny:

$$M_{em} = F \cdot r = BI_t l \cdot r = c_m \Phi I_t \quad (7.2)$$

gdzie: c_m jest stałą zależną od parametrów konstrukcyjnych maszyny.

W ćwiczeniu zapoznamy się z silnikiem bocznikowym oraz prądnicą obcowzbudną.

7.1.1. Silnik bocznikowy i obcowzbudny

Na podstawie II prawa Kirchhoffa dla silnika bocznikowego (rys. 7.3b) zasilanego napięciem stałym U można napisać zależność:

$$U = E + (I_t \sum R_t + 2\Delta U_p) \quad (7.3)$$

gdzie: E - indukowana siła elektromotoryczna wyrażona wzorem (7.1);

$\sum R_t$ - suma rezystancji obwodu wirnika;

ΔU_p - spadek napięcia na rezystancji przejścia między szczotką a komutatorem ($\Delta U_p \approx 1V$).

Pomijając ΔU_p wzór (7.3) można przekształcić:

$$I_t = \frac{U - E}{\sum R_t} = \frac{U - c_e \Phi n}{\sum R_t} \quad (7.4)$$

7.1.1.1 Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I_t)$ i charakterystyka mechaniczna $n=f(M)$

Charakterystyka zewnętrzna jest to zależność prędkości obrotowej silnika od prądu wirnika przy stałym napięciu zasilającym i stałym prądzie wzbudzenia. Z przekształcenia wzorów (7.1) i (7.3) wynika, że prędkość obrotowa wyrażona zależnością $n=f(I_t)$

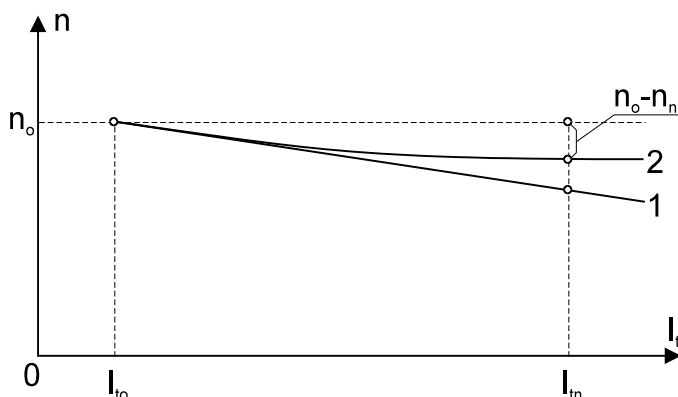
$$n = \frac{E}{c_e \Phi} - \frac{I_t \sum R_t}{c_e \Phi} \quad (7.5)$$

przy $U=\text{const}$ i $\Phi=\text{const}$ jest funkcją malejącą (Rys. 7.4 - prosta 1).

Rzeczywisty przebieg charakterystyki zewnętrznej jest nieco inny, ponieważ przy dużych obciążeniach prędkość obrotowa nieznacznie wzrasta z powodu zmniejszania się strumienia magnetycznego. Jest to wynikiem nakładania się na pole magnetyczne biegunów głównych pola powstającego od prądu wirnika - tzw. oddziaływanie wirnika. Zaletą obydwu omawianych silników jest stosunkowo sztywna charakterystyka zewnętrzna. Zmienność prędkości obrotowej, definiowana dla warunków znamionowych jako

$$\Delta n_{\%} = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \cdot 100\% \quad (7.6)$$

waha się od 2 do 5%, gdzie: n_0 - prędkość obrotowa przy biegu jałowym.



Rys. 7.4. Charakterystyka zewnętrzna silnika bocznikowego
1 - przy pominięciu wpływu oddziaływania wirnika; 2 - z uwzględnieniem oddziaływania wirnika

Charakterystyka mechaniczna $n=f(M)$ pozwala ocenić zachowanie się silnika w układzie napędowym. Z wzorów (7.2) i (7.4) wynika, że dla $\Phi=\text{const}$ (czyli nie uwzględniając oddziaływania wirnika) charakterystyka ta będzie funkcją malejącą. Z warunków statecznej pracy układu napędowego

$$M - M_h = 0 \tag{7.7}$$

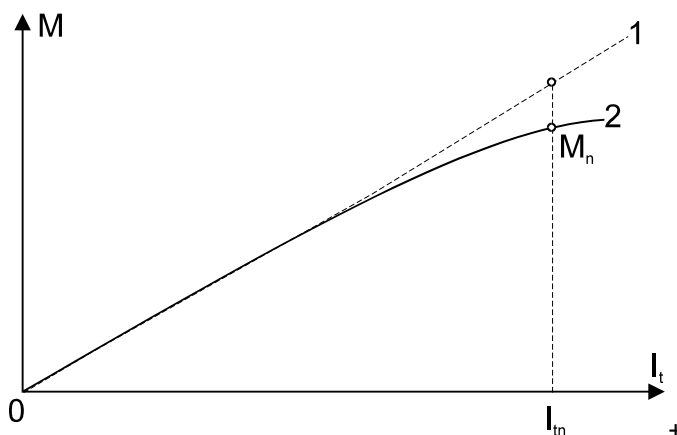
$$\frac{d(M - M_h)}{dn} < 0$$

gdzie: M - moment silnika napędowego; M_h - moment hamujący,

wynika, że przy stałym momencie M_h charakterystyka mechaniczna $n=f(M)$ powinna być funkcją malejącą. W przeciwnym przypadku mogłoby wystąpić rozbieganie lub utknięcie silnika. Sytuacja taka jest możliwa przy znacznej reakcji wirnika o charakterze rozmagnesowującym.

7.1.1.2. Charakterystyka momentu obrotowego $M=f(I_t)$

Charakterystyka momentu obrotowego jest to zależność pomiędzy momentem elektromagnetycznym rozwijanym przez silnik i prądem wirnika, przy stałym prądzie wzbudzenia. Ze wzoru (7.2) wynika, że dla stałego strumienia wykres ten będzie linią prostą. Niewielkie odchylenie od tej linii (Rys. 7. 5) jest skutkiem zmniejszenia się strumienia w wyniku oddziaływania wirnika.



Rys. 7.5. Charakterystyka momentu obrotowego silnika bocznikowego
1 - przy pominięciu wpływu oddziaływania wirnika; 2 - z uwzględnieniem oddziaływania wirnika

7.1.1.3. Rozruch silnika

W chwili rozruchu $n=0$, więc prąd rozruchowy wynosi

$$I_{tr} = \frac{U}{\sum R_t} \quad (7.8)$$

i jest około 10...30 razy większy od prądu znamionowego. Przepływ tak dużego prądu może uszkodzić maszynę, jak również stanowi zbyt duże obciążenie sieci zasilającej. W związku z tym rozruch silnika dokonuje się poprzez regulację napięcia od 0 do wartości znamionowej (przy użyciu tyrystorowych zespołów napędowych, stosowanych w przemyśle do napędu silników bocznikowych) lub poprzez włączenie szeregowo z wirnikiem regulowanego rezystora zwanego rozrusznikiem.

Przy zastosowaniu rozrusznika prąd rozruchowy:

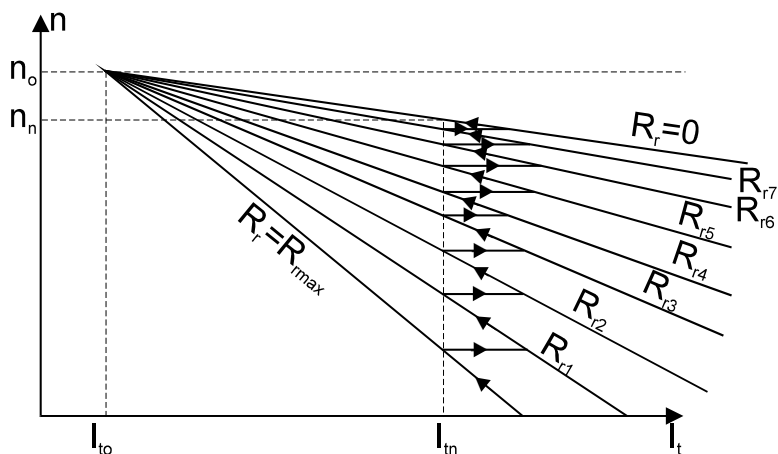
$$I_{tr} = \frac{U}{\sum R_t + R_r} \quad (7.9)$$

gdzie: R_r - rezystancja rozrusznika.

Wartość rezystancji R_r dobiera się tak, aby prąd rozruchowy nie przekraczał $(1,2...2)I_{in}$. Rozruch silnika bocznikowego przeprowadza się zmieniając rezystancję R_r od wartości maksymalnej do zera, przy maksymalnym strumieniu wytworzonym przez uzwojenie. Ponieważ będzie zmniejszony prąd I_t dlatego, jak wynika ze wzoru (7.2), należy podczas rozruchu zapewnić maksymalny stru-

mień, aby uzyskać duży moment elektromagnetyczny silnika i krótki czas rozruchu. Rozrusznik silnika bocznikowego jest więc zbudowany w taki sposób, aby w obwód wirnika włączana była regulowana rezystancja, natomiast obwód wzbudzenia włączany był bezpośrednio do sieci. W ćwiczeniu został zastosowany tyrystorowy zespół napędowy.

Na rys. 7.6 przedstawiono wpływ rezystancji rozrusznika na charakterystykę zewnętrzną silnika i przebieg rozruchu.



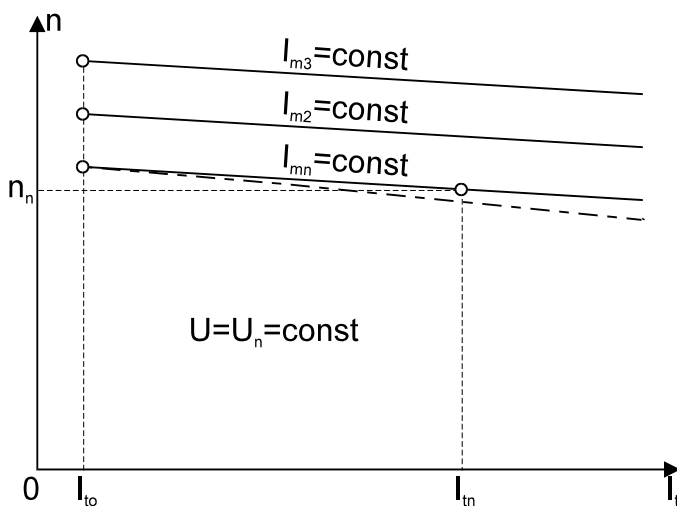
Rys. 7.6. Przebieg rozruchu silnika bocznikowego

1.1.4. Regulacja prędkości obrotowej silnika bocznikowego

Regulację prędkości obrotowej silnika bocznikowego możemy przeprowadzić przez:

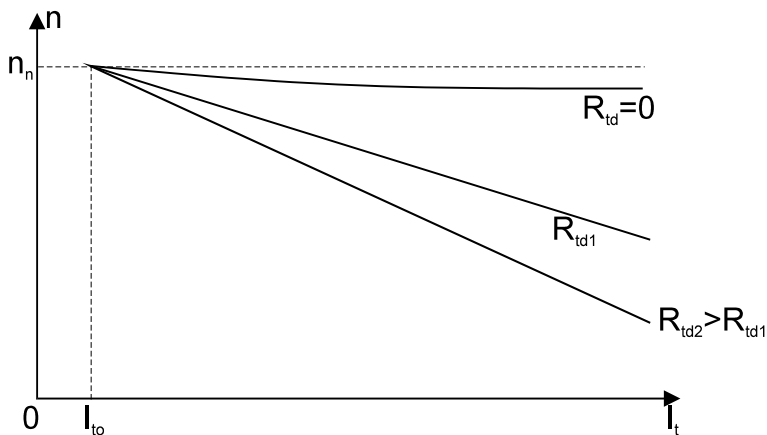
- zmianę strumienia magnetycznego,
- zmianę rezystancji w obwodzie wirnika,
- zmianę napięcia zasilającego.

Ad a) Zmianę wartości strumienia magnetycznego można uzyskać włączając rezystancję dodatkową do obwodu wzbudzenia. Tym sposobem możemy regulować prędkość w **górną** (Rys. 7.7.).



Rys. 7.7. Charakterystyki zewnętrzne silnika bocznikowego przy różnych wartościach strumienia magnesującego

Ad b) Włączenie rezystancji dodatkowej w obwód wirnika pozwala uzyskać regulację prędkości w dół.



Rys. 7.8. Charakterystyki zewnętrzne silnika bocznikowego przy włączonej szeregowo rezystancji dodatkowej R_d w obwodzie wirnika

Ze wzoru

$$n = \frac{U - I_t \sum R_r - I_t R_d}{c_e \Phi} \quad (7.10)$$

wynika, że im większy opór dodatkowy R_d , tym charakterystyka zewnętrzna (Rys. 7.8.) jest silniej opadająca, a zatem ten sposób regulacji powoduje zmniejszenie sztywności charakterystyki zewnętrznej i wówczas prędkość w znacznym stopniu zależy od obciążenia silnika.

Dodatkową wadą tego sposobu regulacji prędkości obrotowej są znaczne straty energii wydzielanej w postaci ciepła w oporniku dodatkowym. Strat energii można uniknąć poprzez zmianę wartości napięcia zasilającego silnik (sposób c) za pomocą specjalnych układów, np. układu Leonarda lub obecnie najczęściej stosowanego układu tyrystorowego.

7.1.1.5. Tyrystorowe zespoły napędowe

Tyrystorowe zespoły napędowe są używane jako regulatory napięcia stałego lub prędkości obrotowej silników bocznikowych w warunkach przemysłowych. Układy DMM wyposażone są w jednofazowy mostkowy prostownik wzbudzenia zaopatrzony na wyjściu w filtr przepięciowy RC. Silnik sterowany układem tyrystorowym DMM pracuje więc praktycznie jako silnik obcowzbudny. Tyrystorowy zespół napędowy umożliwia stabilizację napięcia zasilającego silnik lub prędkości obrotowej silnika. Sprężenie prędkościowe stosowane jako ujemne sprężenie zwrotne regulatora jest realizowane za pomocą prądniczki tachometrycznej prądu stałego sprzężonej z silnikiem.

Falownik oddający energię do sieci prądu przemiennego, zastosowany w ćwiczeniu jako obciążenie prądniczy prądu stałego jest również układem tyrystorowym.

Regulację napięcia w układzie tyrystorowym DMM jak i obciążenia w falowniku uzyskuje się poprzez regulację kąta przewodzenia tyrystorów pracujących w tych układach.

7.1.2. Silnik szeregowy

Silniki szeregowe ze względu na swoje właściwości (duży moment rozruchowy i dużą rozpiętość osiąganych prędkości obrotowych) stosowane były głównie w trakcji elektrycznej (koleje, tramwaje, trolejbusy, kolejki, wózki akumulatorowe), gdzie pracowały sprzęgnięte na stałe z osią pojazdu w sposób nierozłączny.

7.1.2.1. Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I)$

W silniku szeregowym uzwojenie wzbudzające i uzwojenie twornika połączone są szeregowo, tak więc strumień zmienia się proporcjonalnie do zmian obciążenia. Dla silnika szeregowego

$$U = E + I(\sum R_t + R_m) + 2\Delta U_p \quad (7.11)$$

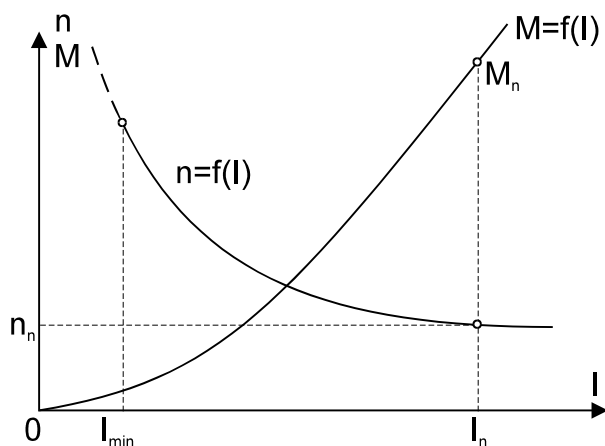
gdzie:

- E - indukowana siła elektromotoryczna;
- $\sum R_t$ - suma rezystancji obwodu twornika;
- R_m - rezystancja uzwojenia wzbudzenia;
- ΔU_p - spadek napięcia na rezystancji przejścia między szczotką a komutator ($\Delta U_p \approx 1V$ - pomijalnie mały).

Prędkość obrotowa silnika szeregowego po uwzględnieniu zależności strumienia od prądu twornika przyjmie postać:

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{U - I(\sum R_t + R_m)}{C_e \Phi} \approx \frac{U - I(\sum R_t + R_m)}{C_{el} I} \approx \frac{U}{C_{el} I} - C \quad (7.12)$$

gdzie: $C = \frac{\sum R_t + R_m}{C_{el}} = \text{const.}$



Rys. 7.9. Charakterystyka zewnętrzna i charakterystyka momentu silnika szeregowego

Ze wzoru (7.12) wynika, że charakterystyka zewnętrzna silnika $n=f(I)$ zdejmowana przy stałym napięciu zasilającym będzie miała kształt hiperboliczny. Przy zmniejszeniu obciążenia poniżej $0,5 I_n$ następuje znaczny wzrost prędkości obrotowej, co stwarza niebezpieczeństwo **rozbiegania się silnika**. Rozbieganie się silnika polega na wzroście prędkości obrotowej ponad wartości dopuszczalne, czego konsekwencją jest uszkodzenie części mechanicznych i zniszczenie silnika. **Ponadto stanowi niebezpieczeństwo dla obsługi.** Całkowite odciążenie silnika szeregowego jest niedopuszczalne. Dlatego silniki szeregowo należy łączyć trwale z napędzanymi przez nie maszynami za pomocą sprzęgieł nierozłączalnych lub przekładni zębatych, a nie przekładni pasowych. Na tabliczce zna-

mionowej silnika szeregowego powinna być podana dopuszczalna obrotowa prędkość maksymalna.

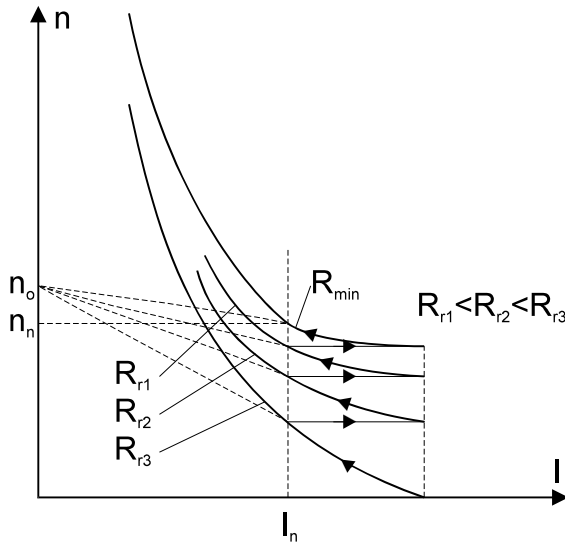
7.1.7. Charakterystyka momentu $M=f(I)$

Charakterystyka momentu, podobnie jak charakterystyka zewnętrzna wyznaczana jest przy stałym napięciu zasilającym. Kształt tej charakterystyki po uwzględnieniu proporcjonalności strumienia od prądu twornika przyjmie postać:

$$M = c_m \Phi I = c_{m1} I^2 \quad (7.13)$$

Wykresem tej charakterystyki jest więc parabola. Cenną właściwością silnika szeregowego jest szybki wzrost momentu przy wzroście prądu, co pozwala na zastosowanie go do pracy w warunkach dużych przeciążeń i ciężkich rozruchów. Na rysunku 7.9. zostały pokazane charakterystyki zewnętrzna i momentu dla silnika szeregowego. W rzeczywistości obydwie charakterystyki dla dużych prądów twornika, w wyniku oddziaływania twornika oraz nasycenia obwodu magnetycznego, nieznacznie odbiegają w stosunku do krzywych wynikających ze wzorów (7.12) i (7.13) (tzn. hiperboli i paraboli).

7.1.2.3. Rozruch silnika



Rys. 7.10. Przebieg rozruchu silnika szeregowego

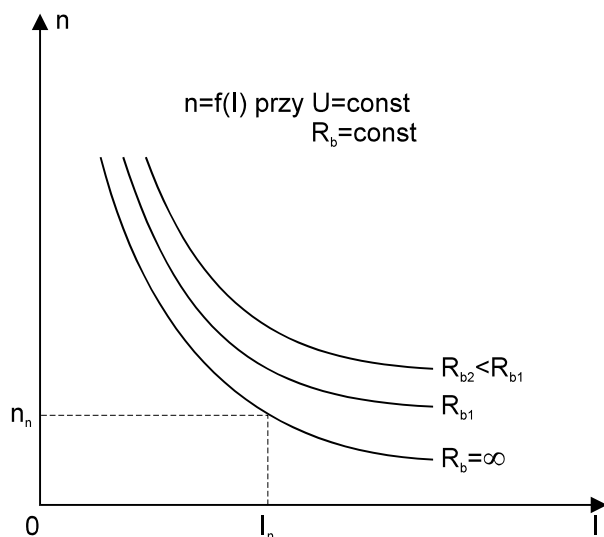
Rozruchu silnika szeregowego dokonuje się przy obciążeniu, poprzez zmianę rezystancji rozrusznika R_r włączonego szeregowo z twornikiem. Wzrostowi rezystancji R_r odpowiada mniejsza prędkość obrotowa przy tym samym prądzie

obciążenia (rys. 7.10.), a zatem poprzez regulację R_r od maksimum do zera osiągamy płynny wzrost prędkości obrotowej silnika od zera do wartości znamionowej.

7.1.2.4. Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego

Regulację prędkości obrotowej w silniku szeregowym można przeprowadzać przez:

1. zmianę strumienia magnetycznego,
2. zmianę rezystancji w obwodzie twornika,
3. zmianę napięcia zasilającego.



Rys. 7.11. Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego przez bocznikowanie uzwojenia wzbudającego

Ad.1. Zmianę wartości strumienia magnetycznego osiąga się przez bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia lub uzwojenia twornika silnika szeregowego. W pierwszym sposobie, po zbocznikowaniu, przez uzwojenie magnesujące płynie mniejszy prąd i w konsekwencji wzrasta prędkość obrotowa (Rys. 7.11.).

Sposób ten zapewnia regulację prędkości obrotowej w górę. Regulacja prędkości obrotowej przez bocznikowanie uzwojenia twornika jest regulacją w dół. Jest to jednak sposób nieekonomiczny (małe efekty, duże straty energii w boczniku) i rzadko stosowany.

Ad.2. Ten sposób regulacji polega na włączeniu dodatkowej rezystancji szeregowo z wirnikiem i umożliwia regulację prędkości obrotowej w dół. Jest to również sposób nieekonomiczny.

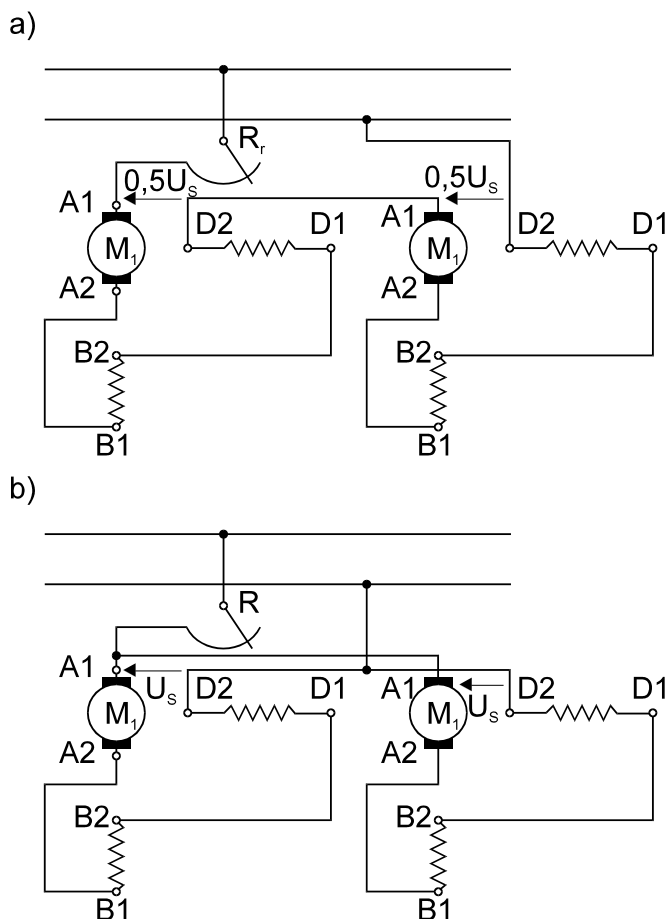
Ad.3. Regulację prędkości przez zmianę napięcia zasilającego uzyskuje się przez zmianę napięcia w sieci zasilającej lub przez łączenie szeregowo bądź szeregowo-równoległe dwóch lub więcej mechanicznie ze sobą, sprzęgniętych silników. Najbardziej rozpowszechnionym układem jest układ trakcyjny jako zespół dwóch, czterech lub sześciu silników szeregowych, które początkowo łączy się szeregowo, a następnie równoległe. Na rysunku 7.12. pokazany został przykładowo sposób łączenia zespołu dwóch silników. Przy połączeniu szeregowym na każdy silnik przypada połowa napięcia i prędkość obrotowa wynosi według wzoru (7.12):

$$n_{sz} = \frac{0,5U - (\sum R_t + R_m)I}{C_e \Phi} \quad (7.14)$$

natomiast przy połączeniu równoległym:

$$n_{sz} = \frac{U - (\sum R_t + R_m)I}{C_e \Phi} \quad (7.15)$$

czyli prędkość obrotowa n_r jest prawie dwa razy większa niż n_{sz} . Układ trakcyjny składający się z czterech silników daje znacznie większe możliwości w zakresie płynności regulacji, gdyż napięcie na silnikach może się zmieniać od $1/4 U$ (połączenie szeregowo) poprzez $1/2 U$ (połączenie szeregowo-równoległe) do U (połączenie równoległe). W polskich kolejach stosowane jest napięcie sieci 3 kV a napięcie znamionowe silników wynosi 1,5 kV, z tego względu silniki pracują zawsze co najmniej po dwa szeregowo, co pozwala na dwa stopnie regulacji dla zespołu czterech silników i trzy stopnie regulacji dla zespołu sześciu silników. Złagodzenie gwałtownej zmiany prądu można osiągać używając rozrusznika podobnie jak przy rozruchu. Odpowiednio zaprojektowany rozrusznik na pracę długotrwałą może pełnić rolę regulatora prędkości. W ten sposób łączy się dwie metody regulacji prędkości, a regulacja staje się bardziej płynna.



Rys. 7.12. Układ trakcyjny dwóch silników szeregowych [1]:
 a) połączenie szeregowe silników;
 b) połączenie równoległe silników

7.1.3. Prądnica bocznikowa i obcowzbudna

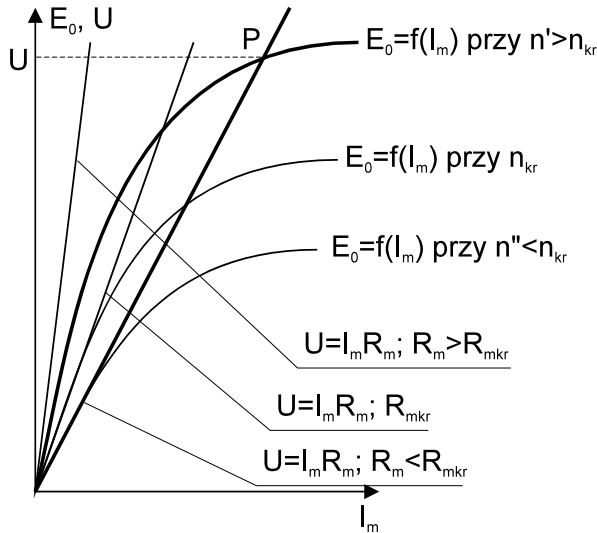
Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika prądnicy zależy, zgodnie ze wzorem (7.1), od prędkości maszyny napędzającej i strumienia magnesyjnego. Zgodnie z II prawem Kirchhoffa napięcie na zaciskach prądnicy będzie różnicą pomiędzy indukowaną siłą elektromotoryczną a spadkami napięć na rezystancji obwodu twornika i rezystancji przejścia pomiędzy szczotkami a komutatorem:

$$U = E - (I_t \sum R_t + 2\Delta U_p) \quad (7.16)$$

7.1.3.1. Warunki wzbudzenia prądnicy samowzbudnej

Uzwojenie wzbudzające prądnicy obcowzbudnej (Rys. 7.3a) jest zasilane z sieci prądu stałego, natomiast uzwojenie wzbudzające prądnicy bocznikowej samowzbudnej jest równolegle załączone do zacisków twornika. Sposób połączenia zacisków jest zależny od kierunku wirowania maszyny napędzającej; przy wirowaniu w lewo należy połączyć zaciski B2 i E1 oraz A1 i E2, a przy wirowaniu w prawo A1 i E1 oraz B2 i E2. Nieprawidłowe połączenie zacisków spowoduje zlikwidowanie strumienia magnetyzmu szczątkowego maszyny przez prąd płynący w uzwojeniu wzbudzenia, co uniemożliwi wzbudzenie prądnicy.

Warunkiem wzbudzenia prądnicy bocznikowej samowzbudnej obok istnienia magnetyzmu szczątkowego jest to, aby rezystancja obwodu wzbudzającego była mniejsza od rezystancji maksymalnej, tzw. krytycznej R_{mkr} , a prędkość obrotowa większa od prędkości obrotowej minimalnej n_{kr} przy zachowaniu kierunku zapewniającego wzrost strumienia.



Rys. 7.13 Warunki samowzbudzenia prądnicy bocznikowej

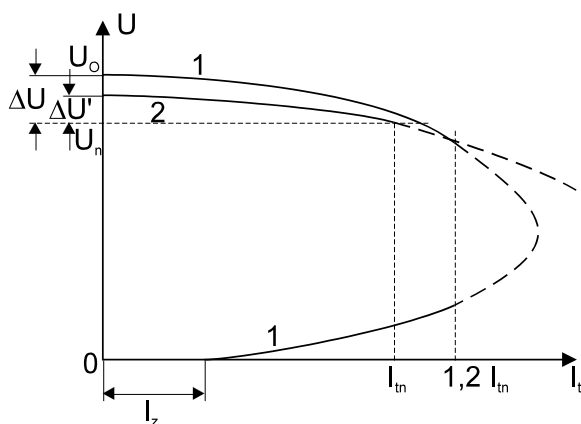
Przebieg charakterystyki biegu jałowego prądnicy $E_0=f(I_m)$ zależy od prędkości maszyny napędzającej. Im wyższa prędkość tym prądnica osiąga wyższe wartości indukowanej siły elektromotorycznej przy tym samym prądzie wzbudzenia I_m . Rezystancja krytyczna R_{mkr} jest to taka rezystancja uzwojenia wzbudzającego, przy której prosta $U = I_m \cdot R_{mkr}$ jest styczna do charakterystyki biegu jałowego prądnicy $E_0=f(I_m)$. Jeżeli $R_m < R_{mkr}$, charakterystyki $E_0=f(I_m)$ i $U = I_m \cdot R_m$ przecinają się określając napięcie wzbudzenia prądnicy przy biegu jałowym. Natomiast, jeżeli charakterystyki te nie mają punktu wspólnego maszyna **nie może pracować jako prądnica samowzbudna**. Spełnienie warun-

ków $n > n_{kr}$ i $R_m < R_{mkr}$ jak pokazuje rys. 7.13 zapewnia przecięcie charakterystyki biegu jałowego prądnicy $E_0 = f(I_m)$ z prostą $I_m R_m = f(I_m)$ i ustalenie punktu pracy, to jest napięcia, do którego prądnica może się wzbudzić przy biegu jałowym.

Uruchomienie prądnicy przeprowadzamy przy maksymalnej rezystancji włączonej do obwodu wzbudzenia, którą następnie stopniowo zmniejszamy. Ma to zapobiec pojawieniu się nagle zbyt dużego napięcia na zaciskach prądnicy.

7.1.3.2. Charakterystyka zewnętrzna $U = f(I_t)$

Charakterystyka zewnętrzna prądnicy jest to zależność napięcia na zaciskach prądnicy od prądu obciążenia przy stałej prędkości obrotowej, oraz - dla prądnicy samowzbudnej - przy stałej rezystancji w obwodzie wzbudzenia $R_m = \text{const}$, natomiast dla prądnicy obcowzbudnej - przy stałym napięciu obwodu wzbudzenia $U_m = \text{const}$. Jak wynika z rys. 7.14 prąd zwarcia prądnicy bocznikowej jest znacznie mniejszy niż prąd znamionowy i zależy od siły elektromotorycznej będącej wynikiem działania magnetyzmu szczątkowego. Prąd zwarcia prądnicy obcowzbudnej (przy pełnym wzbudzeniu) może osiągnąć 15...20-krotną wartość prądu znamionowego.



Rys. 7.14 Charakterystyki zewnętrzne prądnicy: 1 - samowzbudnej; 2 - obcowzbudnej

Zaletą prądnicy obcowzbudnej jest niewielka zmienność napięcia określona równaniem

$$\Delta u = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\% \quad (7.17)$$

która mieści się w granicach (5...10)%. Dla prądnicy samowzbudnej wynosi ona (15...25)%.

7.2. Badania laboratoryjne

7.2.1. Badanie silnika obcowzbudnego

7.2.1.1. Dane znamionowe

Należy zapoznać się z tabliczką znamionową badanego silnika i maszyny obcowzbudnej pracującej w układzie jako hamulec elektryczny. Dane znamionowe umieścić w sprawozdaniu.

1. Silnik obcowzbudny

Typ silnika...

Moc znamionowa $P_n=...$, napięcie znamionowe $U_n=...$, prąd znamionowy twornika $I_n=...$, znamionowa prędkość obrotowa $n_n=...$, prąd wzbudzenia znamionowy $I_{mn}=...$

2. Prądnica obcowzbudna

Typ prądnicy ...

Moc znamionowa $P_n=...$, napięcie znamionowe $U_n=...$, prąd znamionowy twornika $I_n=...$, znamionowa prędkość obrotowa $n_n=...$, prąd wzbudzenia znamionowy $I_{mn}=...$

Oznaczenia na rysunku 7.15:

M - silnik

G - prądnica (hamulec)

A₁ - amperomierz do pomiaru prądu twornika silnika

A₂ - amperomierz do pomiaru prądu wzbudzenia silnika

A₃ - amperomierz do pomiaru prądu wzbudzenia prądnicy

A₄ - amperomierz do pomiaru prądu twornika prądnicy

V₁ - woltomierz do pomiaru napięcia na zaciskach silnika

V₂ - woltomierz do pomiaru napięcia na zaciskach prądnicy

R_{m1} - opornik do regulacji prądu wzbudzenia silnika

R_{m2} - opornik do regulacji prądu wzbudzenia prądnicy

R_d - opornik dodatkowy w obwodzie twornika silnika

DMM - zespół tyrystorowy do napędu silników prądu stałego

F - falownik stanowiący obciążenie prądnicy

(praca hamulcowa).

Wykonywanie pomiarów.

Po zapoznaniu się z układem i sprawdzeniu połączeń należy:

- położenie wyłączników w_1 i w_3 ustawić przed załączeniem napięcia, wyłącznik w_2 pozostawić otwarty,
- sprawdzić czy pokrętła regulacyjne napięcia zasilającego i obciążenia są ustawione w pozycji „min”,
- opornik R_{m1} ustawić w położeniu minimalnej rezystancji,
- opornik R_{m2} ustawić w położeniu maksymalnej rezystancji,
- załączyć do układu napięcie przemiennie poprzez zamknięcie wyłącznika na tablicy zasilającej (powoduje to zasilenie mierników cyfrowych, włączenie zasilania układów sterujących zespołu napędowego DMM i falownika oraz zasilenie obwodów wzbudzenia silnika i prądnicy),
- załączyć zasilanie układu DMM poprzez stycznik (zielony przycisk) i dokonać rozruchu silnika poprzez regulację napięcia zasilającego silnik od 0 do wartości znamionowej,
- opornikiem R_{m1} wyregulować prąd wzbudzenia silnika do wartości znamionowej, wykonać pomiary dla stanu jałowego silnika, zamknąć wyłącznik w_2 (poprzez stycznik) i obciążyć układ silnik - prądnica regulując pokrętłem obciążenia falownika.

Uwaga. Prąd w obwodzie wzbudzenia prądnicy należy regulować opornikiem R_{m2} tak, aby napięcie na zaciskach prądnicy nie przekraczało 1,2 napięcia znamionowego prądnicy. Najlepiej ustawić prąd wzbudzenia w obwodzie prądnicy **0,26A**.

7.2.1.2. Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I_t)$ i charakterystyka momentu obrotowego $M_u=f(I_t)$ przy $U=U_n=const$ i $R_m=const$

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 7.2.1. (Rys. 7.15).

Wyłącznik w_1 zamknąć a w_3 pozostawić otwarty. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachowując kolejność czynności podaną wyżej (7.2.1.), przy ustawionej znamionowej wartości prądu wzbudzenia silnika. Obciążyć układ tak, aby prąd w obwodzie twornika silnika zmieniał się w granicach od I_{10} do $1,2I_m$. Wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w tabeli 7.1.

Tabela 7.1.

 $U_m=220V$

Lp.	n	U_t	I_t	I_m	P_{1s}	U_p	I_{1p}	P_{2p}	$P_{1p}=P_{2s}$	M_u	η_s
	obr/min	V	A	A	W	V	A	W	W	Nm	-
1.											
2.											
3.											
4.											
5.											
6.											
7.											
8.											
9.											
10.											

gdzie:

 $P_{1s}=U_t I_t + U_m I_m$ - moc pobierana przez silnik, $P_{2p}=U_p I_{1p}$ - moc oddawana przez prądnicę, $P_{1p} = P_{2s} = \frac{P_{1s} + P_{2p}}{2}$ - moc oddawana przez silnik do prądnicy (dla zbliżonych parametrów maszyn przyjęto równy

rozdział strat mocy na silnik i prądnicę.)

 $M_u = \frac{P_{2s}}{\omega} = \frac{P_{2s} \cdot 60}{2\pi n}$ - moment użyteczny na wale silnika, $\eta_s = \frac{P_{2s}}{P_{1s}}$ - sprawność silnika.

7.2.1.3. Regulacja prędkości obrotowej przez zmianę strumienia magnesującego

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 7.2.1 (Rys. 7.15).

Górna wartość obrotów silnika jest ograniczona ze względu na wytrzymałość mechaniczną twornika i dlatego rezystancję R_m należy zmienić tak, aby prędkość obrotowa w stanie jałowym nie przekraczała $1,2 n_n$.

Wyłącznik w_1 zamknąć a w_3 pozostawić otwarty. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachowując kolejność czynności podaną wyżej (7.2.1), dla dwóch różnych od znamionowej wartości prądu wzbudzenia (R_{m1}). Obciążyć układ tak, aby prąd w obwodzie twornika silnika zmieniał się w granicach od I_{10} do $1,2I_{1n}$. Wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w tabelach takich jak 7.2.

Tabela 7.2.

$I_m = \dots$

Lp.	n	I_t
	obr/min	A
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

7.2.1.4. Regulacja prędkości obrotowej przez włączenie rezystancji dodatkowej do obwodu twornika

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 7.2.1, (Rys. 7.15). przy włączeniu w obwód twornika silnika rezystancji dodatkowej $R_d = 7\Omega$.

Wyłączniki w_1 i w_3 otworzyć. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachowując kolejność czynności podaną wyżej (7.2.1), przy ustawionej znamionowej wartości prądu wzbudzenia R_{m1} . Obciążyć układ tak, aby prąd w obwo-

dzie twornika silnika zmieniał się w granicach od I_{t0} do $1,2I_{tn}$. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 7.3.

Tabela 7.3.

$$R_d=7\Omega \quad U_s=...$$

Lp.	n	I_t
	obr/min	A
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

7.2.1.5. Regulacja prędkości obrotowej napięciem i stabilizacja prędkości obrotowej silnika przy zastosowaniu sprzężenia prędkościowego tyrystorowego układu napędowego

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 7.2.1. (Rys. 7.15).

Wyłączniki w_1 i w_3 zamknąć. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachowując kolejność czynności podaną wyżej (7.2.1), przy ustawionej znamionowej wartości prądu wzbudzenia (R_{m1}). **Poprzez regulację napięcia zasilającego silnik ustawić zadaną wartość prędkości obrotowej silnika.**

***Uwaga.** Podczas pomiarów **nie należy** regulować napięcia zasilającego silnik.*

Obciążyć układ tak, aby prąd w obwodzie twornika silnika zmieniał się w granicach od I_{t0} do $1,2I_{tn}$.

Wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w tabeli 7.4.

Tabela 7.4.

 $I_m = \dots$

Lp.	n	I_t
	obr/min	A
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

W sprawozdaniu należy zamieścić:

1. Przykładowe obliczenia.
2. Charakterystyki wykreślone na papierze milimetrowym: momentu $M_u = f(I_t)$; mechaniczną $n = f(M_u)$; sprawności $\eta_s = f(I_t)$ oraz na wspólnych wykresach charakterystyki zewnętrzne: przy różnych wartościach strumienia magnesującego $n = f(I_t)$ (także przy wartości znamionowej), z włączoną rezystancją w obwód twornika $n = f(I_t)$ i przy włączonym sprzężeniu prędkościowym zespołu napędowego silnika.
3. Obliczoną - na podstawie charakterystyki zewnętrznej wyznaczonej przy znamionowym prądzie wzbudzenia I_{m1} i przy $R_d = 0$ - znamionową zmienność prędkości obrotowej.

7.7. Badanie prądnicy obcowzbudnej

7.7.1. Dane znamionowe

Dane znamionowe prądnicy obcowzbudnej podane na tabliczce znamionowej umieścić w sprawozdaniu.

7.7.2. Charakterystyka zewnętrzna $U = f(I_{tp})$ przy $R_{m2} = \text{const}$ i $n = n_n = \text{const}$

Włączenie sprzężenia prędkościowego zespołu napędowego sterującego silnik zapewnia stałą prędkość prądnicy podczas pomiaru.

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 7.2.1. (Rys. 7.15).

Wyłączniki w_1 i w_3 zamknąć. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachowując kolejność czynności podaną wyżej (7.2.1). Za pomocą opornika R_{m2} ustawić prąd wzbudzenia w obwodzie prądnic $0,26A$. Poprzez regulację napięcia zasilającego silnik ustawić znamionową wartość prędkości obrotowej prądnicy. Obciążyć układ tak, aby prąd w obwodzie twornika prądnicy zmienił się w granicach od 0 do $1,2I_m$.

Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 7.5.

Tabela 7.5.

$n=...$ $I_{mp}=...$

Lp.	U	I_t
	V	A
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

Na podstawie pomiarów należy w sprawozdaniu wykreślić charakterystykę zewnętrzną prądnicy obcowzbudnej $U=f(I_{tp})$ oraz obliczyć znamionową zmienność napięcia prądnicy.

7.3. Uwagi i wnioski

Omówić kształt charakterystyk silnika obcowzbudnego. Określić wady i zalety eksploatacyjne silnika obcowzbudnego i prądnicy obcowzbudnej w stosunku do innych maszyn prądu stałego.

Literatura

- [1] Węglarz J.: Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa-Poznań 1968
- [2] Jabłoński M.: Maszyny prądu stałego, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1973, wersja elektroniczna Biblioteka Politechniki Łódzkiej

